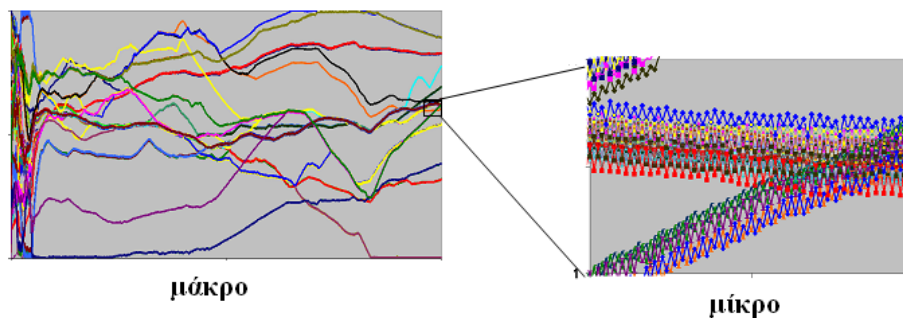


**ΠΑΝΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΨΥΧΟΛΟΓΙΑΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Προσομοίωση Κοινωνικών Συστημάτων με Χρήση Νέων
Τεχνολογιών: Η Διερεύνηση της Τοπολογίας στο Μοντέλο
Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών**



ΑΝΔΡΕΑΣ Γ. ΚΟΥΛΟΥΡΗΣ

Τριμελής Επιτροπή

Ι. Κατερέλος, αν. Καθηγητής (επιβλέπων)

Σ. Παπαστάμου, Καθηγητής, (μέλος)

Κ. Κοσκινάς, αν. Καθηγητής (μέλος)

ΑΘΗΝΑ 2008

Η διδακτορική διατριβή αυτή εκπονήθηκε με τη συνδρομή υποτροφίας του Ι.Κ.Υ.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την τριμελή συμβουλευτική επιτροπή που συνέβαλε με χρήσιμες παρατηρήσεις στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Ιωάννη Κατερέλο, ο οποίος ως επιβλέπων επέδειξε αμέριστη υπομονή και εμπλούτισε τη σκέψη μου με γόνιμες παρατηρήσεις καθώς και που μου μετέδωσε την αγάπη του για την έρευνα. Η ουσιαστική και με μεγάλη δεξιότητα καθοδήγησή του στο ξεπέρασμα των ποικίλων δυσκολιών που συνάντησα κατά τη διάρκεια της έρευνας, καθώς επίσης και η ηθική του συμπαράσταση που μου παρείχε, με βοήθησαν τα μέγιστα στην ολοκλήρωσή της.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον καθηγητή του Μαθηματικού Τμήματος του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Αναστάσιο Μπούντη για τις εποικοδομητικές συζητήσεις που είχαμε.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύζυγό μου Κωνσταντίνα Ντούτσου και να σταθώ ιδιαίτερα στην πραγματικά μεγάλη ηθική υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής της διατριβής, χωρίς την οποία δε θα μπορούσε αυτή να πραγματοποιηθεί. Ευχαριστώ ακόμη τα δύο μου παιδιά, Γιώργο και Δημήτρη για την κατανόηση που χρειάστηκε να επιδείξουν κάποιες φορές, παρά το μικρό της ηλικίας τους. Στη σύζυγό μου και σ' αυτά αφιερώνω τη διατριβή αυτή.

Πίνακας Περιεχομένων

Εισαγωγή.....	11

ΜΕΡΟΣ Α΄: ΤΑ ΔΡΑΣΤΟΣΤΡΕΦΗ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΚΑΙ Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΧΑΟΥΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΚΟΙΝΩΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΗ ΔΡΑΣΤΟΣΤΡΕΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

1.1. Η Μέθοδος της Προσομοίωσης	17
1.2. Εφαρμογές της Μεθόδου της Προσομοίωσης στις Κοινωνικές Επιστήμες	23
1.3. Στατιστικά Μοντέλα και Μοντέλα Προσομοίωσης.....	31
1.4. Η Δραστοστρεφής Μοντελοποίηση.....	35
1.4.1. Η Θεωρία της Πολυπλοκότητας.....	35
1.4.2. Αντικειμενοστραφής Προγραμματισμός και Κατανεμημένα Συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης.....	37
1.4.3. Οι Δραστοστρεφείς Προσομοιώσεις για τις Κοινωνικές Επιστήμες.....	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΔΡΑΣΤΟΣΤΡΕΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

2.1. Το Μοντέλο της Ντάμας του James Sakoda	45
2.2. Το Δυναμικό Μοντέλο Διαχωρισμού του Thomas Schelling	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΑ ΔΡΑΣΤΟΣΤΡΕΦΗ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ ΓΝΩΜΩΝ

3.1. Μοντέλο Πολιτισμικής Διασποράς του Robert Axelrod.....	58
3.1.1. Παρουσίαση του Μοντέλου.....	60
3.1.2. Διερεύνηση των Παραγόντων που καθορίζουν τον Αριθμό των Πολιτισμών που επιβιώνουν	65
3.2. Μοντέλο της Θεωρίας της Κοινωνικής Απήχησης των Nowak και Latané.....	70
3.3. Το Μοντέλο Περιορισμένης Εμπιστοσύνης των Hegselmann και Krause.....	77

3.3.1. Περιγραφή του Μοντέλου χρησιμοποιώντας ως Τοπολογία Επικοινωνίας την Τοπολογία του Πλήρους Γράφου	78
3.3.2. Το Μοντέλο Περιορισμένης Εμπιστοσύνης με Τοπολογία Επικοινωνίας ενός Κυψελοειδούς Αυτόματου.....	81

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΔΡΑΣΤΟΣΤΡΕΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΓΕΝΕΤΙΚΗ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗ: ΜΙΑ ΝΕΑ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΟΙΝΩΝΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ

4.1. Δραστοστρεφή Μοντελοποίηση και Κοινωνική Θεωρία.....	86
4.1.1. Μεθοδολογικός Αναγωγισμός και το Μίκρο-Μάκρο Πρόβλημα στη Δραστοστρεφή Μοντελοποίηση και στην Κοινωνική Θεωρία.....	88
4.1.2. Η Ανάδυση των Μάκρο-Κοινωνικών Φαινομένων από τις Τοπικές Αλληλεπιδράσεις των Μεμονωμένων Πρακτόρων.....	91
4.2. Κοινωνικές Προσομοιώσεις και Επιστημολογία.....	94
4.2.1. Δραστοστρεφή Μοντελοποίηση και Κοινωνικές Προσομοιώσεις: Ο Τρίτος Τρόπος Διεξαγωγής Επιστημονικής Έρευνας.....	94
4.2.2. Γενετική Κοινωνική Επιστήμη.....	96

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΧΑΟΣ: ΜΙΑ ΝΕΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗ

5.1. Η Ανάπτυξη του Διαφορικού Λογισμού και των Δυναμικών Συστημάτων.....	110
5.2. Ντετερμινισμός και ο Δαίμονας του Laplace.....	112
5.3. Η Αρχή της Απροσδιοριστίας του Heisenberg.....	113
5.4. Δυναμικά Συστήματα.....	116
5.5. Η Πρώτη Ένδειξη για την Ύπαρξη του Χάους από τον Henri Poincare.....	122
5.6. Η Ανακάλυψη Αιτιοκρατικού Χάους από τον Edward Lorenz.....	124
5.7. Το Φαινόμενο της Πεταλούδας.....	129
5.8. Χάος: Μια Νέα Επιστήμη.....	130

ΜΕΡΟΣ Β΄: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΩΝ ΙΣΟΡΡΟΠΙΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΩΝ ΙΣΟΡΡΟΠΙΩΝ (MULTIPLE EQUILIBRIA REGULATION MODEL-MER MODEL)

6.1. Σύντομη Παρουσίαση του Μοντέλου Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών.....	136
6.2. Τάση προς Ισορροπία και Κοινωνική Θεωρία.....	138
6.3. Περιγραφή του Αλγορίθμου του Μοντέλου Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών.....	142
6.4. Περιορίζοντας τις Γνώμες στο Διάστημα $[0,1]$: Διαδικασία Ανακλιμάκωσης.....	150
6.5. Ανάλυση των παραμέτρων του Μοντέλου MER.....	152
6.5.1. Ο ρόλος του Φράγματος Εμπιστοσύνης ϵ	152
6.5.2. Ο ρόλος του Συντελεστή Ενδοατομικής Ισορροπίας ψ	153
6.6. Αρχικό Προφίλ Γνωμών και Ακρίβεια Πραγματοποιούμενων Μετρήσεων.....	153
6.7. Παρουσίαση του Προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε για την Παραγωγή των Αποτελεσμάτων.....	154

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MER ΜΕ ΤΗΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΠΛΗΡΟΥΣ ΓΡΑΦΟΥ

7.1. Περιγραφή της Τοπολογίας του Πλήρους Γράφου	164
7.2. Παρουσίασης των Αποτελεσμάτων της Προσομοίωσης.....	165
7.2.1. Πρώτη Περίπτωση, $\psi=0.5$: Οι Διαταραχές Είναι Μικρές.....	169
7.2.1.1. Σχηματισμός Ομάδων στην Κοινωνική Ψυχολογία και στη Δραστοστρεφή Μοντελοποίηση.....	169
7.2.2. Δεύτερη Περίπτωση, $\psi=1$: Το Σύστημα Γίνεται Περιοδικό.....	172
7.2.3. Τρίτη Περίπτωση, $\psi=1.5$: Το Σύστημα Παρουσιάζει Εφήμερο Χάος.....	184
7.3. Είναι το Σύστημα Ευαίσθητο στις Αρχικές Συνθήκες; Επανάληψη της Προσομοίωσης με μια Απειροελάχιστη Μεταβολή στην Αρχική Γνώμη μιας Πράκτορα.....	189
7.3.1. Μελέτη των Ατομικών Τροχιών των Πρακτόρων.....	192
7.3.2. Μελέτη του Αριθμού των Συστάδων που Σχηματίζονται.....	195

7.3.3. Ευαισθησία των Στατιστικών Δεικτών του Συστήματος (Μέτρα Θέσης και Διασποράς).....	198
7.4. Υπολογισμός του Εκθέτη Lyapunov.....	201
7.5. Υπολογισμός της Εντροπίας του Συστήματος.....	212
7.6. Συμπεράσματα.....	217

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΚΟΙΝΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΤΩΝ ΠΡΑΚΤΟΡΩΝ ΣΤΑ ΔΡΑΣΤΟΣΤΡΕΦΗ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

8.1. Κοινωνικά Δίκτυα.....	220
8.2. Ο Ρόλος της Τοπολογίας της Επικοινωνίας στα Δραστοστρεφή Μοντέλα Κοινωνικών Προσομοιώσεων.....	223
8.3. Τοπολογίες Επικοινωνίας στα Δραστοστρεφή Μοντέλα Κοινωνικών Προσομοιώσεων.....	226

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ ΠΟΥ ΕΙΣΑΓΟΥΝ ΤΗΝ ‘ΤΟΠΙΚΟΤΗΤΑ’ ΣΤΗΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MER

9.1. Εφαρμογή της Τοπολογίας ενός Κυψελοειδούς Αυτομάτου στο Μοντέλο MER.....	234
9.2. Αποτελέσματα της Προσομοίωσης για $\psi=0.5$: Η Εφαρμογή της Τοπολογίας του Κυψελοειδούς Αυτομάτου δεν έχει Σημαντική Επίδραση στη Δυναμική του Συστήματος.....	236
9.3. Αποτελέσματα της Προσομοίωσης για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$: Διαταράσσοντας την Περιοδικότητα Οδηγούμαστε στο Χάος.....	243
9.3.1. Το σύστημα δεν τερματίζει για ένα εκατομμύριο επαναλήψεις!.....	246
9.3.2. Μελέτη των Ομάδων των Πρακτόρων στο Μοντέλο MER.....	248
9.3.2.1. Διερεύνηση των Ομάδων στο Μάκρο Επίπεδο.....	248
9.3.2.2. Διερεύνηση της Γεωγραφικής Κατανομής των Ομάδων στο Κυψελοειδές Αυτόματο.....	253
9.3.2.3. Διερεύνηση του Εσωτερικού των Ομάδων στο Μίκρο Επίπεδο.....	256
9.3.3. Αδυναμία Μελέτης του Χαοτικού Ελκυστή του Μοντέλου MER.....	260

9.4. Αποτελέσματα της Προσομοίωσης για $\psi=1$ σε συνδυασμό με $\varepsilon=0.2$ και $\varepsilon=0.3$: Ο Ρόλος του Φράγματος Εμπιστοσύνης ε	262
9.5. Αποτελέσματα της Προσομοίωσης για $\psi=1.5$: Ένα πιο Ισχυρό Εφήμερο Χάος και Μετατροπή και της Δεύτερης Γνώμης σε Κατάτμηση.....	264
9.6. Διερεύνηση της Ιδιότητας της Ευαισθησίας στις Αρχικές Συνθήκες για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$	273
9.6.1. Επίδραση στις ατομικές τροχιές των πρακτόρων.....	275
9.6.2. Επίδραση στους Στατιστικούς Δείκτες του Συστήματος.....	278
9.7. Διερεύνηση της Ιδιότητας της Ευαισθησίας στις Αρχικές Συνθήκες για $\psi=1.5$ και $\varepsilon=0.1$	280
9.8. Αδυναμία Πρόβλεψης και Ορίζοντας Προβλεψιμότητας.....	284
9.9. Συμπεράσματα.....	287

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΑΣΤΡΟ

10.1. Παρουσίαση της Τοπολογίας.....	293
10.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$	294
10.3. Αποτελέσματα Προσομοίωσης για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.2$ και 0.3	300
10.4. Αποτελέσματα Προσομοίωσης για $\psi=1.5$ και $\varepsilon=0.1$	304
10.5. Συμπεράσματα.....	306

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ ΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΡ ΕΦΑΡΜΟΖΟΝΤΑΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΓΝΩΜΗ

11.1. Τοπολογία Επικοινωνίας Πλήρους Γράφου για τη Γνώμη 1 και «Άστρου» και Κυψελοειδούς Αυτομάτου για τη Γνώμη 2.....	307
11.2. Τοπολογία Επικοινωνίας «Άστρου» για τη Γνώμη 1 και αι Κυψελοειδούς Αυτομάτου για τη Γνώμη 2.....	313

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12

ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

12.1. Η Πρόβλεψη στις Κοινωνικές Επιστήμες.....	320
12.2. Σύνοψη των Αποτελεσμάτων της Διατριβής.....	325
12.3. Μελλοντικοί Ερευνητικοί Προσανατολισμοί.....	333

ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	337

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	338

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. Μαθηματική Γραφή του Μοντέλου Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών.....	349
2. Ψευδοκώδικας του Προγράμματος.....	351
3. Ο Κώδικας του Προγράμματος.....	353
4. Υπολογισμός των Εκθετών Lyapunov.....	367

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια οι κοινωνικές επιστήμες έχουν συμπεριλάβει την προσομοίωση σαν ένα νέο ισχυρό εργαλείο εξερεύνησης της δυναμικής των κοινωνικών συστημάτων. Τα δραστοστρεφή μοντέλα προσομοιώσεων είναι ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος έρευνας για την εξερεύνηση των ελάχιστων συνθηκών και προϋποθέσεων κάτω από τις οποίες εμφανίζονται συγκεκριμένα κοινωνικά φαινόμενα. Η *δραστοστρεφή μοντελοποίηση (agent-based modeling)* και οι *κοινωνικές προσομοιώσεις (social simulations)* είναι μια νέα προσέγγιση στη μοντελοποίηση συστημάτων που αποτελούνται από αυτόνομους αλληλεπιδρώντες *πράκτορες (agents)*. Τα δραστοστρεφή μοντέλα ασκούν ήδη μεγάλη επίδραση στον τρόπο που κοινωνικοί ερευνητές χρησιμοποιούν ηλεκτρονικούς υπολογιστές και εργαστήρια για να παράγουν νέα γνώση και να στηρίζουν την ερευνητική τους δραστηριότητα καθώς και στα στελέχη των επιχειρήσεων για να υποστηρίξουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Η ισχυροποίηση της υπολογιστικής ικανότητας των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει επιτρέψει τη διεξαγωγή ενός μεγάλου αριθμού από εφαρμογές της δραστοστρεφούς μοντελοποίησης σε μια ευρεία γκάμα ερευνητικών πεδίων.

Τα δραστοστρεφή μοντέλα και οι κοινωνικές προσομοιώσεις αποτελούν ένα νέο επιστημονικό κλάδο που γνωρίζει μεγάλη άνθηση, κυρίως όμως εκτός Ελλάδος. Για τα σημαντικότερα μοντέλα προσομοίωσης δυναμικής εξέλιξης των γνώμων που παρουσιάζονται στα κεφάλαια 2 και 3, καθώς και το μοντέλο Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών που παρουσιάζεται και διερευνάται στην παρούσα διατριβή δεν έχει γραφεί ως την ώρα που γράφονται αυτές οι γραμμές οτιδήποτε στην ελληνική γλώσσα, ούτε έχει γίνει η παραμικρή παρουσίαση σε κάποιο ελληνικό επιστημονικό περιοδικό ή στο διαδίκτυο.

Οι κοινωνικές προσομοιώσεις, εκτός από νέος και άγνωστος χώρος σε μια μεγάλη μερίδα των κοινωνικών επιστημόνων, είναι δυστυχώς και αρκετά δύσκολος κατά την αρχική προσέγγισή του. Για να κατανοηθούν πλήρως τα περισσότερα δραστοστρεφή μοντέλα με όλες τους τις λεπτομέρειες, τεχνικές και μη, χρειάζονται γνώσεις όχι απλά στοιχειώδεις αλλά σε υψηλό επίπεδο, πάνω σε μια σειρά ετερόκλητων επιστημονικών αντικειμένων, όπως η κοινωνική ψυχολογία, η επιστήμη των υπολογιστών, ο προγραμματισμός και η επιστήμη των δυναμικών συστημάτων και του χάους. Ειδικότερα για το μοντέλο MER, για να μελετηθεί ποσοτικά η αδυναμία πρόβλεψης

χρησιμοποιήθηκαν εξειδικευμένα μαθηματικά εργαλεία από την επιστήμη των δυναμικών συστημάτων, όπως οι εκθέτες Lyapunov και η εντροπία Kolmogorov-Sinai. Τα δυναμικά συστήματα και η επιστήμη του χάους μάλιστα, μέχρι πρόσφατα δε διδασκόταν στα μαθηματικά ή φυσικά τμήματα των πανεπιστημίων και κατά συνέπεια ελάχιστοι απόφοιτοι αυτών των τμημάτων τα έχουν διδαχθεί. Ο Freeman (1995) αναφερόμενος στην επιστήμη του χάους τονίζει ότι οι ψυχολόγοι και οι κοινωνικοί επιστήμονες θα πρέπει να έχουν την ευκαιρία αλλά και την υποχρέωση να εξερευνήσουν αυτή τη νέα προσφορά των θετικών επιστημών. Οι περισσότεροι ερευνητές στο χώρο των δραστοστρεφών μοντέλων των κοινωνικών προσομοιώσεων είναι απόφοιτοι θετικών σχολών οι οποίοι στη συνέχεια ασχολήθηκαν με την έρευνα στο χώρο των κοινωνικών επιστημών.

Η παρούσα διατριβή δεν εμπεριέχει την κοπιώδη και εξαιρετικά χρονοβόρο διεξαγωγή μιας ή περισσότερων ερευνών και την επακόλουθη στατιστική ανάλυση. Αντιθέτως προϋποθέτει τη δημιουργία ενός προγράμματος σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, τον ενδεδειγμένο έλεγχο του αν το πρόγραμμα αυτό κάνει αυτό ακριβώς που του ζητείται και όχι κάτι διαφορετικό, την παραγωγή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, τη μαθηματική τους επεξεργασία και τη συναγωγή των συμπερασμάτων. Για το μοντέλο των Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών το πρόγραμμα γράφτηκε εξ ολοκλήρου στη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic, καθώς οποιοδήποτε άλλο «έτοιμο» πακέτο που είναι κατάλληλο και διευκολύνει τη διεξαγωγή κοινωνικών προσομοιώσεων, όπως η NetLogo ή το πιο ισχυρό πακέτο προγραμματισμού Anylogic, στάθηκαν μη επαρκή στην αποτύπωση κάποιων λεπτών και σημαντικών τμημάτων του αλγορίθμου.

Η παρούσα διατριβή είχε σαν αφετηρία το κοινό ενδιαφέρον του συγγραφέα της και του κ. Κατερέλου για την επιστήμη του χάους και τις συνέπειες των πορισμάτων της για τις κοινωνικές επιστήμες. Η από κοινού διερεύνησή μας είχε ως αφετηρία, κατά το χειμώνα του 2001, τη μελέτη της δυναμικής των κοινωνικών αναπαραστάσεων με τη βοήθεια της θεωρίας των γράφων. Στη συνέχεια κατασκευάσαμε μια παραλλαγή του Μοντέλου Περιορισμένης Εμπιστοσύνης των Hegselmann και Krause¹, εισάγοντας μια τοπολογία με βάση τη θεωρία του κεντρικού πυρήνα του Abrie (1976) έτσι ώστε η επικοινωνία των πρακτόρων να λαμβάνει χώρα ανάλογα με το αν μοιράζονται τον κεντρικό πυρήνα ή την περιφέρεια μιας αναπαράστασης. Ως αποτέλεσμα της εισαγωγής της τοπολογίας αυτής οι τροχιές του μοντέλου εμφανίστηκαν πιο ταραχώδεις, τα

¹ Το μοντέλο αυτό παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής.

αποτελέσματα όμως δε μας ικανοποίησαν, μιας και στη συνέχεια και κατόπιν κάποιων συζητήσεων που είχαμε με τον καθηγητή κ. Μπούντη, ανακαλύψαμε ότι παρόμοιες τροχιές μπορούσαν να επιτευχθούν με την εισαγωγή οποιασδήποτε τοπολογίας που εισάγει την τοπικότητα στην επικοινωνία των πρακτόρων, όπως για παράδειγμα αυτή των κυψελοειδών αυτομάτων. Το μοντέλο που είχαμε κατασκευάσει παρουσίαζε μια ενδιαφέρουσα δυναμική, όμως παρέμενε σε όλες τις περιπτώσεις προβλέψιμο, μιας και βασιζόταν μόνο στην τάση των πρακτόρων προς επίτευξη κοινωνικής ισορροπίας.

Καθ' όλη τη διάρκεια δύο ακαδημαϊκών ετών (2001-2003) οι συναντήσεις με τον κ. Κατερέλο ήταν τουλάχιστον δύο κάθε εβδομάδα και διαρκούσαν, τις περισσότερες φορές από νωρίς το πρωί ως αργά το βράδυ. Στις συναντήσεις αυτές, αναμένοντας τον υπολογιστή να ολοκληρώσει προηγούμενες προσομοιώσεις, τροποποιούσαμε συνεχώς τον κώδικα του προγράμματος, με στόχο τη διεξαγωγή νέων προσομοιώσεων, καθώς και συζητούσαμε και αναλύαμε τα αποτελέσματα των προηγούμενων προσομοιώσεων.

Λίγες μέρες πριν το Πάσχα του 2002, ο κ. Κατερέλος είχε την ιδέα να εισαγάγουμε μια ψυχολογική συνιστώσα για κάθε πράκτορα, δηλαδή το συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ . Με την παράμετρο αυτή είχε γεννηθεί ουσιαστικά το μοντέλο MER. Τροποποιήσαμε το πρόγραμμα και μετά από λίγες ώρες εμφανίστηκε στην οθόνη του υπολογιστή η εικόνα του χάους, περίπου όπως εμφανίζεται στο 9ο κεφάλαιο της διατριβής, στη σελίδα 233. Είχε λάβει χώρα ο σχηματισμός των ομάδων και η αυτοοργάνωση του συστήματος, όπως και στις προηγούμενες προσομοιώσεις, αλλά αυτή τη φορά οι τροχιές ήταν εξαιρετικά ταραχώδεις και το σύστημα δε φαινόταν να τερματίζει, οσοδήποτε μεγάλος κι αν ήταν ο αριθμός των επαναλήψεων που διεξαγάγαμε. Για να επιβεβαιώσουμε το χαοτικό χαρακτήρα του συστήματος τροποποιήσαμε απειροελάχιστα έναν αριθμό (μια γνώμη ενός πράκτορα) και η προσομοίωση μας έδωσε ένα εντελώς διαφορετικό αποτέλεσμα, άρα το σύστημα ήταν ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες.

Αρχικά το μοντέλο MER, παρά τις πολύ καλές ιδιότητες που παρουσίαζε, είχε ένα «ελάττωμα», οι γνώμες δεν παρέμειναν φραγμένες κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, συνεπώς ήταν αναγκαίο να τροποποιηθεί. Μια πρώτη σκέψη που εφαρμόσαμε ήταν να εξισώνουμε με 1 τις γνώμες που γίνονταν μεγαλύτερες της μονάδας και με μηδέν όσες γίνονταν αρνητικές. Με τον τρόπο αυτό όλες παρέμειναν μέσα στο αρχικό διάστημα $[0,1]$, όμως η αλλαγή αυτή έκανε το σύστημα να τερματίζει και άρα τροποποιούσε τη δυναμική του. Τελικά το πρόβλημα λύθηκε με τη διαδικασία

ανακλιμάκωσης, η οποία διατήρησε τις γνώμες στο αρχικό διάστημα και ταυτόχρονα δεν αλλοίωνε τη δυναμική εξέλιξη του μοντέλου.

Παράλληλα με τις προηγούμενες διερευνήσεις επεκτείναμε τον κώδικα του προγράμματος, για τον υπολογισμό δύο δεικτών μέτρησης της χαοτικής συμπεριφοράς: τους εκθέτες Lyapunov και την εντροπία Kolmogorov-Sinai. Επιβεβαιώθηκε έτσι και μαθηματικά πλέον ότι το μοντέλο ήταν μη προβλέψιμο και ποσοτικοποιήθηκε η δυνατότητα για την πραγματοποίηση βραχυπρόθεσμων προβλέψεων, με τον προσδιορισμό του χρονικού ορίζοντα προβλεψιμότητας, μέσα στον οποίο το μέγεθος του αναπόφευκτου λάθους είναι ελεγχόμενο και δε μπορεί να ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή.

Μελετήσαμε ακόμη τη συμπεριφορά του μοντέλου για τις διάφορες τιμές των παραμέτρων καθώς και ένα μεγάλο αριθμό από παραλλαγές του, ανάλογα με το κοινωνικό φαινόμενο που επιθυμούσαμε να διερευνήσουμε κάθε φορά, όπως την ύπαρξη πλειοψηφίας-μειοψηφίας, την επίδραση της τοπολογίας επικοινωνίας στις ιδιότητες της τεχνητής κοινωνίας, της δομής των δύο γνωμών, την ύπαρξη τριών γνωμών αντί για δύο κλπ.

Στην πορεία χρειάστηκε να αγοράσουμε ισχυρότερους υπολογιστές για να μπορέσουν αυτοί να ανταπεξέλθουν και να ολοκληρώνουν κάποιες απαιτητικές, όσον αφορά την υπολογιστική δύναμη, προσομοιώσεις, τουλάχιστον σε χρόνο μικρότερο της εβδομάδας. Παρόλα αυτά ακόμη δεν έχουμε διεξάγει κάποιες ενδιαφέρουσες, τουλάχιστον κατ' εμάς, διερευνήσεις, μιας και χρειάζεται να διαθέσουμε έναν υπολογιστή και να περιμένουμε ενδεχομένως για έξι μήνες ή και ένα χρόνο ώστε να ολοκληρωθεί η προσομοίωση και να αναλύσουμε τα αποτελέσματα.

Σημειωτέον ότι όταν ανακαλύψαμε το μοντέλο και δημοσιεύσαμε το πρώτο άρθρο, αγνοούσαμε το μοντέλο πολιτισμικής διασποράς του Άξελροντ και το δυναμικό μοντέλο της κοινωνικής απήχησης των Nowak και Latané και κυρίως δεν είχαμε σαφή εικόνα για το χώρο των κοινωνικών δραστοστρεφών προσομοιώσεων. Είχαμε υπόψη μας μόνο το μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης των Hegselmann και Krause, το οποίο και αποτέλεσε την αφορμή για την έναρξη της αναζήτησής μας στο συγκεκριμένο χώρο.

Το μοντέλο MER έχει παρουσιαστεί σε δύο περιοδικά, στο *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* (<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/2/4.html>) και στο *Complexity* (<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/abstract/109741339/ABSTRAC>) καθώς και σε τρία διεθνή συνέδρια. Δυστυχώς ως τώρα έχει παρουσιαστεί ένα πολύ μικρό μέρος

των αποτελεσμάτων που έχουν παραχθεί. Ακόμη και μετά την ολοκλήρωση και τη συγγραφή της παρούσας διατριβής ένα μεγάλο μέρος των ευρημάτων που αφορούν στο μοντέλο παραμένει αδημοσίευτο. Επίσης ένας μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων δεν έχει ακόμη πραγματοποιηθεί, λόγω έλλειψης της απαραίτητης υπολογιστικής δύναμης. Χρειάζεται εξαιρετικά κοπιώδη εργασία για την δημοσίευση του συνόλου των προαναφερθέντων ευρημάτων, κάτι που πιθανώς να καταστεί δυνατό μόνο μετά τη συγκρότηση ολόκληρης ομάδας εργασίας, η οποία να περιλαμβάνει ικανό αριθμό ατόμων και να διαθέτει επαρκή υλικοτεχνική υποδομή, όσον αφορά υπολογιστές και εργαστήρια, έτσι να καταστεί δυνατή η ολοκλήρωση της εξερεύνησης του μοντέλου MER.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω σ' αυτό το σημείο τον καθηγητή κ. Κατερέλο για αυτή μας τη συνεργασία, τη μύησή μου στην έρευνα, τις ατελείωτες ώρες των συζητήσεων που είχαμε μαζί, έστω κι αν κάποιες φορές, λόγω της αγωνίας του για το τι θα προκύψει από τις προσομοιώσεις, χρειάστηκε να προγραμματίζουμε μέχρι τις πρώτες πρωινές ώρες.

Στην παρούσα διατριβή, εκτός από τη διερεύνηση του ρόλου της τοπολογίας επικοινωνίας στο μοντέλο πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών, που αποτελεί και το αντικείμενό της, συμπεριλαμβάνεται και μια εισαγωγή στις δραστοστρεφείς προσομοιώσεις καθώς και η παρουσίαση κάποιων από τα σημαντικότερα μοντέλα που αφορούν στη δυναμική εξέλιξη των γνωμών μιας τεχνητής κοινωνίας, μιας και όπως προαναφέρθηκε τίποτε σχετικό δεν υπάρχει ως αυτή τη στιγμή στην ελληνόγλωσση βιβλιογραφία. Ελπίζω η διατριβή αυτή να συμβάλλει στην πρόκληση του ενδιαφέροντος των ερευνητών για τα δραστοστρεφή μοντέλα των κοινωνικών προσομοιώσεων και τη ευρύτερη δυνατή αξιοποίηση, στο χώρο των κοινωνικών επιστημών, των τελευταίων ευρημάτων των δυναμικών συστημάτων και της επιστήμης του χάους.

ΜΕΡΟΣ Α΄

ΤΑ ΔΡΑΣΤΟΣΤΡΕΦΗ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΚΑΙ Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΧΑΟΥΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΚΟΙΝΩΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΗ ΔΡΑΣΤΟΣΤΡΕΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

*...for Distinction Sake, a Deceiving by Words, is commonly called a Lye, and a Deceiving by Actions, Gestures, or Behavior, is called **Simulation**.*

Robert South, 1697

1.1. Η Μέθοδος της Προσομοίωσης

Στην πρώτη αυτή ενότητα της διατριβής θα αναφερθούμε στον ορισμό της προσομοίωσης και θα γίνει μια περιληπτική αναφορά στις εφαρμογές των προσομοιώσεων στις φυσικές και κυρίως στις κοινωνικές επιστήμες.

Για τον όρο **προσομοίωση (simulation)** έχουν δοθεί αρκετοί ορισμοί, χωρίς ωστόσο να υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ τους. Η λέξη simulation στην αγγλική γλώσσα απαντάται από το 15^ο αιώνα, είχε αρνητική χροιά και σήμαινε την εξαπάτηση κάποιου με τη συμπεριφορά, τις χειρονομίες και τις ενέργειες. Μάλιστα ο South (1697) διαχωρίζει τον όρο simulation από το ψέμα (lie), το οποίο αναφερόταν στην εξαπάτηση κάποιου χρησιμοποιώντας μόνο το λόγο. Σταδιακά όμως, κατά τους επόμενους αιώνες, ο όρος αυτός έπαψε να έχει αρνητική χροιά. Η λέξη προσομοίωση προέρχεται από απόδοση στην νεοελληνική του αγγλικού όρου simulation και μαρτυρείται από το 1880, δίχως όμως να αναφέρεται στα ελληνικά λεξικά που είχαν γραφεί πριν το 1970.

Στην εγκυκλοπαίδεια Επιστήμης και Τεχνολογίας McGraw-Hill (2005) η προσομοίωση ορίζεται σε μια ευρεία γκάμα μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη και την ανάλυση της συμπεριφοράς πραγματικών ή θεωρητικών συστημάτων. Οι προσομοιώσεις διεξάγονται όχι στα «πραγματικά» συστήματα αλλά σε μοντέλα των συστημάτων, που δημιουργούνται για να μελετηθούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες των «πραγματικών» συστημάτων. Σύμφωνα με το προαναφερθέν λεξικό, οι κυριότεροι λόγοι που αναπτύσσονται τα μοντέλα προσομοίωσης και δεν αναλύονται τα ίδια τα συστήματα μπορεί να είναι οικονομικοί, το ότι το «πραγματικό» σύστημα δεν είναι διαθέσιμο, ή ακόμη και η επιθυμία να επιτευχθεί μια βαθύτερη κατανόηση της σχέσης ανάμεσα στα στοιχεία που αποτελούν το σύστημα. Στο λεξικό Μπαμπινιώτη, ως προσομοίωση ορίζεται η αναπαράσταση της συμπεριφοράς ή των χαρακτηριστικών μιας διεργασίας (λ.χ. βιολογικής, βιομηχανικής, οικονομικής) μέσω ενός μοντέλου, κυρίως σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, του οποίου οι παράμετροι και οι μεταβλητές αποτελούν είδωλα των αντίστοιχων μεγεθών της διεργασίας που μελετάται. Οι περισσότεροι ερευνητές συμφωνούν ότι η προσομοίωση είναι μια μέθοδος μελέτης ενός συστήματος και εξοικείωσης με τα χαρακτηριστικά του με τη βοήθεια ενός άλλου συστήματος. Θα μπορούσαμε ακόμη να πούμε ότι προσομοίωση είναι η μίμηση της λειτουργίας συστημάτων ή της εξέλιξης διαδικασιών στο χρόνο με τη βοήθεια υπολογιστή.

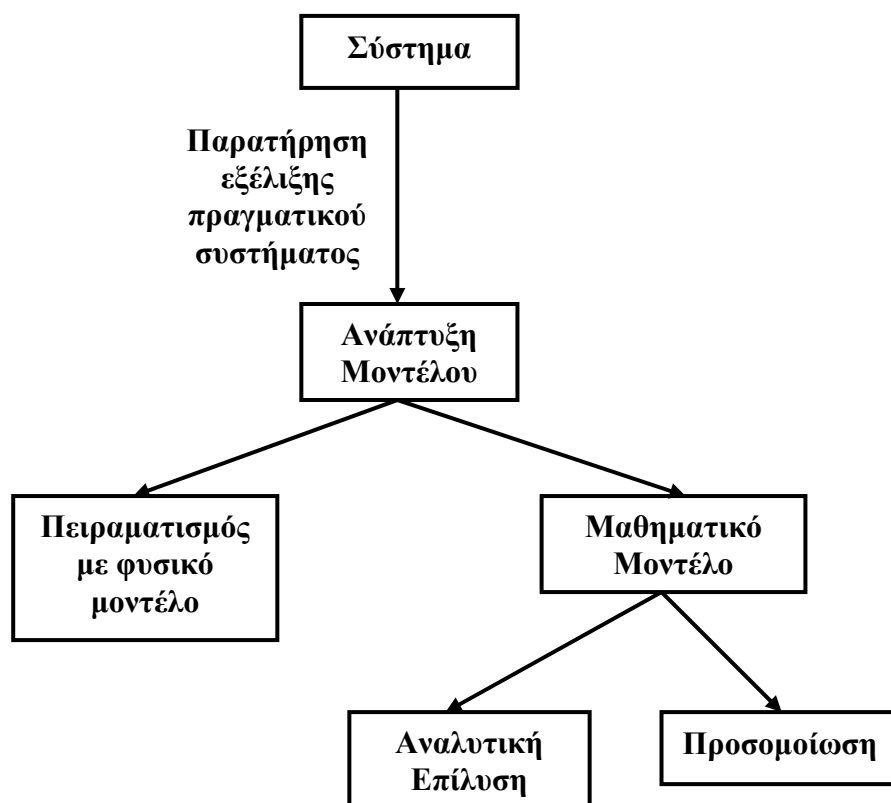
Η Προσομοίωση όμως κυρίως είναι ένα συγκεκριμένο είδος μοντελοποίησης. Η κατασκευή ενός μοντέλου αποτελεί ένα συνηθισμένο τρόπο για την κατανόηση του κόσμου, κάτι που γίνεται συνεχώς και που η επιστήμη έχει συστηματοποιήσει. Ένα μοντέλο είναι μια απλοποίηση, κάτι μικρότερο, λιγότερο λεπτομερές, λιγότερο πολύπλοκο μιας άλλης δομής ή συστήματος (Gilbert & Troitzsch, 2005/1999). Ένα μοντέλο ενός αεροπλάνου είναι εύκολα αναγνωρίσιμο ως αεροπλάνο, αν και αρκετά μικρότερο και χωρίς κανένα από τα πολύπλοκα συστήματα ελέγχου.

Πιο αναλυτικά, μπορούμε να ορίσουμε την προσομοίωση ως τη διαδικασία κατασκευής ενός πειραματικού μοντέλου, που θα μιμείται το πραγματικό σύστημα στις λειτουργίες που μας ενδιαφέρουν καθώς και της διεξαγωγής πειραμάτων με σκοπό είτε την κατανόηση της συμπεριφοράς του είτε την εκτίμηση διαφόρων στρατηγικών για τη διαχείρισή του. Η μέθοδος της προσομοίωσης αποτελεί, σε κάποιες περιπτώσεις, τη μοναδική προσέγγιση για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων με τεράστιο εύρος εφαρμογών. Επιγραμματικά θα μπορούσαμε να αναφέρουμε ως άμεσες εφαρμογές της σε επιχειρήσεις, κατασκευαστικές εταιρείες, οικονομικούς οργανισμούς, στην ανάλυση και σχεδίαση συστημάτων παραγωγής (βιομηχανία), στον έλεγχο αποθεμάτων (βιομηχανία,

εμπορικές επιχειρήσεις), στη μελέτη κυκλοφοριακών συστημάτων (οδικό δίκτυο, αεροδρόμια), στη μελέτη συστημάτων εξυπηρετήσεως πελατών (τράπεζες, νοσοκομεία, τηλεπικοινωνίες), στην αξιολόγηση αποφάσεων υπό αβεβαιότητα (χρηματιστήριο, επενδύσεις, marketing) και έμμεσες με βάση τη συνεισφορά της στην επίλυση προβλημάτων άλλων επιστημονικών περιοχών (ουρές αναμονής, θεωρία παιγνίων, αξιοπιστία συστημάτων, διερεύνηση κοινωνικών φαινομένων κ.λπ.). Οι εφαρμογές της μεθόδου της προσομοίωσης εκτείνονται σε ένα μεγάλο φάσμα θετικών και κοινωνικών επιστημών, όπως στη μηχανική, στη διοίκηση επιχειρήσεων, στην επιχειρησιακή έρευνα, στην πληροφορική, στην οικονομία, στην ψυχαγωγία και σε όλες σχεδόν τις κοινωνικές επιστήμες. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στην ορολογία κάποιων εννοιών που αφορούν στο σύνολο των εφαρμογών της μεθόδου της προσομοίωσης και κατόπιν θα επικεντρωθούμε στις εφαρμογές της μεθόδου στις κοινωνικές επιστήμες.

Σύστημα ονομάζεται ένα σύνολο στοιχείων τα οποία εξελίσσονται και αλληλεπιδρούν σύμφωνα με κάποιους κανόνες. Οι κανόνες αυτοί εκφράζονται με μαθηματικές ή λογικές σχέσεις, και αποτελούν το *μοντέλο του συστήματος*. *Κατάσταση* είναι το σύνολο των μεταβλητών οι οποίες δίνουν την απαραίτητη πληροφορία για την περιγραφή του συστήματος. Ανάλογα με το αν παρουσιάζουν διαχρονική εξέλιξη, τα *συστήματα* διακρίνονται σε δυναμικά και στατικά. *Δυναμικό (dynamic)* είναι το σύστημα του οποίου η κατάσταση είναι συνάρτηση του χρόνου. Αντίθετα *στατικό (static)* είναι το σύστημα το οποίο δεν εμφανίζει εξέλιξη (δεν μεταβάλλεται) με την πάροδο του χρόνου. Τα δυναμικά συστήματα διακρίνονται σε συστήματα διακριτού χρόνου (discrete time systems), συστήματα συνεχούς χρόνου (continuous time systems) και υβριδικά συστήματα (hybrid systems). Στα *συστήματα διακριτού χρόνου* η κατάσταση μεταβάλλεται βηματικά (απότομα) σε διακριτές χρονικές στιγμές $t_1, t_2, t_3, \dots$, ενώ παραμένει σταθερή στα διαστήματα $[t_1, t_2), [t_2, t_3), \dots$. *Συνεχές* είναι το *σύστημα* του οποίου η κατάσταση είναι συνεχής συνάρτηση του χρόνου. Η διαχρονική συμπεριφορά συνεχών συστημάτων περιγράφεται συνήθως από διαφορικές εξισώσεις. Υπάρχουν όμως και συστήματα όπου η κατάσταση είναι κατά διαστήματα συνεχής συνάρτηση του χρόνου και κάποιες χρονικές στιγμές παρουσιάζει βηματικές (απότομες) μεταβολές. Τα *συστήματα* αυτά ονομάζονται *υβριδικά*. Στα υβριδικά συστήματα η κατάσταση μεταβάλλεται βηματικά (απότομα) σε διακριτές χρονικές στιγμές $t_1, t_2, t_3, \dots$, και συνεχώς στα διαστήματα $[t_1, t_2), [t_2, t_3), \dots$. Τα *συστήματα* διακρίνονται επίσης σε *στοχαστικά (stochastic)* και *αιτιοκρατικά (deterministic)*. Οι δύο αυτές έννοιες θα αναλυθούν στη συνέχεια της διατριβής.

Το επόμενο σχήμα δείχνει τους τρόπους με τους οποίους μπορεί κανείς να μελετήσει τη λειτουργία ενός συστήματος.



Σχήμα 1.1: Τρόποι μελέτης ενός συστήματος, φυσικού ή κοινωνικού.

Τα μοντέλα, όπως και τα συστήματα που αναπαριστούν, μπορούν να είναι στατικά ή δυναμικά, διακριτά ή συνεχή και αιτιοκρατικά ή στοχαστικά. Τα μοντέλα προσομοίωσης αποτελούνται από μαθηματικές και λογικές σχέσεις και αναλύονται με αριθμητικές και όχι αναλυτικές μεθόδους. Οι αριθμητικές μέθοδοι εμπεριέχουν υπολογιστικές διαδικασίες για να «τρέξει» το μοντέλο και να παραχθεί μια «τεχνητή» ιστορία του συστήματος. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης χρησιμεύει στην καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών του συστήματος.

Η προσομοίωση αποτελεί πειραματική μέθοδο που έχει σα σκοπό τη βελτιστοποίηση ενός συστήματος, τη μελέτη της λειτουργίας του και την ανάλυση της ευαισθησίας του. Ως πειραματική μέθοδος όμως, εξαρτάται πολύ από την πιστότητα του μοντέλου που χρησιμοποιείται και την κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων του. Με την προσομοίωση μπορεί κανείς να αξιολογήσει την αποτελεσματικότητα ή απόδοση ενός συστήματος πριν αυτό κατασκευασθεί με σκοπό τη βέλτιστη σχεδιάσή του. *Σχεδίαση* είναι το πρόβλημα του καθορισμού των παραμέτρων από ένα σύνολο εναλλακτικών επιλογών ώστε η λειτουργία του συστήματος να είναι η βέλτιστη δυνατή.

Αν οι σχέσεις που περιγράφουν την εξέλιξη του συστήματος είναι απλές, τότε είναι δυνατή η εύρεση λύσεων κλειστής μορφής, οπότε λέμε ότι *το μοντέλο επιλύεται αναλυτικά*. Ωστόσο τα περισσότερα συστήματα έχουν διάνυσμα κατάστασης μεγάλων διαστάσεων και περιγράφονται από πολύπλοκα μοντέλα των οποίων η αναλυτική επίλυση είναι αδύνατη. Για τη μελέτη τους εφαρμόζονται οι λεγόμενες *αριθμητικές μέθοδοι*. Τέτοιες είναι η *αριθμητική ανάλυση* και η *προσομοίωση*. Η προσομοίωση συνίσταται στην ανάπτυξη ενός μοντέλου του υπό εξέταση συστήματος με τη μορφή προγράμματος σε υπολογιστή και στην εκτέλεση ενός ή περισσότερων πειραμάτων τα οποία καταγράφουν την κατάσταση του συστήματος σε διαδοχικές χρονικές στιγμές αποτυπώνοντας ένα πιθανό σενάριο εξέλιξης του συστήματος στο χρόνο.

Ο σκοπός των κατασκευαστών μοντέλων προσομοίωσης και των ερευνητών είναι να γίνει κατανοητό καλύτερα ένα κοινωνικό φαινόμενο, όπως ο σχηματισμός των γνώμων των ατόμων μιας κοινωνίας ή η διασπορά ενός πολιτισμού, να προβλεφθούν οι μελλοντικές τιμές των μεταβλητών που μας ενδιαφέρουν, όπως τα φορολογικά έσοδα μετά από κάποια τροποποίηση του φορολογικού συστήματος, ή η ανάπτυξη ανθρώπινων ικανοτήτων, όπως ένας προσομοιωτής πτήσης με τον οποίο οι πιλότοι μπορούν να εκπαιδευθούν χωρίς συντριβεί ένα πραγματικό αεροπλάνο

Τα μοντέλα προσομοίωσης διαφέρουν όσον αφορά τον αριθμό επιπέδων που περιγράφουν. Κάποια μοντέλα λαμβάνουν υπόψη μόνο ένα επίπεδο, παραδείγματος χάριν μελετούν την οικονομική ανάπτυξη στο μακροοικονομικό επίπεδο, ενώ άλλα επιτρέπουν την ταυτόχρονη εκτίμηση περισσότερων από ενός επιπέδων, παραδείγματος χάριν την οικονομική ανάπτυξη παρατηρείται στο μέγρο-οικονομικό επίπεδο αλλά όπως προκύπτει από τις ενέργειες των πρακτόρων στο μικρό επίπεδο. Επιπλέον, τα μοντέλα προσομοίωσης διαφέρουν όσον αφορά το βαθμό της επικοινωνίας μεταξύ των πρακτόρων, τον αριθμό πρακτόρων και της πολυπλοκότητας του συστήματος. Η μοντελοποίηση της οικονομικής ανάπτυξης στο μακροοικονομικό επίπεδο απαιτεί μόνο έναν πράκτορα με χαμηλή πολυπλοκότητα. Προκειμένου όμως να γίνει κατανοητή η διαδικασία καινοτομίας στο μικροοικονομικό επίπεδο, χρειαζόμαστε ένα μοντέλο που να περιλαμβάνει περισσότερους από έναν πράκτορες. Οι πράκτορες αυτοί διαβιβάζουν και λαμβάνουν τις πληροφορίες ο ένας για τον άλλον επειδή αναπτύσσουν ανταγωνιστικά προϊόντα και πρέπει να αντιπροσωπευθούν με έναν πιο πολύπλοκο τρόπο, προκειμένου να ερμηνευθούν επαρκώς οι διαδικασίες λήψης απόφασης. Για τον ορισμό και τις ιδιότητες των πρακτόρων θα αναφερθούμε αναλυτικά στη συνέχεια της διατριβής.

Η διεξαγωγή προσομοιώσεων ως μέθοδος επιστημονικής έρευνας έχει μια σειρά από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία είναι εξαρτώνται κάθε φορά από τον επιστημονικό χώρο όπου χρησιμοποιείται ως μέθοδος έρευνας η προσομοίωση, καθώς και από το προς μελέτη φαινόμενο. Στη συνέχεια θα αναφέρουμε σε γενικές γραμμές τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου των προσομοιώσεων. Κάποια από αυτά θα αναλυθούν περαιτέρω στη συνέχεια της διατριβής.

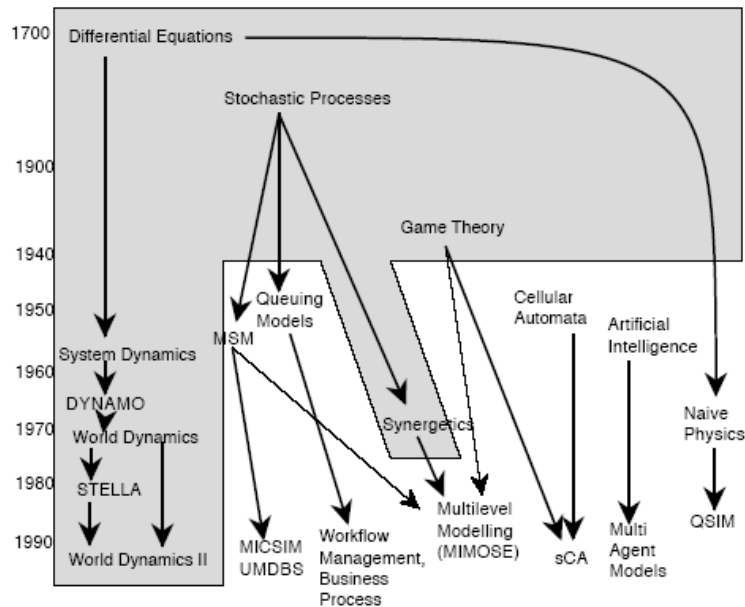
Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι σε κάποιες περιπτώσεις η μέθοδος της προσομοίωσης μπορεί να αποτελεί την μόνη προσέγγιση που είναι διαθέσιμη για την επίλυση ερευνητικών προβλημάτων, κυρίως στις κοινωνικές επιστήμες και ιδιαίτερα στη μελέτη φαινομένων που εξελίσσονται δυναμικά στο χρόνο. Μπορεί ακόμη να κοστίζει λιγότερο, να παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στην αντίληψη των σχέσεων μεταξύ των προβλημάτων και να προσφέρει τη δυνατότητα επανάληψης και πλήρους ενόρασης του συστήματος, το οποίο εξετάζεται με τη μέθοδο αυτή απ' όλες τις πλευρές. Είναι ακόμη μια ασφαλής μέθοδος και τώρα πια διαθέσιμη στον καθένα που διαθέτει προσωπικό ηλεκτρονικό υπολογιστή, η υπολογιστική δύναμη μάλιστα του οποίου έχει τα τελευταία χρόνια αυξηθεί σημαντικά. Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα των μοντέλων προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για να γίνει κατανοητό ένα κοινωνικό φαινόμενο ή να προβλεφθούν οι μελλοντικές τιμές κάποιων κοινωνικών μεταβλητών σε σχέση με τα αμιγώς μαθηματικά μοντέλα είναι ότι τα πρώτα είναι λιγότερο αφηρημένα από τα δεύτερα (Gilbert, 1996b). Το γεγονός αυτό βέβαια σημαίνει ότι λόγω του ότι τα μοντέλα προσομοίωσης είναι πιο συγκεκριμένα κάποιες φορές είναι και πιο πολύπλοκα και έτσι η κατανόησή τους μπορεί να είναι δυσχερέστερη.

Η μέθοδος της προσομοίωσης όμως μπορεί να παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα, όπως ότι κάποιες φορές απαιτεί σημαντικό χρόνο και κόστος, μπορεί να μην είναι η πιο κατάλληλη μέθοδος επίλυσης για κάποια προβλήματα και δεν εγγυάται ότι θα οδηγήσει στην καλύτερη δυνατή λύση. Μπορεί ακόμη να μην αντανάκλα με ακρίβεια την υπό μελέτη κατάσταση και αρκετές προσομοιώσεις βασίζονται καθοριστικά σε στοχαστικές διαδικασίες και κατανομές. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στις εφαρμογές της μεθόδου της προσομοίωσης.

1.2. Εφαρμογές της Μεθόδου της Προσομοίωσης στις Κοινωνικές Επιστήμες

Η προσομοίωση χρησιμοποιείται σε ένα μεγάλο αριθμό από επιστημονικούς κλάδους. Ιστορικά οι προσομοιώσεις αναπτύχθηκαν ανεξάρτητα για κάθε κλάδο εφαρμογής τους, ως τον 20^ο αιώνα, όπου η *θεωρία συστημάτων (systems theory)* και η *κυβερνητική (cybernetics)*, σε συνδυασμό με την ευρεία χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, οδήγησαν σε μια ενοποίηση και πιο συστηματική μελέτη των μεθόδων των προσομοιώσεων.

Η χρήση των προσομοιώσεων στις κοινωνικές επιστήμες είναι μια μάλλον νέα ιδέα. Μολονότι τα πρώτα παραδείγματα τέτοιου είδους προσομοιώσεων χρονολογούνται στα τέλη της δεκαετίας του 60, οι προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν ευρέως από τη δεκαετία του 90 και εντεύθεν και αποτελούν ένα κλάδο με τεράστια δυναμική, μιας και είναι ένας έξοχος τρόπος για τη μοντελοποίηση και την κατανόηση των κοινωνικών διαδικασιών. Η πρώτη ανάπτυξη προσομοιώσεων για τις κοινωνικές επιστήμες σε ηλεκτρονικό υπολογιστή συνέπεσε με τις πρώτες χρήσεις ηλεκτρονικού υπολογιστή στα πανεπιστήμια για ερευνητικούς σκοπούς στις αρχές της δεκαετίας του 1960 (Gilbert & Troitzsch, 2005/1999). Αφορούσαν κυρίως *μοντέλα ουρών (queuing models)*, δηλαδή διακριτές προσομοιώσεις που μοντελοποιούσαν το πέρασμα μονάδων από ουρές και διαδικασίες και προσομοιώσεις που ανήκουν στο χώρο της *συστημικής δυναμικής (system dynamics)* (βλέπε εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1: Η ανάπτυξη των διαφόρων μεθόδων προσομοίωσης στις κοινωνικές επιστήμες (Troitzsch, 1997).

Το είδος αυτό των προσομοιώσεων είχε ως πρώτο στόχο την πρόβλεψη των εξόδων του συστήματος, για παράδειγμα το χρόνο που οι πελάτες περίμεναν σε μια ουρά ή το χρόνο που χρειάζονται τα αυτοκίνητα της αστυνομίας να φτάσουν στον τόπο που έχουν κληθεί. Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν αναφέρονται με τον όρο *μοντέλα ουρών (queueing models)*. Οι προσομοιώσεις της συστημικής δυναμικής χρησιμοποιούν συστήματα διαφορικών εξισώσεων ή εξισώσεων διαφορών και σχεδιάζουν τις τροχιές των μεταβλητών ως συνάρτηση του χρόνου, με σκοπό να πραγματοποιήσουν προβλέψεις.

Η *συστημική δυναμική (system dynamics)* (βλέπε διάγραμμα 1.1) έχει ως αφετηρία τις διαφορικές εξισώσεις (differential equations) και τις εξισώσεις διαφορών (difference equations), στις οποίες θα αναφερθούμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4. Η μοντελοποίηση αυτού του είδους αφορά κάποιο *σύστημα στόχο*, του οποίου οι ιδιότητες και η δυναμική περιγράφεται από ένα σύστημα εξισώσεων. Από τις εξισώσεις αυτές υπάρχει η δυνατότητα, πραγματοποιώντας μαθηματικούς υπολογισμούς, να προβλεφθεί η μελλοντική κατάσταση του συστήματος στόχου από την τωρινή του κατάσταση. Αυτού του είδους οι προσομοιώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ερμηνεύσουν την ανάπτυξη μιας οικονομίας σε μακροοικονομικό επίπεδο ή να διερευνήσουν κοινωνικά συστήματα. Σε κάθε περίπτωση αφορούν μόνο το μακρο επίπεδο και χρησιμοποιούν μόνο ένα πράκτορα (agent), με χαμηλή πολυπλοκότητα. Τα συστήματα των εξισώσεων των μοντέλων αυτού του είδους επιδέχονται κάποιες φορές, κάτω από συγκεκριμένες

συνθήκες, αναλυτική λύση. Η προσέγγιση αυτή όμως, δυστυχώς, δίνει μόνο τις τιμές των μεταβλητών που δίνουν λύσεις οι οποίες καταλήγουν σε κάποια κατάσταση ισορροπίας. Η χρήση προσομοιώσεων σε αυτές τις περιπτώσεις δίνει σημαντικότερες πληροφορίες σχετικά με τις διαφορετικές τροχιές και το χρόνο που χρειάζονται οι μεταβλητές για να ισορροπήσει το σύστημα.

Στο χώρο της συστημικής δυναμικής ανήκουν και οι προσομοιώσεις που διεξήγαγε «Η λέσχη της Ρώμης» (*The Club of Rome*). Η λέσχη αυτή είναι μια ομάδα ερευνητών που διεξήγαγε προσομοιώσεις και προέβλεψε μια ολική περιβαλλοντολογική καταστροφή σε κάποια μελλοντική χρονική στιγμή, η οποία θα οφείλεται στην εκθετική αύξηση του πληθυσμού της γης, σε συνδυασμό με την εξάντληση των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των αποθεμάτων. Η πρόβλεψη αυτή προκάλεσε μεγάλη αίσθηση στη διεθνή κοινότητα και προσέδωσε στις προσομοιώσεις μια πολύ «κακή» φήμη. Έπειτα από αυτό έγινε σαφές ότι τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης εξαρτώνται απόλυτα από τον ποσοτικό καθορισμό των παραμέτρων του μοντέλου (Gilbert & Troitzsch, 2005/1999).

Τα μοντέλα ουρών (*queuing models*) είναι μοντέλα διακριτού χρόνου που χρησιμοποιούνται για την προσέγγιση και βελτιστοποίηση μιας πραγματικής κατάστασης ενός συστήματος αναμονής. Τα μοντέλα ουρών επιτρέπουν τον καθορισμό των βέλτιστων τιμών για μια σειρά από μεταβλητές, έτσι ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Τα μοντέλα αυτά είναι μοντέλα διακριτού χρόνου, που βρήκαν στο πέρασμα του χρόνου εφαρμογές σε συνήθεις καταστάσεις, όπως η αναμονή των πελατών μιας δημόσιας υπηρεσίας, μιας τράπεζας, των επιβατών σε ένα αεροδρόμιο, αυτών που βρίσκονται στην αναμονή σε ένα τηλεφωνικό κέντρο αλλά και σε πολλούς άλλους επιστημονικούς κλάδους, όπως στο σχεδιασμό και την ανάλυση συστημάτων υπολογιστών. Σε κάθε μοντέλο ουρών ο χρόνος δεν είναι συνεχής, ούτε όμως διακριτός σε ίσα χρονικά διαστήματα, αλλά προχωρά από γεγονός σε γεγονός. Υπάρχουν σε όλα τα μοντέλα εξυπηρετητές (*servers*), πελάτες (*customers*) και προφανώς ουρές (*queues*). Η συντριπτική πλειοψηφία των μοντέλων αυτών είναι στοχαστικά, δηλαδή ο χρόνος αναμονής για την εμφάνιση του επόμενου πελάτη ακολουθεί μια τυχαία κατανομή, συνήθως την κατανομή Poisson.

Η μελέτη τέτοιων μοντέλων στοχεύει στην ανάπτυξη στρατηγικών που τείνουν να αποφεύγουν πιθανά μπουτιλιαρίσματα (*bottlenecks*) και να αξιοποιήσουν, μέσω του καλύτερου δυνατού συνδυασμού, τις ιδιότητες του συστήματος. Η μέθοδος της προσομοίωσης επιτρέπει στον ερευνητή να μεταβάλλει οποτεδήποτε θελήσει την δομή

του συστήματος, έως ότου πετύχει τη βέλτιστη λειτουργία του και στη συνέχεια να τροποποιήσει το σχεδιασμό του συστήματος στόχου. Κάποιες από τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι ο μέσος αριθμός στη σειρά αναμονής ή στο σύστημα, ο μέσος χρόνος που ξοδεύεται στη σειρά αναμονής ή στο σύστημα, η στατιστική κατανομή των δύο προηγούμενων μεταβλητών, η πιθανότητα η σειρά αναμονής να είναι πλήρης ή κενή και η πιθανότητα το σύστημα να βρεθεί σε μια συγκεκριμένη κατάσταση. Οι μη βέλτιστες τιμές των μεταβλητών, που αναφέρονται και σα μέτρα απόδοσης, μπορούν να αποτελέσουν την αιτία σημαντικών οικονομικών απωλειών σε μια επιχείρηση και τα προβλήματα που προκαλούνται από τις καταστάσεις αναμονής συσχετίζονται συχνά με τη δυσαρέσκεια πελατών για κάποια υπηρεσία. Η ανάλυση των μοντέλων ουρών επιτρέπει να προσδιοριστεί η αιτία των προβλημάτων και να εκτιμηθεί και αξιολογηθεί εκ των προτέρων ο αντίκτυπος οποιωνδήποτε πιθανών αλλαγών.

Όπως και στα μοντέλα της συστημικής δυναμικής, αυτός ο τύπος μοντέλου λαμβάνει υπόψη μόνο το μικρό επίπεδο. Αλλά ενώ στα μοντέλα της συστημικής δυναμικής εξετάζεται συχνά το μάκρο επίπεδο, σε αυτά τα μοντέλα συμπεριλαμβάνεται συνήθως ένας πολύ μεγάλος αριθμός πρακτόρων καθώς και οι αλληλεπιδράσεις τους στο μικρό επίπεδο. Ο αποδοτικός αριθμός μετρητών και υπαλλήλων πρέπει να ελαχιστοποιήσει το μέσο χρόνο αναμονής των πελατών και το χρόνο που ένας υπάλληλος δεν έχει τίποτα που κάνει. Η απάντηση είναι πολύ απλή όταν ο αριθμός πελατών είναι ίσος με τον αριθμό των ουρών αναμονής κάθε στιγμή, αλλά αυτό δε συμβαίνει σχεδόν ποτέ.

Μια άλλη κατηγορία μοντέλων προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι τα *microanalytical simulation models* (microanalytical simulation models). Τα μοντέλα αυτά επιχειρούν την διερεύνηση των αποτελεσμάτων των επεμβάσεων οικονομικής και κοινωνικής πολιτικής. Αυτός ο τύπος προσομοίωσης επιτρέπει να ληφθούν υπόψη δύο επίπεδα ανάλυσης, το μικρό και το μάκρο, καθώς επίσης περιλαμβάνει και πράκτορες με υψηλότερη πολυπλοκότητα. Η εξέταση των φαινομένων σε δύο επίπεδα είναι απαραίτητη, επειδή οι ερευνητές ενδιαφέρονται συνήθως για τα αποτελέσματα των πολιτικών επεμβάσεων στο συνολικό επίπεδο, όπως για παράδειγμα η πιθανή μεταβολή του μεγέθους των φορολογικών εσόδων μετά από μια αλλαγή του φορολογικού συστήματος. Όμως, τα συνολικά φορολογικά έσοδα εξαρτώνται από την κατανομή του εισοδήματος μεταξύ των οικογενειών, όπως αυτή επιδρά στο μικροοικονομικό επίπεδο. Προκειμένου να συλληφθούν από τη διαδικασία της μοντελοποίησης οι αντιδράσεις των μεμονωμένων οικογενειών, που οφείλονται στο

διαφορετικό επίπεδο εισοδήματος τους, μέσα σε ένα μεταβαλλόμενο φορολογικό σύστημα, είναι απαραίτητο το μοντέλο να τις συμπεριλάβει, άρα να ορίσει ένα σύνολο υποθέσεων στο μικρό επίπεδο. Στην οικοδόμηση ενός μικροαναλυτικού μοντέλου προσομοίωσης ο ερευνητής αρχίζει με τη συλλογή των στοιχείων από ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα του πληθυσμού στόχου, όσον αφορά τις ιδιότητες ενδιαφέροντος και με την αναπαραγωγή των συλλεχθέντων στοιχείων από το μοντέλο προσομοίωσης εξετάζει την επίδραση που έχει η τροποποίηση κάποιων μεταβλητών, όπως για παράδειγμα η αλλαγή του φορολογικού συστήματος στο μικρό και στο μακρό επίπεδο, δηλαδή στις οικογένειες αλλά και στο σύνολο των φορολογικών εσόδων. Είναι προφανές ότι η μελέτη αυτή βοηθά εξαιρετικά και στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, που αφορούν σε οποιαδήποτε αλλαγή κοινωνικής ή οικονομικής πολιτικής.

Μια άλλη κατηγορία μοντέλων προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται στις κοινωνικές επιστήμες είναι αυτά που βασίζονται στα κυψελοειδή αυτόματα. Τα κυψελοειδή αυτόματα (*cellular automata*) χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της τοπικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των πρακτόρων. Ένα κυψελοειδές αυτόματο είναι ένα κανονικό πλέγμα σε μια δεδομένη διάσταση, τα μοντέλα όμως που εδράζονται σε μονοδιάστατα ή δισδιάστατα κυψελοειδή αυτόματα είναι αυτά που χρησιμοποιούνται περισσότερο. Αποτελούνται από έναν αριθμό κελιών (*cells*), όπου κάθε κελί βρίσκεται σε μια κατάσταση, ανάμεσα από ένα σύνολο καλά καθορισμένων καταστάσεων. Κάθε κελί μεταβάλλει την κατάστασή του δυναμικά στο χρόνο και αλληλεπιδρά με τα γειτονικά του κελιά. Οι κανόνες αλληλεπίδρασης (*transition rules*) και αλλαγής κατάστασης για τα κελιά, που αποτελούν μια από τις σημαντικότερες συνιστώσες του μοντέλου, καθορίζονται εκ των προτέρων και μπορούν να είναι ομοιογενείς για όλα τα κελιά ή ετερογενείς. Στα κυψελοειδή αυτόματα και στη δραστοστρεφή μοντελοποίηση θα αναφερθούμε αναλυτικά στη συνέχεια της διατριβής, μιας και στα κεφάλαια 2 και 3 γίνεται αναλυτική παρουσίαση των πιο σημαντικών μοντέλων δραστοστρεφών προσομοιώσεων που βασίζονται στα κυψελοειδή αυτόματα και στο κεφάλαιο 8 αναλύεται η εφαρμογή της τοπολογίας ενός δυσδιάστατου κυψελοειδούς αυτομάτου στο Μοντέλο Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών.

Τα μοντέλα προσομοίωσης έχουν βρει τα τελευταία χρόνια και άλλες σημαντικές εφαρμογές. Μια κλασική χρήση των μοντέλων προσομοίωσης αφορά στην πραγματοποίηση προβλέψεων. Όταν έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο που επιτυχημένα αναπαριστά κάποιες κοινωνικές διαδικασίες, πραγματοποιώντας την προσομοίωση (τρέχοντας το πρόγραμμα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή) μπορούμε να αναλύσουμε τα

αποτελέσματα που αφορούν τη μελλοντική εξέλιξη του συστήματος και να πραγματοποιήσουμε προβλέψεις που αφορούν το «πραγματικό» σύστημα στόχο. Για παράδειγμα, σε δημογραφικές έρευνες είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί πρόβλεψη για τα επόμενα χρόνια ή και δεκαετίες για το μελλοντικό μέγεθος του πληθυσμού μιας χώρας, καθώς και για το ποσοστό των ανθρώπων που ανήκουν στις διάφορες ηλικιακές ομάδες. Παρόμοια πρόβλεψη πραγματοποιείται και από μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούν εξισώσεις, στις περισσότερες περιπτώσεις όμως οι προσομοιώσεις δίνουν ακριβέστερες και πιο αξιόπιστες προβλέψεις. Υπάρχουν μοντέλα που τροφοδοτούνται με το ρυθμό αναπαραγωγής και θνησιμότητας και δίνουν ακριβείς προβλέψεις με λεπτομερή στοιχεία, για αρκετά μεγάλο βάθος χρόνου.

Ένας άλλος σημαντικός τομέας εφαρμογής είναι και οι *προσομοιώσεις ρεαλιστικών μοντέλων (physical simulations)*. Στις προσομοιώσεις αυτές τα φυσικά αντικείμενα αντικαθιστούν τα πραγματικά αντικείμενα, γιατί μπορεί να είναι φθηνότερα ή μικρότερα από τα πραγματικά, όπως για παράδειγμα το crash test στα αυτοκίνητα. Οι προσομοιώσεις φυσικών μοντέλων που συμπεριλαμβάνουν και ανθρώπους ονομάζονται *διαδραστικές προσομοιώσεις (interactive simulations)*, όπως οι προσομοιωτές πτήσης κ.α. (βλέπε εικόνα 1.2)



Εικόνα 1.2: Παράδειγμα αλληλεπιδραστικής προσομοίωσης με σκοπό την εκγύμναση και την άσκηση ανθρώπων πάνω σε πρακτικές δεξιότητες: ξύλινος μηχανικός προσομοιωτής ίππευσης αλόγου που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του Πρώτου Παγκοσμίου Πολέμου (Από το διαδίκτυο, <http://en.wikipedia.org/wiki/Simulation>)

Η προσομοίωση αυτές χρησιμοποιούνται στην εκπαίδευση και κατάρτιση πολιτικού και στρατιωτικού προσωπικού. Αυτό συνήθως συμβαίνει γιατί η εκπαίδευση με το πραγματικό υλικό είναι είτε ακριβή είτε επικίνδυνη. Στις περιπτώσεις αυτές οι εκπαιδευόμενοι θα αφιερώσουν αρκετές ώρες μαθαίνοντας μέσα στο ασφαλές περιβάλλον της προσομοίωσης, όπου τα λάθη που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης είναι ουσιαστικά χωρίς συνέπειες. Η προσομοίωση σήμερα αποτελεί μια απαραίτητη λειτουργία στο σχεδιασμό και υλοποίηση προγραμμάτων εκσυγχρονισμού και ανάπτυξης επιχειρηματικών δραστηριοτήτων, προκειμένου να αποφασισθεί η καλύτερη δυνατή λύση και να γίνουν οι σωστότερες ενέργειες με το μικρότερο κόστος και ρίσκο. Έχουν κατασκευαστεί προσομοιώσεις δυναμικών μοντέλων στο χώρο της διοίκησης επιχειρήσεων, που επιτρέπουν τον πειραματισμό με στρατηγικές (business strategies) στα πλαίσια ενός περιβάλλοντος που εμπεριέχει υψηλό ρίσκο (risk free environment) οι οποίες παρέχουν μια χρήσιμη επέκταση της μεθόδου της μελέτης περίπτωσης (case study). Ακόμη χρησιμοποιούνται προσομοιώσεις της εξέλιξης εθνικών

οικονομιών για την εκπαίδευση οικονομολόγων και έμπειρα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση γεωλόγων, τα οποία έχουν τη δυνατότητα, για παράδειγμα, να ταξινομούν τα πετρώματα σύμφωνα με την πιθανότητα να περιέχονται σε αυτά πολύτιμα πετρώματα. Κατά συνέπεια η προσομοίωση, με τα πολλαπλά εργαλεία που διαθέτει, αποτελεί μία σημαντική μέθοδο με αξιόλογη συμβολή στην όσο το δυνατόν ρεαλιστική και κατανοητή εκπαίδευση (Gilbert & Troitzsch, 2005/1999).

Μια ακόμη χρήση των προσομοιώσεων είναι για ψυχαγωγία και διασκέδαση. Το είδος αυτό καθορίζεται από τα παιχνίδια προσπαθούν να μιμηθούν τους όρους ενός ιδιαίτερου περιβάλλοντος, είτε πραγματικού είτε φανταστικού. Τα παιχνίδια προσομοίωσης (ή εξομοίωσης) προσπαθούν να προσομοιώσουν μια εμπειρία όπως η πλοήγηση ενός αεροσκάφους, όσο πιο ρεαλιστικά γίνεται, λαμβάνοντας υπόψη τους όσο το δυνατόν περισσότερους περιορισμούς του πραγματικού κόσμου. Αρκετά παιχνίδια απλά εξομοιώνουν ρεαλιστικά έναν ιδεατό κόσμο (όπως στο παιχνίδι Sims), ενώ μερικά προσπαθούν να εξομοιώσουν την κατάσταση όπου ο παίκτης παίζει τον ρόλο του Θεού μέσα στο παιχνίδι, δηλαδή δημιουργεί και ελέγχει τα πάντα. Πλέον υπάρχουν και εμπορικοί εξομοιωτές που χρησιμοποιούνται για την πραγματική και ουσιαστική εκπαίδευση ανθρώπων είτε για στρατιωτικούς (όπως εξομοιωτές μαχητικών αεροπλάνων) είτε για πολιτικούς σκοπούς (όπως οι εξομοιωτές τρενών). Υπάρχουν εξομοιωτές κάθε είδους από απλούς εξομοιωτές πτήσης (Microsoft Flight Simulator), πολεμικούς εξομοιωτές (εξομοιωτές τανκ, πλοίων, υποβρυχίων κλπ), διαστημικών αποστολών, τρενών, καθώς και οικονομικών καταστάσεων, όπου ο παίκτης προσπαθεί να φτιάξει μία δικιά του οικονομική αυτοκρατορία.

Ένας μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων που πωλούνται ως παιχνίδια βρίσκονται πολύ κοντά στις δραστοστρεφείς κοινωνικές προσομοιώσεις (agent based modelling). Για παράδειγμα, στο παιχνίδι SimCity του Maxis, ο χρήστης παίζει το ρόλο ενός δημάρχου, ο οποίος μπορεί να μεταβάλλει τους φόρους καθώς και άλλες παραμέτρους και να κυβερνήσει έτσι μια εικονική πόλη ή να πειραματιστεί και να διερευνήσει τις συνέπειες των πολιτικών και οικονομικών του αποφάσεων. Αυτός ο προσομοιωτής πόλης (city simulator) μπορεί να χρησιμοποιείται σαν ένα παιχνίδι, στο παρελθόν όμως, πριν την κατασκευή εξειδικευμένων μοντέλων για ερευνητικούς σκοπούς, αποτέλεσε και ο ίδιος εργαλείο κοινωνικής έρευνας.

Η περιληπτική αυτή παρουσίαση κάποιων εφαρμογών της μεθόδου της προσομοίωσης δεν εξαντλεί ούτε την ποικιλία ούτε τις δυνατότητες της μεθόδου στο σύνολο των επιστημονικών κλάδων. Στη συνέχεια θα γίνει παρουσίαση των ομοιοτήτων

και των διαφορών των στατιστικών μοντέλων και των μοντέλων προσομοίωσης καθώς και αναλυτική περιγραφή της μεθόδου της δραστοστρεφούς μοντελοποίησης (agent based modeling).

1.3. Στατιστικά Μοντέλα και Μοντέλα Προσομοίωσης

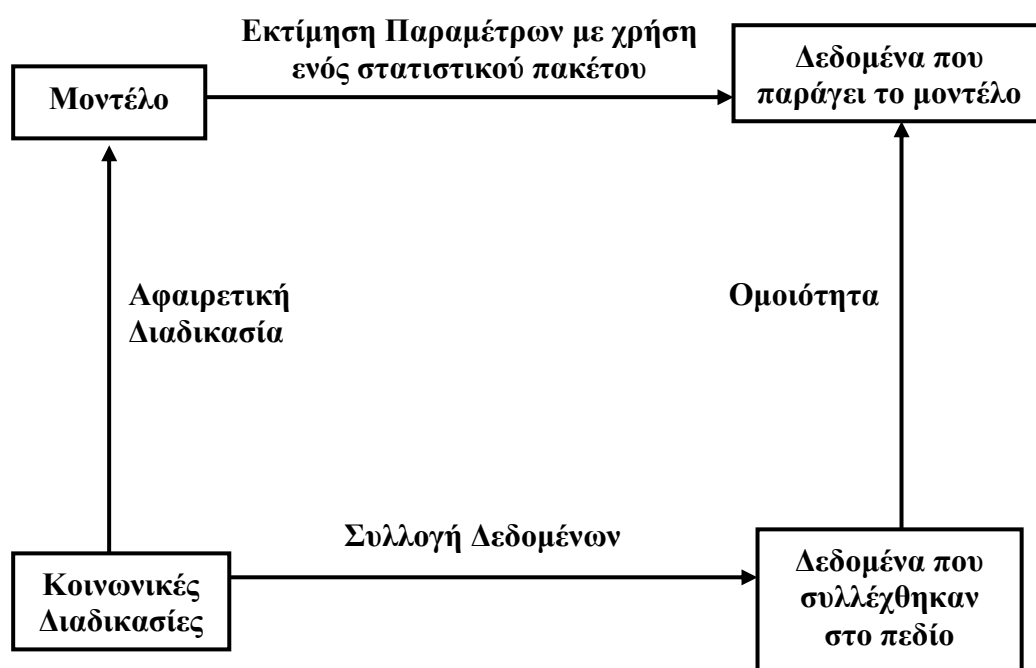
Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούμε διεξοδικά στη διαφορά στατιστικών μοντέλων και μοντέλων προσομοίωσης. Η επιστημονική μοντελοποίηση είναι η διαδικασία κατασκευής αφηρημένων μοντέλων. Η επιστήμη διαθέτει σήμερα μια μεγάλη συλλογή μεθόδων, τεχνικών και θεωριών για όλα τα είδη της επιστημονικής μοντελοποίησης. Κάποια γενική θεωρία προσφέρεται από τη φιλοσοφία της επιστήμης και τη θεωρία συστημάτων.

Η μοντελοποίηση αναφέρεται στη διαδικασία κατασκευής ενός μοντέλου ως εννοιολογική αναπαράσταση ενός φαινομένου. Η επιστημονική δραστηριότητα συνίσταται σε μεγάλο βαθμό στη δημιουργία μοντέλων των φαινομένων και των αντικειμένων τα οποία μελετά. Ένα μοντέλο αναφέρεται μόνο σε μερικές πτυχές του φαινομένου που αναπαριστά και δύο μοντέλα του ίδιου φαινομένου μπορούν να είναι ουσιαστικά διαφορετικά. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στις διαφορετικές απαιτήσεις των τελικών χρηστών του μοντέλου είτε σε εννοιολογικές είτε απλώς σε αισθητικές διαφορές των κατασκευαστών του είτε ακόμη και σε αποφάσεις που λαμβάνονται κατά τη διαδικασία κατασκευής του μοντέλου. Τα μοντέλα αυτά μπορεί να είναι φορμαλιστικά (όπως στη φυσική με τα μαθηματικά μοντέλα) ή να παρέχουν μια απλή και πρακτική αναπαράσταση (όπως στη βιολογία) ή να αναπαριστούν ένα δυναμικό κοινωνικό φαινόμενο, ώστε να διερευνηθεί ο μηχανισμός που κρύβεται πίσω από αυτό.

Ο στόχος κάθε μοντελοποίησης είναι κάποιο φαινόμενο του «πραγματικού» κόσμου. Στη συνέχεια δημιουργείται ένα μοντέλο αυτού του φαινομένου, το οποίο είναι πάντα πιο απλό από το ίδιο το φαινόμενο. Ένα μοντέλο, ως μια φορμαλιστική αναπαράσταση ενός προβλήματος, μιας διαδικασίας, μιας ιδέας ή ενός συστήματος δεν είναι ποτέ ένα ακριβές αντίγραφο αλλά αναπαριστά κάποια ή κάποιες πτυχές της δομής, των ιδιοτήτων ή της συμπεριφοράς του στόχου (Gilbert & Troitzsch, 2005/1999) και μπορεί να πάρει διάφορες μορφές, όπως διαγράμματα, μαθηματικούς τύπους, φυσικές κατασκευές, σύνολα λογικών καταστάσεων ή ακόμη και προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ένα μοντέλο αποτελείται από μια συλλογή οντοτήτων που έχουν σαφώς προκαθορισμένες ιδιότητες και μπορούν να συσχετιστούν μεταξύ τους με καλώς

προσδιορισμένους κανόνες ή σχέσεις. Σκοπός του μοντέλου είναι να προσομοιώσει με ακρίβεια τις ουσιαστικές πτυχές ενός συγκεκριμένου χώρου της πραγματικότητας. Οι κοινωνικές επιστήμες, για παράδειγμα, χρησιμοποιούν στατιστικά μοντέλα για να προβλέψουν μελλοντικές τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών.

Ειδικότερα για τις κοινωνικές επιστήμες, ο στόχος είναι πάντοτε μια δυναμική οντότητα που μεταβάλλεται ως προς το χρόνο, έχει δομή και συμπεριφορά και αντιδρά στο περιβάλλον της. Κατά συνέπεια και το μοντέλο θα πρέπει να είναι δυναμικό. Κατά τον Gilbert (1993), όσον αφορά στα στατιστικά μοντέλα, η σχέση μεταξύ του μοντέλου και του στόχου μπορεί να παρασταθεί στο σχήμα 1.2.

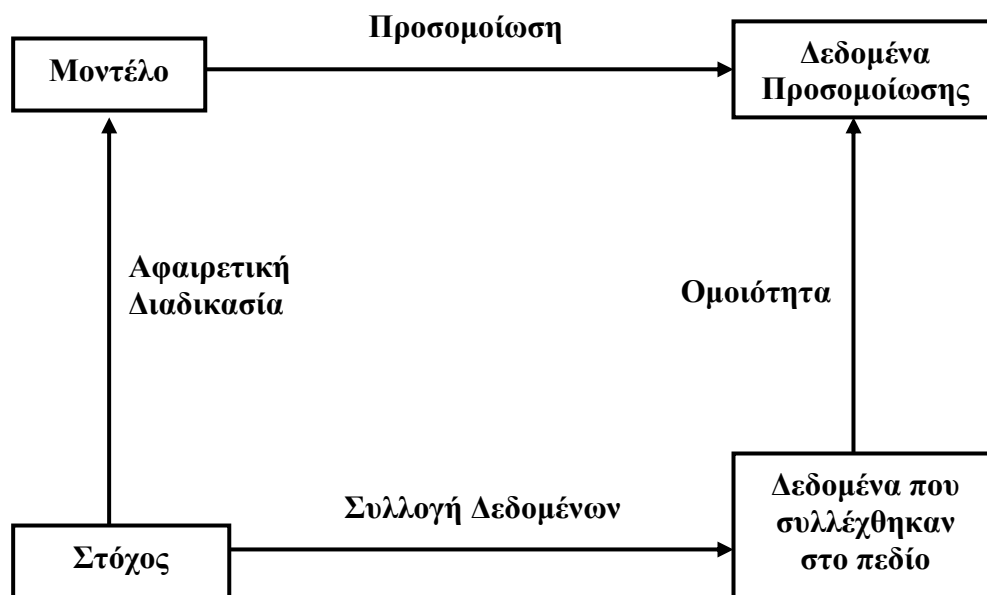


Σχήμα 1.2: Η λογική της μεθόδου του στατιστικού μοντέλου (τροποποίηση από Gilbert, 1993).

Ο ερευνητής αναπτύσσει ένα μοντέλο, για παράδειγμα ένα σύνολο εξισώσεων, για να αναπαραστήσει την κοινωνική διαδικασία που έχει θέσει ως στόχο. Οι εξισώσεις αυτές περιλαμβάνουν και ένα σύνολο παραμέτρων, η τιμή των οποίων καθορίζεται συνήθως με τη χρήση ενός στατιστικού πακέτου. Μαζί με την κατασκευή του μοντέλου, ο ερευνητής έχει συγκεντρώσει δεδομένα με τα οποία θα διενεργήσει τη ζητούμενη εκτίμηση των παραμέτρων, για παράδειγμα εμπειρικών δεδομένων (survey data), των μεταβλητών που περιλαμβάνονται στις εξισώσεις. Η ανάλυση περιλαμβάνει δύο βήματα. Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει την παραγωγή των δεδομένων του μοντέλου, την

πραγματοποιηθείσα πρόβλεψη δηλαδή και τη σύγκριση με τα δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί από το πεδίο (έλεγχος της στατιστικής υπόθεσης). Το δεύτερο βήμα περιλαμβάνει την εκτίμηση του μεγέθους των παραμέτρων του μοντέλου.

Παρόμοια είναι και η λογική της μεθόδου της προσομοίωσης (Gilbert, 1993), που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3: Η λογική της μεθόδου της προσομοίωσης (τροποποίηση από Gilbert, 1993).

Στην περίπτωση αυτή ο ερευνητής αναπτύσσει και πάλι ένα μοντέλο που επιχειρεί να αναπαραστήσει ένα κοινωνικό φαινόμενο. Το μοντέλο αυτό όμως έχει τη μορφή ενός προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή κι όχι μιας στατιστικής εξίσωσης. Τρέχοντας το πρόγραμμα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή παράγονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα οποία συγκρίνονται με τα δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί από το πεδίο.

Τόσο τα στατιστικά όσο και τα μοντέλα προσομοίωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξήγηση κοινωνικών φαινομένων και για την πρόβλεψή τους. Μολονότι άλλα στατιστικά μοντέλα ή μοντέλα προσομοίωσης δίνουν έμφαση στην ερμηνεία και άλλα στην πρόβλεψη, όλες οι προσομοιώσεις στοχεύουν και στα δύο, τουλάχιστον ως ένα βαθμό.

Παρά τις μεγάλες ομοιότητες ανάμεσα σ' αυτά τα δύο είδη μοντέλων υπάρχουν και αξιοσημείωτες διαφορές. Τα μοντέλα προσομοίωσης διερευνούν κυρίως διαδικασίες, ενώ τα στατιστικά μοντέλα συνήθως στοχεύουν στην εξήγηση των σχέσεων μεταξύ των

ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Αναμένουμε από τα μοντέλα προσομοίωσης συγκεκριμένες αναπαραστάσεις των κοινωνικών διαδικασιών ενώ ένα στατιστικό μοντέλο θα αναπαράγει τη σχέση μεταξύ των μεταβλητών αλλά σπάνια θα μοντελοποιήσει το μηχανισμό που κρύβεται πίσω από αυτή τη σχέση (Gilbert and Troitzsch, 2005/1999).

Δεν υπάρχει μια ορισμένη μέθοδος σύμφωνα με την οποία πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Οι περισσότερες έρευνες πάντως προχωρούν σύμφωνα με τα εξής στάδια: διατύπωση του προβλήματος, ανάπτυξη του μοντέλου της προσομοίωσης, «τρέξιμο» του μοντέλου σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και ανάλυση των αποτελεσμάτων. Για τη μελέτη ενός συστήματος, εκτός από την ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης, απαιτείται ο προσδιορισμός των παραμέτρων του (δεδομένα του προβλήματος) και, μετά την εκτέλεσή του πειράματος, η ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Πώς όμως μπορεί ο κατασκευαστής του μοντέλου να είναι σίγουρος ότι το μοντέλο λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο όπως το (πραγματικό) σύστημα; Τέτοια ερωτήματα απαντώνται χρησιμοποιώντας εργαλεία της στατιστικής. Οι στατιστικές επαγωγικές μέθοδοι επιτρέπουν τη σύγκριση των διάφορων ανταγωνιστικών συστημάτων ή των εναλλακτικών λύσεων. Παραδείγματος χάριν, με την εκτιμητική και τον έλεγχο υποθέσεων γίνεται δυνατό εξεταστούν και να διερευνηθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και να συγκριθούν τα διάφορα μετρικά συστήματα.

Για τη δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης είναι απαραίτητη η επιβεβαίωση του γεγονότος ότι το μοντέλο είναι αρκετά ακριβές. Αυτό περιλαμβάνει δύο αποφάσεις: τα συμπεράσματα των αναλυτών και την αποδοχή ή απόρριψη των συμπερασμάτων του μοντέλου από τους χρήστες του. Τα πιο σημαντικά βήματα στην οικοδόμηση ενός μοντέλου προσομοίωσης είναι η επαλήθευση, η επικύρωση και η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου. Η *επαλήθευση (verification)* αναφέρεται στην αντιστοιχία ανάμεσα σε διαφορετικά μοντέλα του ίδιου συστήματος και εξετάζει εάν το πρόγραμμα κάνει αυτό που υποθέτει ότι κάνει ο κατασκευαστής του μοντέλου. Η *επικύρωση (validation)* σημαίνει εάν το φαινόμενο ενδιαφέροντος περιγράφεται σωστά από το μοντέλο της προσομοίωσης και αναφέρεται στην αντιστοιχία του μοντέλου προσομοίωσης με το πραγματικό σύστημα. Στην επικύρωση του μοντέλου, τα δεδομένα του συστήματος στόχου, που αφορούν το προς διερεύνηση φαινόμενο, συγκρίνονται με τα δεδομένα που παράγονται από το μοντέλο προσομοίωσης. Πιθανή απόκλιση μεταξύ των εμπειρικών δεδομένων και των δεδομένων που παράγει η προσομοίωση μπορεί να οφείλεται σε λάθος εκτίμηση των τιμών κάποιων παραμέτρων. Τέλος, κατά τη διεξαγωγή

της *ανάλυσης ευαισθησίας (sensitivity analysis)* γίνεται έλεγχος στη διαφορά των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης που οφείλεται σε μικρές αλλαγές στις αρχικές συνθήκες ή στις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου.

1.4. Η Δραστοστρεφή Μοντελοποίηση

1.4.1. Η Θεωρία της Πολυπλοκότητας

Σύμφωνα με μια επιστημονική άποψη, ο κόσμος που ζούμε μπορεί να γίνει κατανοητός σε μια στρωματοποιημένη δομή με πολλά επίπεδα (Laszlo, 1996). Μονάδες από οποιοδήποτε επίπεδο σχηματίζουν, παράγουν ή αποτελούν μέρος από τις οντότητες που αποτελούν το επόμενο επίπεδο. Τα πιο προφανή παραδείγματα που θα μπορούσαμε να αναφέρουμε, είναι τα άτομα της ύλης που σχηματίζουν μόρια, απλά ή πολύπλοκα, και τα μόρια από τα οποία αποτελούνται όλα τα υλικά αντικείμενα του σύμπαντος. Τα πολύπλοκα οργανικά μόρια σχηματίζουν κύτταρα, τα κύτταρα σχηματίζουν ιστούς και οργανισμούς και οι ζωντανοί οργανισμοί σχηματίζουν οικοσυστήματα. Οι άνθρωποι ακόμη σχηματίζουν ομάδες, κοινωνίες και πολιτισμούς. Ο παραπάνω σχηματικός κατάλογος των παραδειγμάτων σε καμιά περίπτωση δεν εξαντλεί τον πλούτο και την ποικιλία των περιπτώσεων. Η προηγούμενη παράθεση δίπλα δίπλα των ανθρώπινων κοινωνιών και των ενώσεων της ανόργανης ύλης δε σημαίνει ότι τα φαινόμενα αυτά μελετούνται με την ίδια μέθοδο, ούτε παραγνωρίζει ότι εκτός από τις ομοιότητες που παρουσιάζουν δεν εμφανίζουν και θεμελιώδεις διαφορές. Αντιθέτως χρησιμεύει, προσωρινά και μόνο, στην διασαφήνιση κάποιων εισαγωγικών βασικών εννοιών.

Οι οντότητες οποιουδήποτε επιπέδου δεν αποτελούνται απλώς από το άθροισμα των οντοτήτων του κατώτερου επιπέδου, αλλά αποτελούν πολύπλοκες και αλληλεξαρτώμενες ενώσεις που παρουσιάζουν νέα χαρακτηριστικά και κανονικότητες. Σύμφωνα με τον Waldrop (1992), οι «παραδοσιακοί» επιστημονικοί κλάδοι, αδυνατούν να περιγράψουν και να ερμηνεύσουν τους μηχανισμούς με τους οποίους οποιεσδήποτε απλές οντότητες αυτοοργανώνονται σε περισσότερο πολύπλοκες δομές. Ένας σχετικά νέος επιστημονικός κλάδος, η *επιστήμη της πολυπλοκότητας (science of complexity)* ή αλλιώς *θεωρία της πολυπλοκότητας (theory of complexity)* ή απλά πολυπλοκότητα, φιλοδοξεί να αντιμετωπίσει με αποτελεσματικότερο τρόπο τα προαναφερθέντα φαινόμενα. Ο όρος πολυπλοκότητα είναι ένας πολύ γενικός όρος, που δεν αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη θεωρία, αλλά είναι διεπιστημονικός και συμπεριλαμβάνει την επιστήμη του χάους (θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο τέταρτο κεφάλαιο της διατριβής),

των μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων, της τεχνητής νοημοσύνης, των κυψελοειδών αυτομάτων, των νευρωνικών δικτύων καθώς και των δραστοστρεφών μοντέλων προσομοίωσης (Sprott, 2003).

Η θεωρία της πολυπλοκότητας μελετά τα *πολύπλοκα προσαρμοστικά συστήματα* (*complex adaptive systems*), δυναμικά συστήματα που αποτελούνται από πολλά απλά αλληλεπιδρώντα μέρη που έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται στο περιβάλλον τους. Ο όρος αυτός εισήχθηκε στο Ινστιτούτο του Santa Fe από τους John Holland και Murray Gell-Mann και χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα νέο ακαδημαϊκό χώρο που ασχολείται με τη μελέτη αυτών των συστημάτων. Ο κύριος σκοπός της επιστήμης της πολυπλοκότητας είναι να ερμηνεύσει πως από τις τοπικές, μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις πολλών οντοτήτων ενός επιπέδου προκύπτουν νέες σταθερές οργανωμένες οντότητες σε ένα υψηλότερο επίπεδο. Οι μη γραμμικές αυτές αλληλεπιδράσεις δε γίνεται, στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, να παρασταθούν από μαθηματικές εξισώσεις και να επιλυθούν αναλυτικά, γι' αυτό και μελετώνται με τη *μέθοδο της προσομοίωσης* σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι προσομοιώσεις αυτές καθορίζουν τους κανόνες συμπεριφοράς και αλληλεπίδρασης των οντοτήτων του κατώτερου επιπέδου και διερευνούν τις συνέπειες στο επίπεδο του συνολικού πληθυσμού. Οι αυτόνομες οντότητες του κατώτερου επιπέδου ονομάζονται *πράκτορες* ή *δράστες* (*agents*) και η προσομοίωσή τους αυτού του είδους *δραστοστρεφείς προσομοιώσεις* (*agent-based simulations*) ή *πολυπρακτορικές προσομοιώσεις* (*multi-agent simulations*). Ο Dooley (1997) έχει περιγράψει την εξέλιξη των πολύπλοκων προσαρμοστικών συστημάτων με έναν τρόπο που προσομοιάζει με αυτή των δραστοστρεφών μοντέλων των κοινωνικών προσομοιώσεων. Αναφέρει ότι τα πολύπλοκα προσαρμοστικά συστήματα συμπεριφέρονται και εξελίσσονται σύμφωνα με τρεις βασικές αρχές: η τάξη και η αυτοοργάνωση αναδύεται (*emerges*) και δεν είναι προκαθορισμένη από τα συστατικά στοιχεία του συστήματος, η *εξέλιξη του συστήματος είναι μη αντιστρεπτή* (*irreversible*) και το μέλλον των συστημάτων αυτών είναι συχνά μη προβλέψιμο. Για τις έννοιες της ανάδυσης και της μη αντιστρεπτής εξέλιξης του συστήματος θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στη συνέχεια. Σύμφωνα με τα ανωτέρω, τα δραστοστρεφή μοντέλα χαρακτηρίζονται από τα ίδια κρίσιμα χαρακτηριστικά των σύνθετων προσαρμοστικών συστημάτων, της αναδυόμενης συμπεριφοράς, της μη αντιστρεψιμότητας και της μη προβλεψιμότητας.

1.4.2. Αντικειμενοστραφής Προγραμματισμός και Κατανεμημένα Συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης

Πριν αναφερθούμε διεξοδικά στα δραστοστρεφή μοντέλα των κοινωνικών προσομοιώσεων θα αναφερθούμε επιγραμματικά στους προδρόμους των μοντέλων αυτών. Η εξέλιξη της επιστήμης των υπολογιστών που επέτρεψε την κατασκευή και την ανάπτυξη του κλάδου των δραστοστρεφών μοντέλων, τα οποία προέκυψαν μετά την εξέλιξη του αντικειμενοστραφή προγραμματισμού και στη συνέχεια των κατανεμημένων συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης. Στον *αντικειμενοστραφή προγραμματισμό (object-oriented programming)*, ένα *αντικείμενο (object)* είναι μια ενιαία υπολογιστική διαδικασία, ένα λειτουργούν πρόγραμμα, που διατηρεί τις δομές δεδομένων του και τις διαδικασίες του. Τα αντικείμενα επικοινωνούν το ένα με το άλλο μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων. Κάθε αντικείμενο έχει ορίσει ένα σύνολο μηνυμάτων, τα οποία είναι σε θέση να λάβει και να απαντήσει. Όταν ένα τέτοιο μήνυμα φθάνει σε ένα αντικείμενο, εκτελείται η αντίστοιχη διαδικασία, η οποία αποκαλείται "μέθοδος".

Γύρω στο 1990, οι ερευνητές στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης είχαν αρχίσει να χρησιμοποιούν τον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό για να χτίσουν *κατανεμημένα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης (distributed artificial intelligence systems)* (O'Hare & Jennings, 1996). Η *τεχνητή νοημοσύνη (artificial intelligence)* είναι ο τομέας της επιστήμης των υπολογιστών, που ασχολείται με τη σχεδίαση ευφών υπολογιστικών συστημάτων, δηλαδή συστημάτων που επιδεικνύουν χαρακτηριστικά που σχετίζουμε με τη νοημοσύνη στην ανθρώπινη συμπεριφορά. Η *κατανεμημένη τεχνητή νοημοσύνη* αποτελεί ένα επιμέρους κλάδο της έρευνας της τεχνητής νοημοσύνης που αφιερώνεται στην ανάπτυξη κατανεμημένων λύσεων για τα σύνθετα προβλήματα όπου απαιτείται η ύπαρξη νοημοσύνης. Ενώ τα αντικείμενα στον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό ήταν συνήθως απλά προγράμματα, κάθε αντικείμενο ή αλλιώς *συνιστώσα (component)* των συστημάτων κατανεμημένης τεχνητής νοημοσύνης περιείχε εξαιρετικά πολύπλοκο λογισμικό για να αντιπροσωπεύσει την ευφυή συμπεριφορά. Επίσης, αντίθετα από τα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης της δεκαετίας του '70 και της δεκαετίας του '80, που εστίαζαν σε μεμονωμένα αντικείμενα, στα κατανεμημένα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης η αλληλεπίδραση των αντικειμένων ήταν μια ουσιαστική πτυχή της νοημοσύνης κάθε αντικειμένου και της γενικότερης συμπεριφοράς του συστήματος. Στα περισσότερα συστήματα, οι μεμονωμένες μονάδες επεξεργασίας δεν ήταν αυτόνομες, αντ' αυτού οι μονάδες οργανώνοντας ιεραρχικά γύρω από μια ενιαία κεντρική μονάδα

(Conte, Gilbert & Sichman, 1998). Βαθμιαία, οι ερευνητές άρχισαν να πειραματίζονται με αποκεντρωμένα συστήματα, σχεδιάζοντας συστήματα χωρίς οποιαδήποτε κεντρική μονάδα, όπου κάθε αντικείμενο του συστήματος διαθέτει αυτονομία. Τα συστήματα αυτά είναι αυτοοργανώμενες (self-organized) οντότητες που αποτελούνται από ένα συνήθως μεγάλο αριθμό από μεμονωμένα στοιχεία που συμπεριφέρονται βάσει των συχνά πολύ απλών κανόνων. Σήμερα, τα κατανεμημένα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης έχουν αντικατασταθεί κατά ένα μεγάλο μέρος από τα δραστοστρεφή μοντέλα προσομοίωσης.

1.4.3. Οι Δραστοστρεφείς Προσομοιώσεις για τις Κοινωνικές Επιστήμες

Οι *δραστοστρεφείς προσομοιώσεις (agent-based simulations)* και τα *δραστοστρεφή μοντέλα (agent-based models)* είναι μια νέα τεχνολογία προσομοίωσης σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές που χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για την περιγραφή και τη διερεύνηση των κοινωνικών φαινομένων. Η βασική ιδέα είναι η κατασκευή ενός αριθμού πρακτόρων που διαθέτουν κάποιες ιδιότητες και ακολουθούν συγκεκριμένους κανόνες συμπεριφοράς και αλληλεπίδρασης και στη συνέχεια το «τρέξιμο» της προσομοίωσης, τα τελευταία χρόνια αποκλειστικά σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μολονότι δεν ήταν πάντα έτσι κατά τα πρώτα βήματα του κλάδου, όπου όλοι οι πράκτορες αλληλεπιδρούν παράλληλα.

Σύμφωνα με τον Epstein (1999) τα δραστοστρεφή μοντέλα των κοινωνικών προσομοιώσεων χαρακτηρίζονται από πέντε βασικές ιδιότητες, ετερογένεια, αυτονομία, καθορισμένο χώρο, τοπικές αλληλεπιδράσεις και περιορισμένη ορθολογιστική ικανότητα. Η *ετερογένεια (heterogeneity)* αναφέρεται στο γεγονός ότι οι πράκτορες διαφέρουν ως προς τις προτιμήσεις τους ή τους κανόνες που καθορίζουν τη συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και πολλές φορές έχει αναπάντεχα αποτελέσματα στο μακρο επίπεδο. Η ετερογένεια χρησιμοποιείται, όχι μόνο για να μιμηθεί την ανθρώπινη επιθυμία, αλλά χρησιμεύει και στη δημιουργία μοναδικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των πρακτόρων. Η έννοια των *αυτονομίας (autonomy)* των πρακτόρων σημαίνει ότι ο έλεγχος ή η επιβολή κάποιας τάξης δεν επιβάλλεται άνωθεν (top down) στο μοντέλο και ότι οι περιορισμοί μπορεί να υπάρξουν μόνο στους κανόνες που ακολουθούν οι πράκτορες στο ατομικό μικρο επίπεδο και όχι στο συλλογικό μακρο επίπεδο. Η εξέλιξη και η αλλαγή προκύπτουν από τις τοπικές αλληλεπιδράσεις και το μικρο επίπεδο προς το μακρο και όχι αντίστροφα. Η τρίτη ιδιότητα των δραστοστρεφών

μοντέλων, κατά τον Epstein αναφέρεται στο γεγονός ότι η τεχνητή κοινωνία λαμβάνει χώρα σε ένα *αυστηρά καθορισμένο χώρο (explicit space)*, που συνήθως είναι ένα ν-διάστατο κυψελοειδές αυτόματο. Τα δραστοστρεφή μοντέλα των κοινωνικών προσομοιώσεων χαρακτηρίζονται ακόμη και από τις *τοπικές αλληλεπιδράσεις (local interactions)* μεταξύ των πρακτόρων. Αυτό σημαίνει ότι οι πράκτορες αλληλεπιδρούν με γειτονικούς πράκτορες και όχι απομακρυσμένους. Η έννοια των τοπικών αλληλεπιδράσεων ενισχύει έτσι την ομοιότητα της προσομοίωσης με τις «πραγματικές» ανθρώπινες αλληλεπιδράσεις μέσα σε καθορισμένο γεωγραφικό ή πολιτιστικό χώρο. Τέλος, οι πράκτορες των υπόκεινται στην *περιορισμένη ορθολογική ικανότητα (bounded rationality)*, ακολουθούν δηλαδή απλούς κανόνες και αποκρίνονται στις τοπικές πληροφορίες που παράγονται από την επαφή τους με άλλους πράκτορες. Οι κοινωνικές προσομοιώσεις που βασίζονται στη δραστοστρεφή μοντελοποίηση υποθέτουν την ύπαρξη ορίων στην ορθολογιστική ικανότητα των ατόμων, γεγονός που υποστηρίζεται από τις πρόσφατες έρευνες στο χώρο της γνωστικής ψυχολογίας (Elliott & Kiel, 2004).

Στη συνέχεια της διατριβής θα χρησιμοποιούμε τους όρους *δραστοστρεφείς προσομοιώσεις και δραστοστρεφή μοντέλα* χωρίς να δηλώνουμε κάποια διαφορά μεταξύ τους, παρότι ο όρος μοντέλο συνήθως δηλώνει οποιαδήποτε αναπαράσταση της πραγματικότητας, ενώ ο όρος προσομοίωση δηλώνει πως εξελίσσεται το μοντέλο στο χρόνο ή την πρακτική εφαρμογή ενός μοντέλου με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Υπάρχει ακόμη ο όρος *πολύ-πρακτορικά συστήματα (multiagent systems)* χωρίς κάποια σαφής διάκριση με τους προαναφερθέντες όρους. Ένας ακόμη όρος που χρησιμοποιείται για τα δραστοστρεφή μοντέλα, όταν αυτά έχουν εφαρμογή στις κοινωνικές επιστήμες, είναι ο όρος *τεχνητές κοινωνίες (artificial societies)*, κι αυτό γιατί τα δραστοστρεφή μοντέλα, αν και πολλές φορές έχουν αξιοσημείωτες διαφορές στις εφαρμογές και στον τρόπο προσέγγισης των φαινομένων που διερευνούν, προσπαθούν γενικά να δημιουργήσουν *μικρόκοσμους (micro worlds)* ή *δυνάμει κόσμους (would-be worlds)* μέσα σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, με στόχο τη διερεύνηση του μηχανισμού με τον οποίο οι αλληλεπιδράσεις και οι ποικίλες συμπεριφορές αυτόνομων πρακτόρων παράγουν δομή και αυτό-οργάνωση (Casti, 1997).

Για τις αυτόνομες οντότητες των δραστοστρεφών μοντέλων χρησιμοποιείται ο όρος *πράκτορας (agent)* ή *δράστης*. Οι δύο αυτοί όροι ταυτίζονται στα πλαίσια της *δραστοστρεφούς μοντελοποίησης*, ο όρος δράστης όμως δε φέρει τις ίδιες συμπαραδηλώσεις (connotations) στα πλαίσια της κοινωνικής θεωρίας. Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τον όρο πράκτορας στο πλαίσιο της δραστοστρεφούς μοντελοποίησης.

Μολονότι δεν υπάρχει ομοφωνία για τον ακριβή ορισμό του *πράκτορα*, οι διάφοροι ορισμοί που έχουν προταθεί τείνουν να συμφωνούν σε περισσότερα σημεία παρά να διαφωνούν. Αρκετοί ερευνητές, δίνοντας έμφαση στην εξέλιξη των δραστοστρεφών μοντέλων από τα κατανεμημένα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης, θεωρούν ότι οποιοσδήποτε τύπος ανεξάρτητης συνιστώσας (component) ενός μοντέλου ή κάποιας ενιαίας μονάδα προγραμματισμού (software), μπορεί να θεωρηθεί ως πράκτορας (Bonabeau, 2001). Η συμπεριφορά μιας ανεξάρτητης συνιστώσας μπορεί να ποικίλει από απλούς κανόνες αντίδρασης μέχρι το επίπεδο περίπλοκης νοημοσύνης, η οποία διαθέτει την ικανότητα να προσαρμόζεται στο περιβάλλον. Άλλοι ερευνητές πιστεύουν ότι η συμπεριφορά μιας συνιστώσας πρέπει να έχει την ικανότητα της προσαρμογής (adaptation) στο περιβάλλον για να θεωρηθεί πράκτορας (Mellouli et al, 2003), δηλαδή μόνο οι συνιστώσες του μοντέλου που έχουν την ικανότητα να μαθαίνουν, υπό κάποια έννοια, από το περιβάλλον και να προσαρμόζουν ανάλογα τη συμπεριφορά τους μπορούν να αποκαλούνται πράκτορες. Ο Casti (1997) υποστηρίζει ότι οι πράκτορες θα πρέπει να έχουν κανόνες συμπεριφοράς που να ανήκουν σε δύο επίπεδα, δηλαδή απλούς κανόνες συμπεριφοράς αλλά και υψηλότερου επιπέδου κανόνες, σύμφωνα με τους οποίους να μπορούν να τροποποιούν τους κανόνες συμπεριφοράς τους, δηλαδή κανόνες προσαρμογής ως αντίδραση στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Ο ορισμός του όρου από τον Jennings (2000), στα πλαίσια της επιστήμης των πληροφορικής, δίνει έμφαση στα χαρακτηριστικά της αυτόνομης συμπεριφοράς των πρακτόρων. Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό, η σημαντικότερη ιδιότητα μιας συνιστώσας του μοντέλου, για να δικαιούται το χαρακτηρισμό πράκτορας, είναι η δυνατότητα να παίρνει ανεξάρτητες αποφάσεις και άρα να έχει μια ενεργή και όχι παθητική στάση. Γενικώς οι πράκτορες έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (Macal & North, 2005).

Μια πράκτορας² είναι μια οντότητα με ένα σύνολο χαρακτηριστικών και κανόνων που καθορίζουν τη συμπεριφορά της καθώς την ικανότητα λήψης αποφάσεων. Η οντότητα αυτή είναι διακριτή και έχει όρια, έτσι ώστε να είναι ξεκάθαρο αν κάτι είναι μέρος της πράκτορας, δεν είναι μέρος της πράκτορας ή είναι ένα κοινό χαρακτηριστικό.

Μια πράκτορας είναι τοποθετημένη σε ένα περιβάλλον και αλληλεπιδρά με άλλες πράκτορες. Οι πράκτορες έχουν πρωτόκολλα για τις αλληλεπιδράσεις καθώς και την ικανότητα να αντιδρούν στο περιβάλλον τους. Έχουν επίσης την ικανότητα να αναγνωρίζουν και να διαχωρίζουν τα χαρακτηριστικά των άλλων πρακτόρων.

² Οι πράκτορες δεν έχουν φύλο.

Οι πράκτορες έχουν στόχους να επιτύχουν, όχι όμως απαραίτητα να μεγιστοποιήσουν, σε σχέση με το περιβάλλον τους.

Κάθε πράκτορας είναι αυτόνομη και αυτοκαθοδηγούμενη. Μπορεί να δρα ανεξάρτητα μέσα στο περιβάλλον και να αλληλεπιδρά με τις άλλες πράκτορες, τουλάχιστον σε κάποιες συγκεκριμένες καταστάσεις. Τα δραστοστρεφή μοντέλα αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό αυτόνομων πρακτόρων, οι οποίες μπορούν να ενεργήσουν χωρίς την επέμβαση των ανθρώπων ή άλλων συστημάτων, σύμφωνα πάντα με τους κανόνες που έχει θέσει ο κατασκευαστής του μοντέλου. Επειδή όμως τα περιβάλλοντα αλλάζουν συνεχώς και δεν είναι πλήρως γνωστά στις πράκτορες, οι τελευταίες δεν έχουν την πλήρη γνώση του περιβάλλοντος κάθε χρονική στιγμή. Κατά συνέπεια, η ίδια δράση διενεργηθείσα δύο φορές (σε δύο περιβάλλοντα που φαίνονται ίδια στην πράκτορα), μπορεί να έχει διαφορετικά αποτελέσματα, λόγω διαφορών στα δύο περιβάλλοντα που δεν γίνονται αντιληπτές στις δράστες. Μπορεί μάλιστα η δράση ενός πράκτορα να αποτύχει να έχει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Τέλος, κάποιες πράκτορες έχουν την ευελιξία και την ικανότητα να μαθαίνουν και να προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους στην πάροδο του χρόνου βασιζόμενοι στην εμπειρία τους. Αυτό απαιτεί την ύπαρξη ενός είδους μνήμης. Μια πράκτορας μπορεί ακόμη να έχει κανόνες για να τροποποιεί τους κανόνες της συμπεριφοράς της.

Σύμφωνα με τους Gilbert & Troitzsch (2005/1999), υπάρχουν μια σειρά λόγων που οι προσομοιώσεις είναι καταλληλότερες από τα μαθηματικά για την τυποποίηση των κοινωνικών θεωριών. Οι γλώσσες προγραμματισμού είναι πιο συγκεκριμένες στην έκφραση των υποθέσεων μιας κοινωνικής θεωρίας και λιγότερο αφηρημένες από τις μαθηματικές τεχνικές. Τα προγράμματα ακόμη είναι καταλληλότερα για τη μοντελοποίηση παράλληλων διαδικασιών ή διαδικασιών χωρίς καλά ορισμένη χρονική αλληλουχία από τις μαθηματικές εξισώσεις. Τα προγράμματα είναι ευκολότερο να τροποποιηθούν μόνο εν μέρη, δηλαδή μόνο σε ένα μικρό τμήμα τους, ενώ τα υπόλοιπα τμήματα να μείνουν αναλλοίωτα, ενώ οι μαθηματικές εξισώσεις συνήθως δε διαθέτουν αυτή την ευελιξία. Τέλος, είναι εύκολο να κατασκευαστούν προσομοιώσεις που περιλαμβάνουν ετερογενείς πράκτορες, για παράδειγμα να προσομοιωθούν άτομα με διαφορετικούς κοινωνικούς στόχους, διαφορετικές γνώσεις, διαφορετικές ικανότητες ή διαφορετικούς κανόνες συμπεριφοράς, από ότι να κατασκευαστούν ανάλογα μαθηματικά μοντέλα.

Ένας άλλος βασικός λόγος που οι κοινωνικοί επιστήμονες ενδιαφέρονται και χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο τις προσομοιώσεις σε ηλεκτρονικό υπολογιστή είναι η εξαιρετικά μεγάλη δυνατότητά τους να υποβοηθήσουν την ανακάλυψη, διερεύνηση και τη καλύτερη διατύπωση ή τυποποίηση των υποθέσεων των κοινωνικών θεωριών (Gilbert & Troitzsch, 2005/1999). Οι επιστήμονες μπορούν να κατασκευάσουν απλά μοντέλα που αναπαριστούν μικρές όψεις των υπό διερεύνηση κοινωνικών φαινομένων και στη συνέχεια να ανακαλύψουν τις συνέπειες των θεωριών τους στην τεχνητή κοινωνία που έχουν δημιουργήσει. Για να γίνει αυτό χρειάζεται να βασιστούν σε θεωρίες που έχουν ήδη διατυπωθεί σε συμβατική μορφή, δηλαδή είναι γραμμένες σε μορφή κειμένου, και να τις τυποποιήσουν με τέτοιο τρόπο ώστε να γραφούν σε μορφή προγράμματος που θα τρέχει σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η διαδικασία αυτή, της τυποποίησης, που σημαίνει ότι το περιεχόμενο της θεωρίας γίνεται ακριβές με μαθηματικούς όρους, είναι σαφές, συνεκτικό και χωρίς αντιφάσεις, αποτελεί από μόνη της ένα σημαντικό επιστημονικό κλάδο. Στο πλαίσιο αυτό, οι προσομοιώσεις σε ηλεκτρονικό υπολογιστή έχουν έναν αντίστοιχο ρόλο για τις κοινωνικές επιστήμες με το ρόλο των μαθηματικών για τις φυσικές επιστήμες (Gilbert & Troitzsch, 2005/1999).

O Axtell (2000b) διαχωρίζει τρεις περιπτώσεις χρήσης των δραστοστροφών μοντέλων προσομοίωσης για τις κοινωνικές επιστήμες. Η πρώτη περίπτωση αφορά στις περιπτώσεις για τις οποίες υπάρχουν μαθηματικές εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν ικανοποιητικά κάποιο κοινωνικό φαινόμενο ή διαδικασία. Σε κάποια από αυτά τα δραστοστροφά μοντέλα η μέθοδος της προσομοίωσης χρησιμεύει για να επαληθεύσει απλά γνωστές εκ των προτέρων σχέσεις και αποτελέσματα.

Σε κάποια άλλα μοντέλα εισάγονται στοχαστικά³ στοιχεία, κατά συνέπεια η λύση μέσω προσομοίωσης είναι απλά μία από το σύνολο όλων των δυνατών λύσεων, της οποίας η πιθανότητα να προκύψει ακολουθεί συνήθως μια γνωστή κατανομή. Μια τέτοια περίπτωση είναι η προσομοίωση Monte Carlo, η οποία χρησιμοποιείται σε παραδοσιακά ερευνητικά προβλήματα, που αφορούν διαδικασίες αναμονής, στο πλαίσιο των μοντέλων ουρών. Μια δεύτερη περίπτωση χρήσης των δραστοστροφών μοντέλων περιλαμβάνει την προσομοίωση των φαινομένων στην οποία οι σχετικές μαθηματικές εξισώσεις είναι μόνο μερικώς επιλύσιμες. Σε κάποια από τα προαναφερθέντα φαινόμενα το σύνολο των λύσεων καταλήγει σε ισορροπίες που είναι είτε ασταθείς είτε μη υπολογίσιμες (uncomputable). Στην περίπτωση ύπαρξης πολλαπλών ισορροπιών, η δραστοστροφής

³ τυχαία

μοντελοποίηση αποτελεί ένα σημαντικό ερευνητικό εργαλείο, με την παροχή μέσων για τη διερεύνηση των διαφόρων πορειών που μπορεί να ακολουθεί η εξέλιξη του συστήματος προς τα διάφορα σημεία ισορροπίας, κι αυτό γιατί σε πολλά συστήματα, ακόμη και όταν υπάρχουν σημεία ισορροπίας, η πολυπλοκότητα των αλληλεπιδράσεων μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία πολλών διαφορετικών τροχιών που οδηγούν προς τα σημεία αυτά. Ο αριθμός και το είδος των τροχιών αυτών είναι πολλές φορές σημαντικότερος από τον υπολογισμό αυτών καθ'αυτών των σημείων ισορροπίας (Kiel, 2006).

Η τρίτη χρήση των δραστοστρεφών μοντέλων περιλαμβάνει εκείνες τις περιπτώσεις για τις οποίες δεν υπάρχουν κατάλληλες μαθηματικές εξισώσεις, που να περιγράφουν ικανοποιητικά το φαινόμενο, λόγω της πολυπλοκότητας ή της δυσκολίας που παρουσιάζει. Στις περιπτώσεις αυτές η μέθοδος της δραστοστρεφούς μοντελοποίησης αποτελεί την καταλληλότερη ερευνητική επιλογή, σε κάποιες μάλιστα τη μοναδική διαθέσιμη.

Η δραστοστρεφής μοντελοποίηση αποτελεί όχι μόνο μια νέα προσέγγιση στην κατανόηση ενός ευρέος φάσματος κοινωνικών φαινομένων, αλλά μπορεί επίσης να αποτελέσει ένα πολύτιμο εργαλείο, που να επιτρέψει στους κοινωνικούς ερευνητές να δώσουν απάντηση σε μια σειρά ερωτήματα που αφορούν την κοινωνική, οικονομική και πολιτική δυναμική, στο πλαίσιο των πολύπλοκων συστημάτων, που ειδάλλως θα παρέμενε απρόσιτο, χρησιμοποιώντας μόνο τις παραδοσιακές μεθόδους. Κατά συνέπεια η δραστοστρεφής μοντελοποίηση παρέχει εξαιρετικές δυνατότητες για τους ερευνητές για την μελέτη της μη γραμμικής και συχνά απροσδόκητης συμπεριφοράς των πολύπλοκων συστημάτων, που διαφορετικά ίσως να αποτύγχαναν, εξαιτίας της φύσης των φαινομένων αυτών καθώς και της ακαταλληλότητας των υπολοίπων διαθέσιμων ερευνητικών εργαλείων.

Ένας μεγάλος αριθμός δραστοστρεφών μοντέλων, με πράκτορες που έχουν τις προαναφερθείσες ιδιότητες, έχει εφαρμοστεί τα τελευταία χρόνια σε ένα ευρύ φάσμα κοινωνικών φαινομένων και ερευνητικών ερωτημάτων. Ως παραδείγματα θα μπορούσαμε να αναφέρουμε, χωρίς σε καμιά περίπτωση να εξαντλήσουμε τον πλούτο και την ποικιλία των εφαρμογών που έχουν αναπτυχθεί, το φυλετικό διαχωρισμό (Schelling, 1971), τη δυναμική των μακροοικονομικών διαδικασιών (Brock 1988, Holland 1988), την διασπορά των πολιτισμών (Axelrod, 1997a), την δυναμική εξέλιξη των γνώμων των ατόμων μιας κοινωνίας (Latané & Nowak 1997, Hegselmann & Krause 2002), την πρόωθηση και την άρνηση της συνεργασίας (Axelrod, 1997a), την εκλογική

δυναμική και τις πολιτικές συμμαχίες (Brunk, 2001), την κατάρρευση πολιτικών και κοινωνικών συστημάτων (Tainter, 1998), την πολιτική δυναμική (Bankes, 2002), τη δυναμική των χρηματιστηριακών αγορών (LeBaron, 2002), τη συμπεριφοράς των οργανισμών (Patrick, Dorman, & Marsh, 1999, Prietula, Carley & Gasser 1998), το σχηματισμό συμμαχιών στη διεθνή πολιτική (Cederman, 1997) καθώς και πάρα πολλών άλλων κοινωνικών και οικονομικών φαινομένων.

Για να γίνει σαφής η έκταση και το περιεχόμενο του επιστημονικού χώρου των δραστοστρεφών προσομοιώσεων με εφαρμογή στις κοινωνικές επιστήμες, πριν την παρουσίαση του μοντέλου πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών, θα παρουσιάσουμε, στο 2ο κεφάλαιο δύο δραστοστρεφή μοντέλα που αναπτύχθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και ιστορικά είναι τα πρώτα του είδους και στο 3ο κεφάλαιο τα τρία σημαντικότερα δραστοστρεφή μοντέλα δυναμικής εξέλιξης των γνώμων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΔΡΑΣΤΟΣΤΡΕΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Στο παρόν κεφάλαιο, ως ιστορική εισαγωγή στη δραστοστρεφή μοντελοποίηση, θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση των δύο πρώτων μοντέλων δραστοστρεφούς προσομοίωσης με εφαρμογή στις κοινωνικές επιστήμες. Πρόκειται για το μοντέλο της ντάμας (checkerboard model) του James Sakoda (Sakoda, 1971) και το δυναμικό μοντέλο διαχωρισμού (dynamic model of segregation) του Thomas Schelling (Schelling 1969, 1971, 1978). Τα δύο αυτά μοντέλα, που αποτελούν εφαρμογές των κυψελοειδών αυτομάτων στις κοινωνικές επιστήμες, αναπτύχθηκαν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και κατά την αρχική παρουσίασή τους δεν έγινε η παραμικρή αναφορά στη βιβλιογραφία των κυψελοειδών αυτομάτων ή στη δραστοστρεφή μοντελοποίηση, μιας και ο όρος τότε δεν υπήρχε. Όλοι μάλιστα οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν δίχως τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, παρότι την εποχή εκείνη, στα τέλη της δεκαετίας του 1960, ήταν διαθέσιμος. Τα μοντέλα αυτά επίσης αποτελούν τα πρώτα παραδείγματα δυναμικών συστημάτων στις κοινωνικές επιστήμες με την ιδιότητα της αυτοοργάνωσης (Macy & Willer, 2002). Ο κατασκευαστής του δεύτερου μοντέλου, ο Thomas Schelling, το 2005 τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ για τις οικονομικές επιστήμες, από κοινού με τον Robert Aumann, για τη γενικότερη συνεισφορά του στην κατανόηση των φαινομένων σύγκρουσης και συνεργασίας στα πλαίσια της θεωρίας των παιγνίων. Στην παρούσα διατριβή γίνεται για πρώτη φορά, απ' όσο γνωρίζουμε, η παρουσίαση των δύο αυτών μοντέλων στην ελληνόγλωσση βιβλιογραφία.

2.1. Το Μοντέλο της Ντάμας του James Sakoda

Ο James Sakoda ήταν ο πρώτος που ανέπτυξε ένα δραστοστρεφές μοντέλο με εφαρμογή στις κοινωνικές επιστήμες (Macy & Willer, 2002). Ο Sakoda ονόμασε το μοντέλο κοινωνικής αλληλεπίδρασης που ανέπτυξε, **μοντέλο της ντάμας (checkerboard model)**. Το σχετικό άρθρο δημοσιεύτηκε το 1971 στο περιοδικό Journal of Mathematical Sociology με τίτλο *The Checkerboard Model of Social Interaction*, μολονότι η βασική ιδέα υπήρχε ήδη στην αδημοσίευτη διδακτορική του διατριβή το 1949! Στόχος του μοντέλου ήταν να κατανοηθεί ο σχηματισμός των ομάδων και γεννήθηκε σε μια

προσπάθεια να αναπαρασταθεί η αλληλεπίδραση και η αλλαγή κατοικίας σε μία περιοχή όπου είχαν μεταφερθεί τα μέλη της Ιαπωνικής μειονότητας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, μετά την Ιαπωνική επίθεση εναντίον των ΗΠΑ στο Πέρλ Χάρμπορ (Sakoda, 1971).

Ο κόσμος στο μοντέλο του Sakoda αποτελείται από μια σκακιέρα 8×8 , δηλαδή ένα κυψελοειδές αυτόματο με τις ίδιες διαστάσεις, και δύο διακεκριμένες ομάδες των 6 ατόμων. Κάθε άτομο μπορεί να καταλαμβάνει μόνο ένα κελί, άρα υπάρχουν και κενά κελιά. Τα μέλη της πρώτης ομάδας συμβολίζονται με τετράγωνα ενώ της άλλης με σταυρούς (βλέπε πίνακα 2.3). Κάθε μέλος έχει θετική, ουδέτερη ή αρνητική στάση απέναντι στα άλλα μέλη, που ονομάζεται *σθένος* (*valence*). Το σθένος ενός ατόμου i ως προς ένα άτομο j είναι ένας ακέραιος αριθμός και συμβολίζεται με V_{ij} . Όλα τα άτομα μπορούν να μετακινηθούν σε άδεια κελιά, που βρίσκονται όμως μέσα στην 3×3 περιοχή τους. Αν δεν υπάρχουν άδεια κελιά, τότε ένα άτομο μπορεί να πηδήξει πάνω από ένα κατειλημμένο κελί, αλλά η μετακίνηση είναι πάντα τοπική και επιτρέπεται μόνο μέσα σε συγκεκριμένα όρια. Κάθε άτομο i χρησιμοποιεί τη συνάρτηση μετακίνησης και μετακινείται στο κελί όπου η παράσταση

$$\sum_{j \in P} \frac{V_{ij}}{\sqrt[w]{d_{ij}^2}}$$

γίνεται μέγιστη. Το d συμβολίζει την Ευκλείδεια απόσταση ανάμεσα στα άτομα i και j και η τάξη της ρίζας w καθορίζει το βαθμό μείωσης των σθενών, ανάλογα με το μέγεθος της απόστασης των δύο ατόμων. Ο Sakoda διεξήγαγε την προσομοίωση υποθέτοντας ότι τα άτομα έχουν δύο διαφορετικές στάσεις απέναντι στα υπόλοιπα άτομα. Ονόμασε τη μία στάση *διαχωρισμό* (*segregation*) και την άλλη *καχυποψία* (*suspicion*). Σύμφωνα με τη στάση του διαχωρισμού κάθε άτομο έλκεται από τα άτομα που ανήκουν στην ίδια ομάδα με αυτό και απωθείται από τα άτομα που ανήκουν στην αντίθετη ομάδα, ενώ σύμφωνα με τη στάση της καχυποψίας αδιαφορεί για τα άτομα της ίδιας ομάδας και απωθείται από τα άτομα της αντίθετης ομάδας, όπως και κατά τη στάση του διαχωρισμού. Στους πίνακες 2.1 και 2.2 παρουσιάζεται η μαθηματοποίηση των υποθέσεων, δηλαδή τα σθένη των ατόμων σε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των στάσεων.

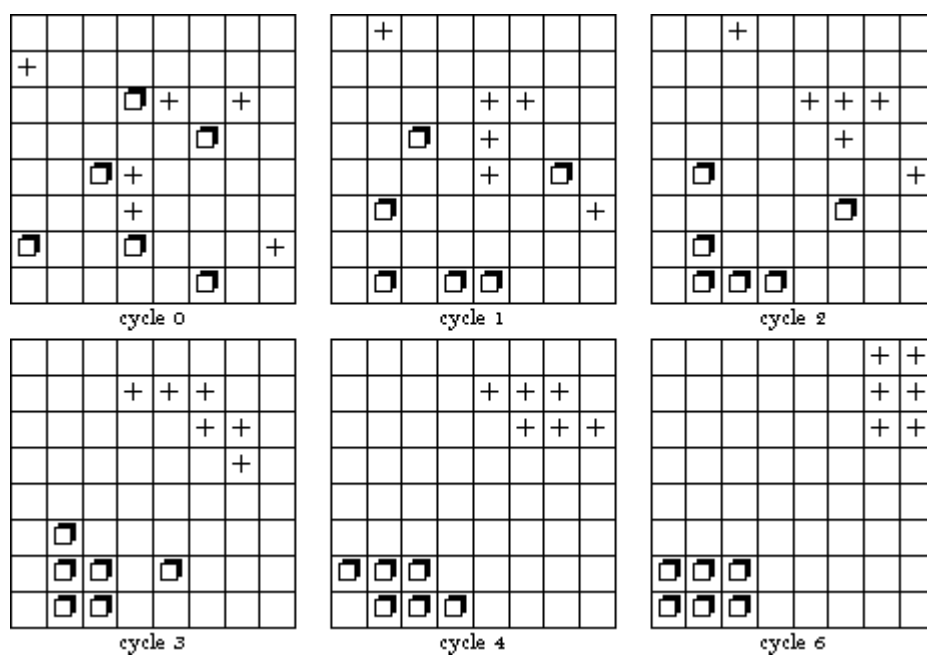
Στάση Διαχωρισμού	Προς τετράγωνα	Προς σταυρούς
Τετράγωνα	1	-1
Σταυροί	-1	1

Πίνακας 2.1: Σθένη των ατόμων που έχουν τη στάση διαχωρισμού.

Στάση Καχυποψίας	Προς τετράγωνα	Προς σταυρούς
Τετράγωνα	0	-1
Σταυροί	-1	0

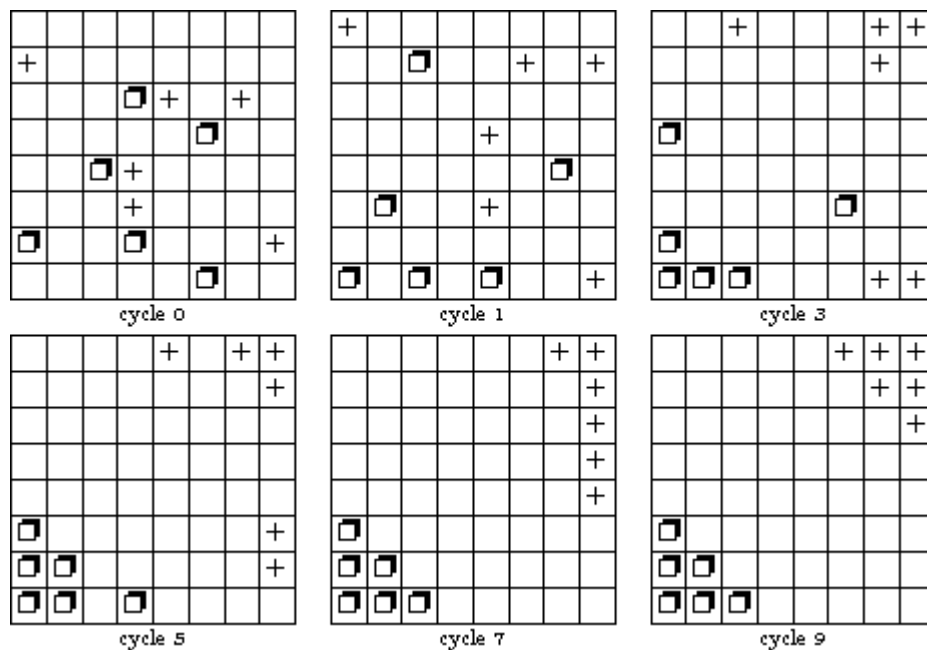
Πίνακας 2.2: Σθένη των ατόμων που έχουν τη στάση καχυποψίας.

Παρατηρούμε ότι οι τιμές του σθένους στους πίνακες 2.1 και 2.2 δείχνουν, όπως περιγράψαμε προηγουμένως, ότι η συμπεριφορά κάθε ατόμου απέναντι στα άτομα της αντίθετης ομάδας είναι ίδια και στις δύο στάσεις, του διαχωρισμού και της καχυποψίας. Αυτό που αλλάζει είναι η συμπεριφορά των ατόμων απέναντι στα άτομα της ίδιας ομάδας, όπου σύμφωνα με τη στάση διαχωρισμού κάθε άτομο έλκεται από τα άτομα της ομάδας του (σθένος = 1) ενώ με τη στάση καχυποψίας αδιαφορεί για τα άτομα της ομάδας του (σθένος = 0). Στον πίνακα 2.3 παρουσιάζεται η δυναμική του σχηματισμού των ομάδων όταν τα άτομα και των δύο ομάδων συμπεριφέρονται σύμφωνα με τη στάση του διαχωρισμού



Πίνακας 2.3: Η δυναμική της στάσης διαχωρισμού. Οι εικόνες έχουν ληφθεί από Hegselmann & Flache (1998) και προέρχονται από την αρχική δημοσίευση του Sakoda (1971).

Δεν αποτελεί έκπληξη ότι η στάση όπου όλα τα άτομα τείνουν να διαχωριστούν οδηγεί τις δύο ομάδες να ζουν σε αντίθετες γωνίες του κυψελοειδούς αυτομάτου, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.3. Αποτελεί έκπληξη όμως η δυναμική που αναπτύσσεται όταν τα άτομα συμπεριφέρονται σύμφωνα με τη στάση της καχυποψίας (πίνακας 2.4).

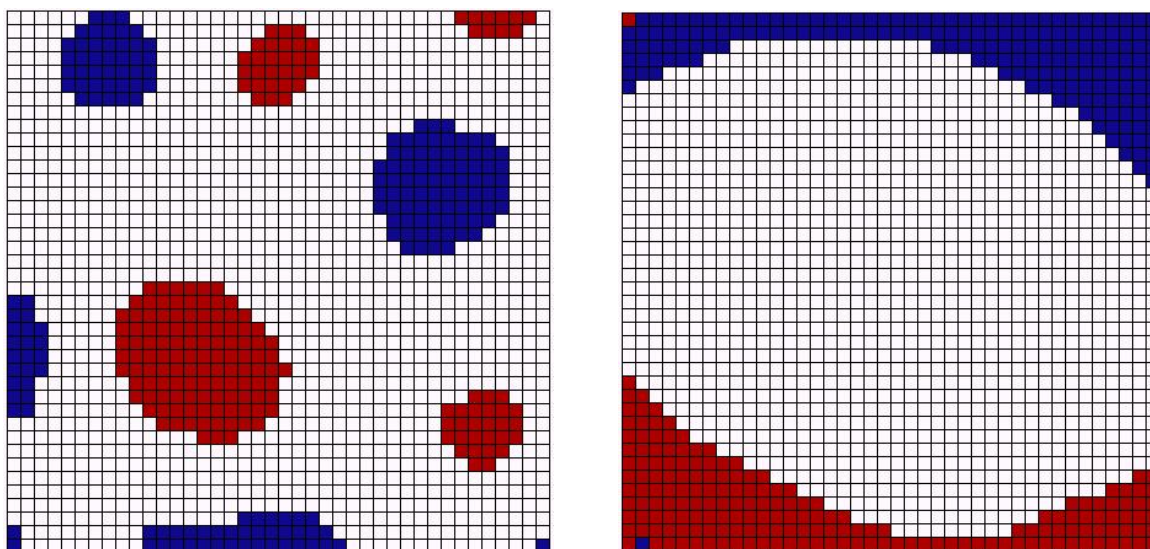


Πίνακας 2.4: Η δυναμική της στάσης καχυποψίας. Οι εικόνες έχουν ληφθεί από Hegselmann & Flache (1998) και προέρχονται από την αρχική δημοσίευση του Sakoda (1971).

Προφανώς τα άτομα με ουδέτερη στάση απέναντι στα άλλα άτομα της ομάδας τους σχηματίζουν και πάλι δύο πλήρως διαχωρισμένες ομάδες, οδηγημένα μόνο από την αρνητική στάση τους απέναντι στα άτομα της αντίθετης ομάδας, κάτι που δεν είναι αναμενόμενο, όταν κανείς διαβάσει τις προϋποθέσεις του μοντέλου. Η έλξη των ατόμων για τα άτομα της ίδιας ομάδας δεν είναι απαραίτητη προϋπόθεση για το σχηματισμό δύο απομακρυσμένων περιοχών, που η καθεμιά να περιέχει άτομα που ανήκουν μόνο στην ίδια ομάδα. Το συμπέρασμα αυτό αποτέλεσε και το σημαντικότερο ίσως εύρημα κατά την αρχική παρουσίαση του μοντέλου από τον Sakoda το 1971.

Βέβαια, όπως προαναφέραμε, ο Sakoda διεξήγαγε τις προσομοιώσεις και πραγματοποίησε επίπονους υπολογισμούς δίχως τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Αργότερα όμως, με χρήση υπολογιστών, ανακαλύφθηκε κάτι ακόμα πιο ενδιαφέρον, που δεν παρατηρήθηκε από το Sakoda εξαιτίας της έλλειψης υπολογιστικής δύναμης: η στάση της καχυποψίας, δηλαδή μια αρνητική στάση απέναντι στα άτομα της άλλης ομάδας σε συνδυασμό με αδιαφορία απέναντι στα άτομα της ίδιας ομάδας μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό πολύ μεγαλύτερων ομάδων, παρά αν τα άτομα έχουν θετικά αισθήματα απέναντι στα άτομα της ίδιας ομάδας (Hegselmann & Flache, 1998). Για να διαπιστωθεί κάτι τέτοιο χρειάζεται το μοντέλο να συμπεριλάβει ένα μεγαλύτερο αριθμό

ατόμων που ζουν σε ένα μεγαλύτερης διάστασης κυψελοειδές αυτόματο, κάτι που σήμερα είναι εύκολο να γίνει με τη βοήθεια ακόμη και του φθηνότερου υπολογιστή. Στο πίνακα 2.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου του Sakoda, υποθέτοντας ότι δύο ομάδες των 180 ατόμων βρίσκονται σε ένα κυψελοειδές αυτόματο διαστάσεων 40×40 . Αντί για τετράγωνα και σταυρούς τα άτομα της πρώτης ομάδας συμβολίζονται με μπλε χρώμα ενώ της δεύτερης με κόκκινο.



Πίνακας 2.5: Η δυναμική της στάσης διαχωρισμού (αριστερά) και καχυποψίας (δεξιά). Οι εικόνες έχουν ληφθεί από Hegselmann & Flache (1998).

Αφού παρατηρηθεί αυτό το εντυπωσιακό και μη αναμενόμενο αποτέλεσμα της προσομοίωσης, δεν είναι δύσκολο στη συνέχεια να ερμηνευθεί ο μηχανισμός, σύμφωνα με τον οποίο η ουδέτερη συμπεριφορά προς τα άτομα της ίδιας ομάδας οδηγεί το σύστημα σε πόλωση και απομάκρυνση των δύο ομάδων, απ' ό,τι στην αντίστοιχη περίπτωση όπου υπάρχει έλξη για τα άτομα της ίδιας ομάδας. Και οι δύο στάσεις, του διαχωρισμού και της καχυποψίας, οδηγούν τα άτομα μακριά από τα άτομα της άλλης ομάδας. Αν όμως σύμφωνα με την στάση του διαχωρισμού, άτομα της ίδιας ομάδας συναντηθούν μετά από κάποια μετακίνηση, στο σημείο συνάντησης υπάρχει αμοιβαία έλξη των ατόμων, έλξη που μπορεί να είναι τόσο δυνατή, ώστε τα άτομα αυτά να παραμείνουν σε αυτό το σημείο. Κάτω όμως από τη στάση της καχυποψίας τα προηγούμενα άτομα συνεχίζουν να μετακινούνται, προκειμένου να αποφύγουν τα άτομα της αντίθετης ομάδας, πράγμα που είναι και το μοναδικό ζητούμενο σε αυτή την περίπτωση (Hegselmann & Flache, 1998). Κατά συνέπεια, δίχως να υπάρχει πρόθεση

από την πλευρά των ατόμων στο μικρό επίπεδο, έχουμε ένα αναπάντεχο αποτέλεσμα το μάκρο επίπεδο: σχηματίζονται δύο τεράστιες ομάδες του ιδίου χρώματος, απομακρυσμένες μεταξύ τους, με δύο μικρές εξαιρέσεις στη συγκεκριμένη προσομοίωση, ένα μπλε και ένα κόκκινο άτομο που παγιδεύτηκαν ανάμεσα στα άτομα της αντίθετης ομάδας και δεν κατάφεραν να δραπετεύσουν αρκετά γρήγορα (βλέπε δεξιά στήλη του πίνακα 2.5).

Το μοντέλο αυτό, που ιστορικά υπήρξε το πρώτο δραστοστρεφές μοντέλο με εφαρμογή στις κοινωνικές επιστήμες, κατέδειξε ότι η μοντελοποίηση με πράκτορες και χρήση κυψελοειδών αυτομάτων μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην «κατανόηση των βασικών αρχών της συμπεριφοράς» (Sakoda, 1971) και ειδικότερα της μικρο-μάκρο σχέσης στη δυναμική των κοινωνικών διαδικασιών. Ακόμα αποτέλεσε και μια πρώτη ένδειξη ότι τα κυψελοειδή αυτόματα μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στις κοινωνικές επιστήμες, ως μια εναλλακτική ερευνητική μέθοδος.

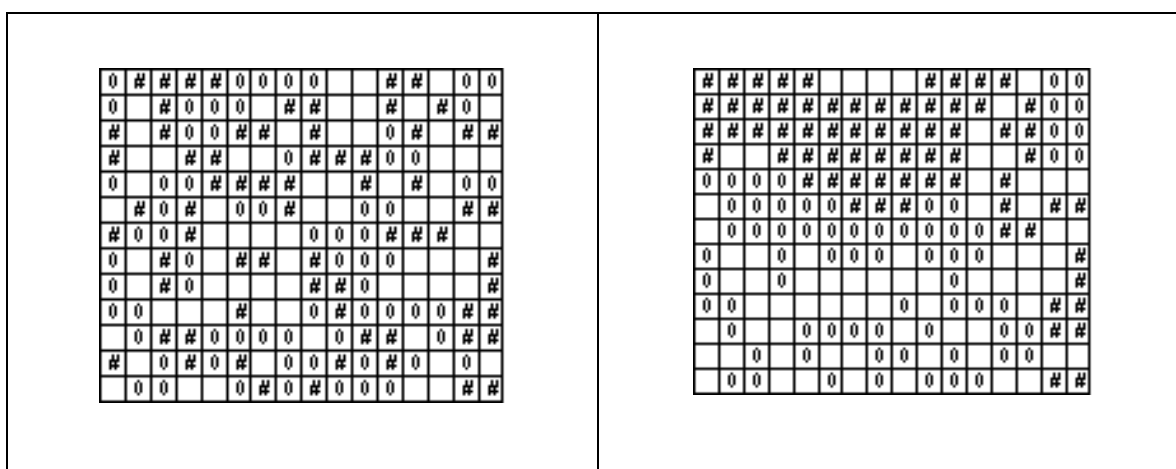
2.2. Το Δυναμικό Μοντέλο Διαχωρισμού του Thomas Schelling

Άλλο ένα μοντέλο που έγινε γρήγορα ευρύτερα γνωστό και αποτελεί ένα από τα πρώτα παραδείγματα δραστοστρεφούς μοντελοποίησης για τις κοινωνικές επιστήμες, είναι το *μοντέλο διαχωρισμού (dynamic model of segregation)* του Thomas Schelling. Αρχικά το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για να αναλύσει και να ερμηνεύσει τη γεωγραφική διάχυση των νέων τεχνικών για τη γεωργική καλλιέργεια. Στην πρώτη δημοσίευση (Schelling, 1969) ο «κόσμος» του μοντέλου ήταν μια γραμμή, ενώ σε μεταγενέστερη (Schelling, 1971), για την πληρέστερη αναπαράσταση της τοπολογίας των υποβοσκόντων δομών, χρησιμοποιήθηκε μια σκακιέρα, δηλαδή ένα δυσδιάστατο κυψελοειδές αυτόματο.

Ο Schelling τοποθέτησε πένες και δεκάρες πάνω σε μια σκακιέρα και τις μετακινούσε σύμφωνα με τους κανόνες του μοντέλου. Ερμήνευσε τη σκακιέρα ως πόλη, με κάθε τετράγωνο του πίνακα να αντιπροσωπεύει ένα ή περισσότερα σπίτια. Ερμήνευσε ακόμη τις πένες και τις δεκάρες ως πράκτορες που αντιπροσωπεύουν δύο οποιεσδήποτε κοινωνικές ομάδες, όπως δύο διαφορετικές φυλές, διαφορετικές οικονομικές τάξεις κλπ. Η γειτονιά ενός πράκτορα που καταλαμβάνει οποιαδήποτε θέση στη σκακιέρα αποτελείται από τα τετράγωνα που βρίσκονται γύρω από αυτή τη θέση. Κατά συνέπεια, οι πράκτορες που βρίσκονταν σε εσωτερικά τετράγωνα είχαν οκτώ γείτονες ενώ οι

πράκτορες των ακραίων τετραγώνων είχαν πέντε γείτονες και των γωνιακών τρεις. Επίσης καθόρισε κανόνες, σύμφωνα με τους οποίους ένας συγκεκριμένος πράκτορας ήταν ευτυχής στην τρέχουσα θέση του. Εάν ήταν δυστυχισμένος, θα προσπαθούσε να κινηθεί προς μια άλλη θέση στον πίνακα, ή ενδεχομένως να βγει από τον πίνακα εξ' ολοκλήρου.

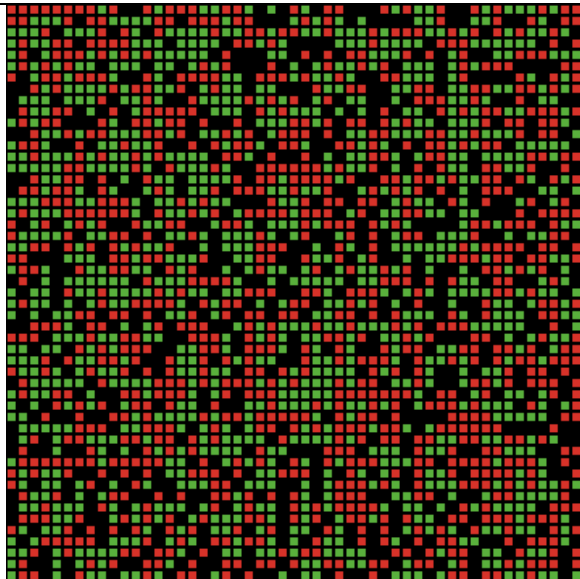
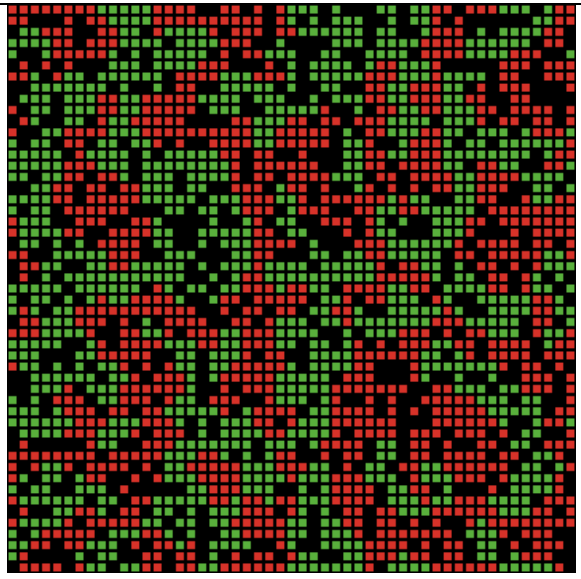
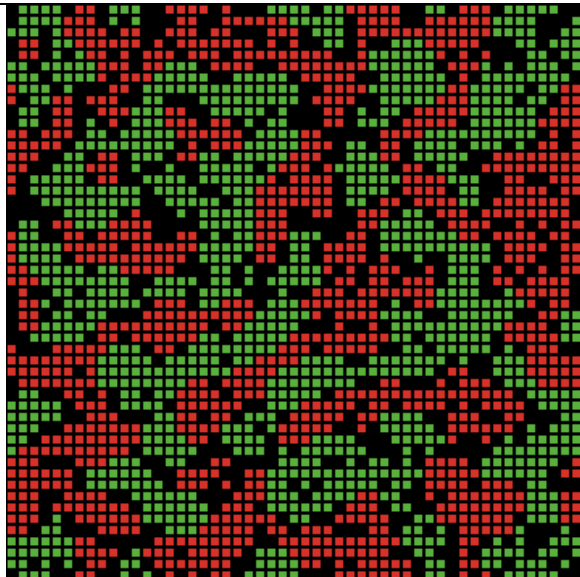
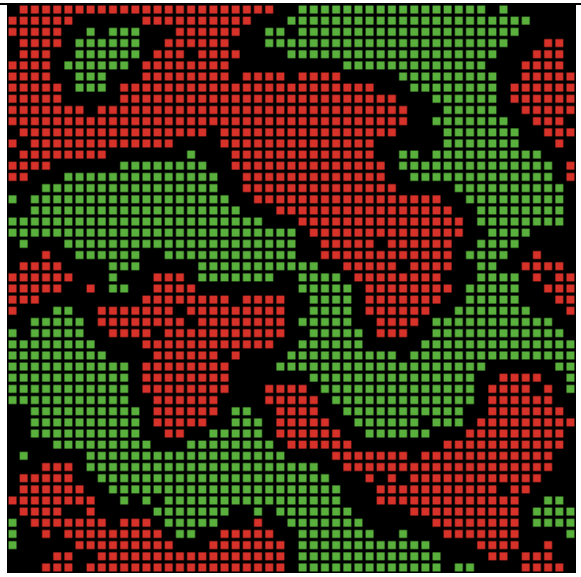
Σύμφωνα με το συμβολισμό του Schelling, τα άτομα είναι χωρισμένα σε δύο ομάδες, των άστρων και των μηδενικών (βλέπε πίνακα 2.6). Όλα τα άτομα μπορούν να συμβιώσουν μεταξύ τους, αλλά καθένα από αυτά θέλει οπωσδήποτε να ζει έχοντας γύρω του κάποια άτομα από την ίδια ομάδα. Κάθε άστρο θέλει να βρίσκεται μέσα στην 3×3 περιοχή του ένα ελάχιστο ποσοστό (πχ. 50%) ατόμων της ίδιας ομάδας, όπως και κάθε μηδενικό, διαφορετικά μετακινείται μέσα στην περιοχή του στο τετραγωνάκι με το μεγαλύτερο ποσοστό ατόμων της ίδιας ομάδας. Η προσομοίωση μελετάει την τελική διαμόρφωση του κυψελοειδούς αυτομάτου σε συνάρτηση με το προαναφερθέν ποσοστό. Ο Schelling (1971) παρουσιάζει τα αποτελέσματα του μοντέλου που μπορούμε να δούμε στη δεξιά στήλη του πίνακα 2.6, τα οποία μάλιστα εξαγάγει χωρίς τη χρήση υπολογιστή.



Πίνακας 2.6: Αριστερά: αρχική τυχαία κατανομή. Δεξιά: διαχωρισμός (segregation). Οι εικόνες έχουν ληφθεί από Hegselmann & Flache (1998) και προέρχονται από την αρχική δημοσίευση του Schelling (1971).

Όπως ήταν αναμενόμενο, ο Schelling διαπίστωσε ότι ο πίνακας εξελίχθηκε γρήγορα σε ένα έντονο σχήμα διαχωρισμού, εάν οι "κανόνες ευτυχίας" των πρακτόρων ευνοούσαν την ισχυρή προτίμηση των πρακτόρων για πράκτορες που ανήκαν στην ίδια ομάδα με τους ίδιους. Προφανώς ένας μεγάλος βαθμός διαχωρισμού μεταξύ των δύο ομάδων λαμβάνει χώρα σαν αποτέλεσμα της αρχής όπου ένα άτομο δε θέλει να ζήσει σε μια περιοχή που η ομάδα του δεν έχει τη μειοψηφία. Ένα μη αναμενόμενο αποτέλεσμα

όμως ήταν ότι και στις περιπτώσεις όπου οι πράκτορες εξέφρασαν μόνο μια ήπια προτίμηση για την κατοχή των γειτονικών τους τετραγώνων από πράκτορες της ίδιας ομάδας, το σύστημα και πάλι κατέληγε στον πλήρη διαχωρισμό. Με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή μπορεί πλέον εύκολα να διερευνηθεί το μοντέλο με πολύ περισσότερους πράκτορες και μεγαλύτερης διάστασης κυψελοειδές αυτόματο. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα 2.7 και παρήχθησαν με τη βοήθεια του προγράμματος Netlogo.

	
Τυχαία αρχική κατανομή	προτίμηση $\leq 30\%$
	
προτίμηση $\leq 50\%$	προτίμηση $\leq 70\%$

Πίνακας 2.7: Αρχική τυχαία κατανομή και τελική κατάσταση τριών προσομοιώσεων με βάση το μοντέλο διαχωρισμού του Schelling. Βασική υπόθεση είναι ότι κάθε πράκτορας

που η περιοχή του περιλαμβάνει πράκτορες του ίδιου με αυτόν χρώματος σε ποσοστό μικρότερο του 30% ή 50% ή 70% μετακινείται μέσα στην περιοχή του σε κάποιο άλλο κελί ώστε να αυξήσει το ποσοστό αυτό. Η παραγωγή των αποτελεσμάτων έγινε με χρήση του προγράμματος NetLogo.

Οι τρεις προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στον πίνακα 2.7, βασίζονται στο μοντέλο του διαχωρισμού του Schelling και έχουν ως αφετηρία την ίδια αρχική τυχαία κατανομή μπλε και κόκκινων κελιών, που φαίνεται στην αριστερή στήλη της πρώτης γραμμής του πίνακα 2.7. Το μέγεθος κυψελοειδούς αυτομάτου είναι 51×51 , ο αριθμός των πρακτόρων 1400 και η διάσταση της περιοχής του κάθε πράκτορα, στα πλαίσια της οποίας μετρά το ποσοστό των πρακτόρων που ανήκουν στην ίδια ομάδα με αυτόν, είναι 11×11 . Επιπλέον τα κενά μετρούν όπως και τα άτομα της αντίθετης ομάδας.

Σύμφωνα με το μοντέλο πολλά άτομα είναι δυστυχημένα, δεδομένου ότι δεν έχουν αρκετούς γείτονες του ίδιου χρώματος με αυτά και έτσι μετακινούνται σε νέες θέσεις στην περιοχή τους, τις κοντινότερες, όπου το ποσοστό των ατόμων της ίδιας ομάδας υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή, η οποία χαρακτηρίζει την προσομοίωση και αναφέρεται στον πίνακα 2.7. Κάθε μετακίνηση όμως μεταβάλλει το ποσοστό της κάθε ομάδας στην καινούργια περιοχή, διαταράσσοντας την ισορροπία του τοπικού πληθυσμού και προτρέποντας έτσι κάποια άλλα άτομα να φύγουν. Εάν μερικοί κόκκινοι πράκτορες κινούνται σε μια περιοχή, οι τοπικοί πράσινοι πράκτορες τείνουν να φύγουν. Αλλά όταν οι πράσινοι πράκτορες κινηθούν προς μια νέα περιοχή προτρέπουν τους κόκκινους πράκτορες να αφήσουν την νέα αυτή περιοχή κοκ. Κατά τη διάρκεια του χρόνου, ο αριθμός δυστυχημένων πρακτόρων μειώνεται και τελικά το σύστημα καταλήγει σε μια τελική κατάσταση ισορροπίας, στην οποία έχει λάβει χώρα ένας διαχωρισμός των πρακτόρων, ο βαθμός του οποίου εξαρτάται από το ποσοστό προτίμησης για πράκτορες του ίδιου χρώματος. Αξιοσημείωτο είναι ότι ακόμη και στην περίπτωση που το ποσοστό αυτό είναι ίσο με 30% λαμβάνει χώρα διαχωρισμός των πρακτόρων σε περιοχές ομοιόμορφου χρώματος και αυτοοργάνωση του συστήματος σε αρκετά μεγάλο βαθμό (δεξιά στήλη της πρώτης γραμμής του πίνακα 2.7). Προφανώς, ένας υψηλός βαθμός διαχωρισμού εμφανίζεται εάν τα άτομα αντιπαθούν να βρίσκονται σε θέση μειονότητας (ποσοστό $>50\%$) και το μέγεθος του διαχωρισμού αυξάνει, παράλληλα με την αύξηση του ποσοστού αυτού.

Η προσομοίωση αυτή μας επιτρέπει να μελετήσουμε ένα μηχανισμό, σύμφωνα με τον οποίο οι ατομικές μεμονωμένες προτιμήσεις των πρακτόρων στο μικρό επίπεδο μπορούν να «παράγουν» ένα ενδιαφέρον φαινόμενο στο μακρό επίπεδο. Όπως και στην περίπτωση του Sakoda, η θεμελιώδης προσφορά του μοντέλου βρίσκεται στην ανάδειξη του μηχανισμού, σύμφωνα με τον οποίο ένα σύνολο κανόνων και ιδιοτήτων των πρακτόρων στο μικρό επίπεδο μπορούν να παραγάγουν μακρο αποτελέσματα, που είναι αδύνατο να προβλεφθούν δίχως τη διεξαγωγή προσομοίωσης και που μάλιστα προέκυψαν χωρίς να υπάρχει κάποια αντίστοιχη πρόθεση από κανένα άτομο ή σύνολο ατόμων. Κατά συνέπεια, ακόμη και ανοιχτόμυαλα και μη προκατειλημμένα άτομα μπορούν να οδηγηθούν να κατοικήσουν σε έντονα διαχωρισμένες περιοχές. Όταν οι δράσεις των ατόμων εξαρτώνται από το τι έχουν πράξει οι άλλοι στο παρελθόν, ακόμη και πολύ ενοποιημένες περιοχές μπορούν να διαλυθούν, μιας και όταν κάποιο άτομο φύγει από τη γειτονιά, μπορεί να προκαλέσει μια αλυσιδωτή αντίδραση, η οποία θα οδηγήσει και πολλά άλλα άτομα να πράξουν το ίδιο. Υπάρχει λοιπόν μια προφανή αναντιστοιχία μεταξύ της ανάλυσης στο μικρό και στο μακρο-επίπεδο. Σε πολλές περιπτώσεις, είναι δύσκολο ή και αδύνατο να αποκαλυφθεί με άλλη μέθοδο ο μηχανισμός που έδρασε και προκάλεσε το σχηματισμό των μορφωμάτων του μακρο-επιπέδου, διότι αυτός βρίσκεται σε ένα άλλο επίπεδο, το τοπικό μικρό επίπεδο, κατά συνέπεια οι εξηγήσεις μας πρέπει να επικεντρώνονται στις διαδικασίες του μικρο-επιπέδου, αρκεί αυτές να είναι σε θέση να παράγουν τα παρατηρούμενα αποτελέσματα.

Η ανατροφοδότηση του δίπολου διαχωρισμός-προκατάληψη στις προτιμήσεις των ατόμων εμφανίζεται, με κάποιες παραλλαγές φυσικά, στους περισσότερους ανθρώπινους πληθυσμούς, και αφορά τα χαρακτηριστικά που θεωρούνται ως σημαντικές διαφορές, όπως το φύλο, την ηλικία, τη φυλή, το έθνος, τη γλώσσα, τη σεξουαλική προτίμηση, τη θρησκεία, κ.λπ. Μάλιστα ο διαχωρισμός με βάση τη φυλετική ή την εθνική καταγωγή σε ευδιάκριτες γεωγραφικές περιοχές των πόλεων είναι ένα κοινωνικό φαινόμενο που έχει διερευνηθεί από ένα μεγάλο αριθμό επιστημόνων. Στην πλειονότητα των ερευνών αυτών θεωρείται ένα προϊόν της άμεσης διάκρισης (για παράδειγμα κτηματομεσίτες που αποτρέπουν τους μαύρους ανθρώπους από την κίνηση σε περιοχές όπου η πλειοψηφία των κατοίκων είναι λευκοί) ή αποτέλεσμα οικονομικών περιορισμών (όπως φτωχές οικογένειες που δεν είναι σε θέση να αντέξουν οικονομικά την αγορά σπιτιού σε συγκεκριμένες περιοχές) (Hegselmann & Flache, 1998). Με το μοντέλο του όμως, ο Schelling επισήμανε ότι εάν οι οικογένειες των μαύρων και των λευκών προτιμούν να ζήσουν σε γειτονίες, στις οποίες είναι πλειοψηφία η εθνική ομάδα τους και είναι σε θέση

να κινηθούν προς την κοντινότερη θέση που ικανοποιεί αυτή τους την επιθυμία, αναπόφευκτα θα προκύψει πλήρης διαχωρισμός. Αυτό συμβαίνει ακόμα κι αν καμία από τις οικογένειες δεν θέλησε πραγματικά τον πλήρη διαχωρισμό. Μια απρόσμενη έκβαση είναι δυνατό να προκύψει στο μακρο-επίπεδο οφειλόμενη στις επιπτώσεις πολλών μεμονωμένων αποφάσεων στο μικρο-επίπεδο.

Μια σειρά άλλων δραστοστρεφών μοντέλων αναπτύχθηκαν στα επόμενα χρόνια, το πλήθος και η ποικιλία των οποίων καθιστά αδύνατη την παρουσίαση στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Στο επόμενο κεφάλαιο η παρουσίαση θα περιοριστεί στα τρία σημαντικότερα δραστοστρεφή μοντέλα δυναμικής εξέλιξης των γνωμών, μιας και στη συγκεκριμένη κατηγορία ανήκει και το μοντέλο πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΑ ΔΡΑΣΤΟΣΤΡΕΦΗ ΜΟΝΤΕΛΑ

ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ ΓΝΩΜΩΝ

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η μελέτη της επίδρασης της τοπολογίας επικοινωνίας στο μοντέλο πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών. Το μοντέλο αυτό είναι ένα δραστοστρεφές μοντέλο δυναμικής εξέλιξης των γνώμων των πρακτόρων μιας τεχνητής κοινωνίας. Ο σκοπός της δημιουργίας και της μελέτης των δραστοστρεφών μοντέλων προσομοίωσης είναι να κατανοήσουμε κάποιες ιδιότητες των πολύπλοκων κοινωνικών συστημάτων. Σύμφωνα με τον Axelrod, παρά το γεγονός ότι τα θέματα προς διερεύνηση μπορεί να είναι εξαιρετικά πολύπλοκα, οι υποθέσεις των δραστοστρεφών μοντέλων πρέπει να είναι οι απλούστερες δυνατές. Η πολυπλοκότητα των μοντέλων πρέπει να βρίσκεται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης και όχι στις υποθέσεις του κάθε μοντέλου (Axelrod, 1997b). Όταν ο σκοπός της μοντελοποίησης είναι να κατανοήσουμε πληρέστερα κάποιους θεμελιώδεις μηχανισμούς ανάδυσης των κοινωνικών φαινομένων τότε είναι σημαντική η απλότητα των υποθέσεων και του μοντέλου ενώ αντίθετα δεν παίζει σημαίνοντα ρόλο η πιστή αναπαράσταση όλων των λεπτομερειών των συγκεκριμένων κοινωνικών συνθηκών. Ένα δραστοστρεφές μοντέλο των κοινωνικών επιστημών που στοχεύει στην βαθύτερη κατανόηση κάποιων κοινωνικών διαδικασιών οφείλει να κριθεί με βάση την ποσότητα και την ποιότητα των αποτελεσμάτων του, με τις υποδείξεις του για περαιτέρω έρευνα και τον εμπλουτισμό της θεωρίας, παρά για την ακρίβεια στην αναπαράσταση των υπό διερεύνηση φαινομένων. Για το σκοπό αυτό η ρεαλιστική αναπαράσταση πολλών λεπτομερειών είναι ανώφελη και μάλιστα πολλές φορές περιορίζει το εύρος των αποτελεσμάτων (Axelrod, 1997b).

Παρότι υπάρχουν μοντέλα κοινωνικών προσομοιώσεων με πολύπλοκες υποθέσεις που στοχεύουν στην κατά το δυνατό πιστή αναπαράσταση των υπό μελέτη κοινωνικών φαινομένων, όπως το μοντέλο Sugarscape (Epstein & Axtell, 1996) , ένας μεγάλος αριθμός των δραστοστρεφών μοντέλων δεν στοχεύει να παρουσιάσει μια ακριβή απεικόνιση κάποιου συνόλου εμπειρικών δεδομένων. Η πολυπλοκότητα των μοντέλων αυτών προκύπτει από τις τοπικές αλληλεπιδράσεις ενός μεγάλου αριθμού πρακτόρων και δε βρίσκεται στις υποθέσεις των μοντέλων ή στις ιδιότητες των πρακτόρων τους.

Πριν την παρουσίαση του μοντέλου πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών και μετά την παρουσίαση των δύο ιστορικά πρώτων δραστοστρεφών μοντέλων

κοινωνικών προσομοιώσεων που παρουσιάστηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο της διατριβής, στο παρόν κεφάλαιο θα περιγράψουμε τα σημαντικότερα δραστοστρεφή μοντέλα δυναμικής εξέλιξης των γνώμων που έχουν δημοσιευτεί ως αυτή τη στιγμή, δηλαδή το μοντέλο πολιτισμικής διασποράς του Robert Axelrod, το δυναμικό μοντέλο της θεωρίας της κοινωνικής απήχησης των Nowak και Latané και το μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης των Hegselmann και Krause.

3.1. Το Μοντέλο Πολιτισμικής Διασποράς του Robert Axelrod

Το πρώτο μοντέλο που θα παρουσιάσουμε στο κεφάλαιο αυτό είναι το *μοντέλο πολιτισμικής διασποράς (model of dissemination of culture)* του Robert Axelrod. Ο Axelrod είναι καθηγητής των πολιτικών επιστημών στο πανεπιστήμιο του Michigan και ασχολείται με τη θεωρία της πολυπλοκότητας και τη θεωρία παιγνίων. Η *θεωρία παιγνίων* αποτελεί ένα σύνολο θεωρητικών μοντέλων και αναφέρεται στις στρατηγικές τις οποίες πρέπει να χρησιμοποιήσει ένα ορθολογικό άτομο κατά τη λήψη αποφάσεων, αν θέλει να βελτιστοποιήσει τα κέρδη του και όπου η βασική πηγή αμφιβολίας είναι η συμπεριφορά του αντιπάλου (Παπαστάμου, 2001). Μολονότι έχει ασκηθεί κριτική στη θεωρία αυτή, όπως ότι αδυνατεί να περιγράψει και ακόμα λιγότερο να εξηγήσει τη λήψη αποφάσεων στην καθημερινή μας ζωή, το ερευνητικό ενδιαφέρον στα πλαίσια αυτής της θεωρίας αναζωογονήθηκε εκ νέου μετά την εξαιρετική ερευνητική συνεισφορά του Axelrod, η οποία μάλιστα προέκυψε δίχως τον παραδοσιακό πειραματικό έλεγχο των συνθηκών κάτω από τις οποίες τα άτομα παίρνουν τις αποφάσεις τους, αλλά αντίθετα μετά από ένα διαγωνισμό προγραμμάτων (δηλαδή στρατηγικών) με θέμα «το δίλημμα του φυλακισμένου μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών». Στο διαγωνισμό αυτό έλαβαν μέρος ειδικοί στη θεωρία των παιγνίων, που ο καθένας υπέβαλε ένα πρόγραμμα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, με σκοπό να βρεθεί η καλύτερη στρατηγική, αυτή δηλαδή που θα αποδώσει τα μέγιστα οφέλη. Βέλτιστη αναδείχθηκε η στρατηγική του «*μία σου και μία μου*» (*tit for tat*), που προτάθηκε από τον Anatol Rapoport, όπως παρουσιάζεται στο βιβλίο του Axelrod «*Η Εξέλιξη της Συνεργασίας*» (Axelrod, 1998/1984), όπου και αναλύονται τα αποτελέσματα του διαγωνισμού. Πολλές μελέτες που αφορούν τη συνεργασία είναι εφαρμογές του *επαναλαμβανόμενου διλήμματος του φυλακισμένου (iterated prisoner dilemma)*, στο οποίο το παιγνίδι επαναλαμβάνεται και οι πράκτορες αλληλεπιδρούν έχοντας μνήμη της προγενέστερης συμπεριφοράς των άλλων πρακτόρων

(Axelrod 1987). Μια σειρά από παραλλαγές έχουν αναπτυχθεί πάνω σε αυτή την εξαιρετική έρευνα του Axelrod, όπως εισαγωγή θορύβου, εισαγωγή περιορισμένης ορθολογιστικής ικανότητας (bounded rationality) κ.α. (Cox, Sluckin & Steele 1999; Lomborg 1992, Lomborg 1996, Macy & Skvoretz 1998, Sullivan, Grosz & Kraus 2000).

Συνέχεια του προηγούμενου βιβλίου του Axelrod είναι « Η Πολυπλοκότητα της Συνεργασίας» (Axelrod, 1997a), βιβλίο το οποίο αναλύει τα αποτελέσματα ενός δεύτερου διαγωνισμού, στον οποίο αναδείχθηκε νικητής και πάλι η ίδια στρατηγική και στο οποίο η ανάλυση επεκτείνεται σε νέες περιοχές. Στο βιβλίο αυτό αναλύεται η άποψη του Axelrod ότι η δραστοστρεφής μοντελοποίηση στοχεύει στην κατανόηση των ιδιοτήτων των πολύπλοκων κοινωνικών συστημάτων μέσω της ανάλυσης των προσομοιώσεων καθώς και ότι οι δραστοστρεφείς προσομοιώσεις αποτελούν ένα τρίτο τρόπο διεξαγωγής επιστημονικής έρευνας, διακριτό από τις παραδοσιακές ερευνητικές μεθόδους της παραγωγικής και επαγωγικής επιστήμης. Η άποψη αυτή του Axelrod θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής. Ακόμη, στο βιβλίο αυτό, παρουσιάζονται έξι δραστοστρεφή μοντέλα κοινωνικών προσομοιώσεων, μεταξύ των οποίων και το μοντέλο της πολιτισμικής διασποράς, στο οποίο αναφέρεται η παρούσα ενότητα.

Στο *μοντέλο της πολιτισμικής διασποράς (model of dissemination of culture)* ο Axelrod διερευνά το ζήτημα της ύπαρξης και επιβίωσης ενός μεγάλου αριθμού από διαφορετικές μεταξύ τους κουλτούρες, παρά την τάση που υπάρχει για ομογενοποίησή τους. Το βασικό ερευνητικό ερώτημα είναι το εξής: αφού οι άνθρωποι τείνουν να γίνουν όλο και περισσότερο όμοιοι στις απόψεις τους, τις στάσεις τους και τη συμπεριφορά τους όταν αλληλεπιδρούν, γιατί όλες οι διαφορές που υπάρχουν μεταξύ τους δεν εξαφανίζονται τελικά; Το ερώτημα αυτό καθώς και οι μηχανισμοί του ανταγωνισμού της παγκοσμιοποίησης (globalization) ή ομοφωνίας (consensus) και της συνύπαρξης ενός μεγάλου αριθμού από κουλτούρες διερευνούνται από το μοντέλο της πολιτισμικής διασποράς. Σύμφωνα με τον Άξελροντ (1997a), η μέθοδος του μοντέλου βασίζεται σε τρεις αρχές, τη δραστοστρεφή μοντελοποίηση, το ότι δεν υπάρχει κεντρική αρχή ή κεντρικός πράκτορας στο μοντέλο και στο ότι οι πράκτορες είναι προσαρμοστικοί (adaptive) και όχι λογικοί (rational).

Όπως και στα περισσότερα δραστοστρεφή μοντέλα η προσέγγιση είναι άνωθεν (bottom up), δηλαδή οι μηχανισμοί της αλλαγής καθορίζονται σε τοπικό επίπεδο για τους πράκτορες και οι συνέπειες αυτών των αλλαγών και της αλληλεπίδρασης ενός μεγάλου αριθμού πρακτόρων εξετάζονται στο μακρο επίπεδο του συστήματος και

αποτελούν τις αναδυόμενες (emergent) ιδιότητες του συστήματος. Η έλλειψη ενός κεντρικού πράκτορα, που θα μπορούσε να συντονίζει ή να επηρεάζει το συνολικό σύστημα των υπολοίπων πρακτόρων, είναι σημαντική προϋπόθεση του μοντέλου, παρά το γεγονός ότι σημαντικές αλλαγές στην κουλτούρα κάθε κοινωνίας αποφασίσθηκαν και «επιβλήθηκαν» από αυθεντίες ή ισχυρούς ηγέτες. Στόχος του μοντέλου όμως είναι να κατανοήσει τους μηχανισμούς την εμφάνισης, αλλαγής και διαμόρφωσης του πολιτισμού, δίχως να καταφύγει στην κανονιστική ή όχι επιρροή μιας κεντρικής αυθεντίας ή ηγεσίας. Όπως και σε άλλα δραστοστρεφή μοντέλα, ζητούμενο είναι ο δραστικός περιορισμός των υποθέσεων σε συνδυασμό με τον πλούτο των παραγόμενων φαινομένων. Ένα σημαντικό εύρημα, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, είναι η επιβίωση ενός αριθμού πολιτισμών δίχως να είναι αναγκαία η ύπαρξη ηγεσίας ή κάποιας αυθεντίας για καμία από αυτές.

Σύμφωνα με το μοντέλο, τα άτομα ακολουθούν απλούς κανόνες με τους οποίους επηρεάζονται και επηρεάζουν τα άλλα άτομα. Οι κανόνες αυτοί δε συνάγονται απαραίτητα από κάποια αρχή, με βάση την οποία το άτομο κάνει λογικούς υπολογισμούς, σύμφωνα με το ατομικό κόστος και όφελος, ή εφαρμόζοντας μια ανάλυση στρατηγικής όπως υποθέτει η θεωρία παιγνίων, αλλά απλά το άτομο προσαρμόζεται στο περιβάλλον του. Όπως προαναφέραμε οι πράκτορες είναι προσαρμοστικοί και όχι λογικοί.

3.1.1. Παρουσίαση του Μοντέλου

Αρχικά θεωρούμε ότι έχουμε 100 πράκτορες τοποθετημένους σε ένα κυψελοειδές αυτόματο 10x10. Καμιά μετακίνηση των πρακτόρων δε λαμβάνει χώρα στο μοντέλο αυτό. Θα μπορούσαμε έτσι να φανταστούμε κάθε κελί του κυψελοειδούς αυτομάτου σαν ένα χωριό που έχει ομοιογενή κουλτούρα.

Η κουλτούρα ή ο πολιτισμός στο μοντέλο αυτό περιγράφεται με βάση τα χαρακτηριστικά της, όπως γλώσσα, θρησκεία, τεχνολογία, ενδυμασία κλπ. Για να δοθεί έμφαση στο περιεχόμενο του πολιτισμού, αλλά στον τρόπο που μπορεί αυτή να εμφανιστεί και να διαδοθεί, *κάθε πολιτισμός θεωρείται σαν ένα σύνολο χαρακτηριστικών (features). Κάθε χαρακτηριστικό μπορεί να πάρει ένα σύνολο τιμών (traits)*, που είναι οι εναλλακτικές μορφές που μπορεί να πάρει το κάθε χαρακτηριστικό. Για παράδειγμα ένα χαρακτηριστικό ενός πολιτισμού μπορεί να είναι το χρώμα της ζώνης που φορούν οι άνθρωποι σε μια συγκεκριμένη κοινωνία. και οι τιμές αυτού του

χαρακτηριστικού να αντιστοιχούν στα διάφορα χρώματα που μπορεί να έχουν οι ζώνες αυτές. Αρχικά υποθέτουμε ότι *κάθε πολιτισμός περιλαμβάνει 5 χαρακτηριστικά και κάθε χαρακτηριστικό μπορεί να πάρει 10 τιμές*. Έτσι κάθε πολιτισμός μπορεί να παρασταθεί σαν μια ακολουθία από 5 ψηφία, όπως για παράδειγμα 82306, δηλαδή μπορεί να πάρει μόνο διακριτές τιμές (discrete opinion dynamics). Υπενθυμίζουμε ότι σε άλλα δραστοστρεφή μοντέλα η γνώμη των πρακτόρων μπορεί να πάρει μόνο δύο τιμές (binary opinion dynamics) και σε άλλα, όπως στο μοντέλο πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών, μπορεί να πάρει όλους τους πραγματικούς αριθμούς που ανήκουν σε ένα διάστημα (continuous opinion dynamics).

Ο χρόνος παίρνει διακριτές τιμές που ονομάζουμε επαναλήψεις (iterations). Ο πίνακας 3.1 παρουσιάζει την αρχική κατάσταση των πολιτισμών των 100 ατόμων και έχει παραχθεί από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών.

75628	50726	41251	44095	98609	70460	33649	47167	85332	70227
27758	43313	59511	76979	44097	84584	70460	83706	47166	29385
93936	82460	84215	46955	24916	44099	62015	62015	54151	90800
64782	73031	51387	64991	05609	54103	77995	75125	26379	65245
28160	69563	01338	19737	47571	24925	44109	07273	59776	20806
34439	34430	22687	82110	65053	52388	34314	20815	26379	43487
53964	04037	58131	89302	48487	34334	20826	51232	20811	67227
72700	53964	82980	34382	30370	51247	62878	26379	67027	20810
20115	91096	58130	49120	25789	37743	92127	39571	37742	40596
54429	70115	47640	38647	58555	45697	07899	79747	53452	01563

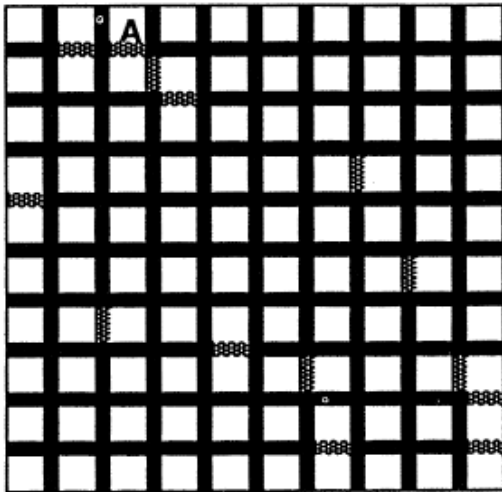
Πίνακας 3.1: Μια τυπική περίπτωση με τις αρχικές τυχαίες κουλτούρες 100 πρακτόρων, όπως αυτά είναι τοποθετημένα σε ένα κυψελοειδές αυτόματο 10x10. Η υπογραμμισμένη κουλτούρα και η κουλτούρα που βρίσκεται κάτω από αυτή έχουν κοινά δύο από τα πέντε χαρακτηριστικά, το τρίτο και το πέμπτο, έχουν δηλαδή *ομοιότητα στην κουλτούρα* τους ίση με 40%.

Η διαδικασία της κοινωνικής αλληλεπίδρασης στο μοντέλο μπορεί να περιγραφεί σα μια ακολουθία από γεγονότα, όπου βασική προϋπόθεση είναι ότι όσο πιο όμοια είναι κάποια πράκτορας με τη γείτονά της, τόσο πιο πιθανό είναι να υιοθετήσει κάποιο χαρακτηριστικό της και η ομοιότητα των δύο πρακτόρων να αυξηθεί. Ο αλγόριθμος του μοντέλου έχει ως εξής: επιλέγουμε τυχαία μία πράκτορα (ενεργή πράκτορας), δηλαδή ένα κελί του πίνακα 5.1 και μια γειτονική της πράκτορα. Γειτονικές θεωρούνται οι τέσσερις πράκτορες που βρίσκονται βόρεια, νότια, ανατολικά και δυτικά

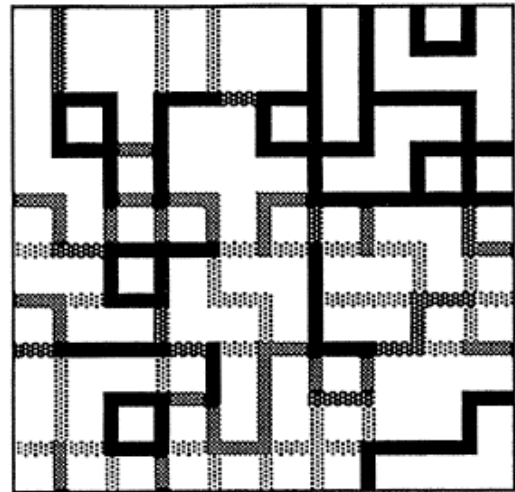
της ενεργού (περιοχή Von Neumann), όταν αυτή βρίσκεται στο εσωτερικό του κυψελοειδούς αυτομάτου. Για τις ακραίες πράκτορες γειτονικές θεωρούνται όσες από τις προηγούμενες πράκτορες υπάρχουν στο χώρο του κυψελοειδούς αυτομάτου.

Με πιθανότητα ίση με την ομοιότητα των πολιτισμών των δύο πρακτόρων, οι δύο αυτές πράκτορες αλληλεπιδρούν. Αλληλεπίδραση σημαίνει ότι επιλέγεται τυχαία ένα χαρακτηριστικό μη κοινό των δύο πολιτισμών (αν υπάρχει) και η ενεργή πράκτορας υιοθετεί την τιμή της γειτονικής πράκτορα. Στο παράδειγμα του πίνακα 3.1, αν επιλέξουμε σαν ενεργή πράκτορα αυτή που αντιστοιχεί στον πεντανήφιο αριθμό που είναι υπογραμμισμένος (89302) και σαν γειτονική πράκτορα την πράκτορα που είναι κάτω από αυτήν (34382), η πιθανότητα να αλληλεπιδράσουν είναι ίση με 40%. Αν αλληλεπιδράσουν και επιλεγεί τυχαία το δεύτερο χαρακτηριστικό να είναι αυτό που θα αλλάξει, τότε η ενεργή πράκτορας θα μετατρέψει την τιμή του δεύτερου χαρακτηριστικού από 9 σε 4. Έτσι η κουλτούρα της ενεργούς πράκτορα θα γίνει 84302 και η ομοιότητα των δύο πρακτόρων θα αυξηθεί από 40% σε 60%, έτσι ώστε να είναι στο εξής ευκολότερο να αλληλεπιδράσουν και πάλι. Παρατηρούμε ότι η ενεργή πράκτορας υπόκειται στην αλλαγή και όχι η γειτονική πράκτορας. Αυτό συμβαίνει ώστε όλες οι πράκτορες, ακόμη και αυτές που βρίσκονται στα άκρα του κυψελοειδούς αυτόματου ή στις γωνίες του να έχουν την ίδια πιθανότητα να αλληλεπιδράσουν.

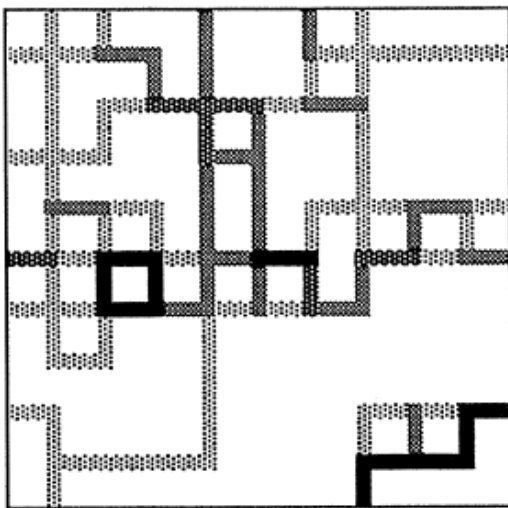
Μαθηματικά το μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ως μια διαδικασία Markov. Δυστυχώς τα μαθηματικά εργαλεία για την ανάλυση των διαδικασιών Markov, όπως πχ. η ανάλυση ιδιοδιανυσμάτων, δεν είναι εφαρμόσιμα στη συγκεκριμένη περίπτωση, μιας και η δυναμική του συστήματος είναι εξαιρετικά πολύπλοκη. Αναλυτική επίλυση του μοντέλου είναι για το λόγο αυτό αδύνατη, κατά συνέπεια η μέθοδος της προσομοίωσης αποτελεί το μοναδικό τρόπο μελέτης. Για το σκοπό αυτό μεταγράφηκε ο αλγόριθμος στη γλώσσα προγραμματισμού Pascal και το πρόγραμμα «έτρεξε» σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Τα αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης που διεξήγαγε ο Axelrod παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα 3.2.



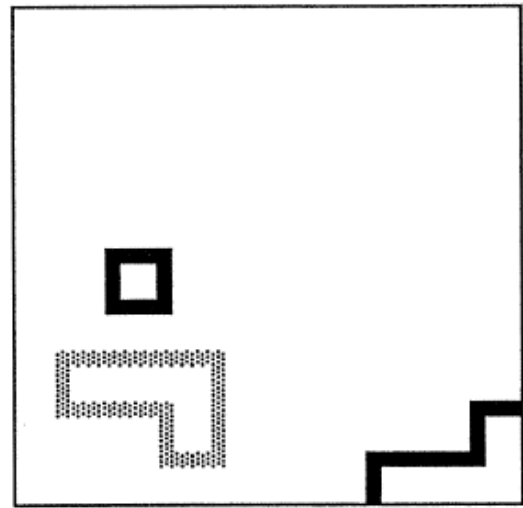
α) Αρχή



β) Έπειτα από 20.000 επαναλήψεις



γ) Έπειτα από 40.000 επαναλήψεις



δ) Έπειτα από 80.000 επαναλήψεις

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα του Μοντέλου της Πολιτισμικής Διασποράς (Axelrod 1997:157). Η ομοιότητα του πολιτισμού μεταξύ δύο γειτονικών κελιών κωδικοποιείται ως εξής: μαύρο = 0% ή 20%, σκούρο γκρι = 40%, γκρι = 60%, ανοιχτό γκρι = 80% και λευκό = 100%. Κάθε κουλτούρα περιλαμβάνει 5 χαρακτηριστικά και κάθε χαρακτηριστικό έχει 10 τιμές. Τα εσωτερικά κελιά έχουν 4 γειτονικά (βόρεια, νότια, ανατολικά και δυτικά, περιοχή Von Neumann, βλέπε παράγραφο 8.3 της παρούσας διατριβής).

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, στον πίνακα 3.2 δίνουμε 4 χάρτες του κυψελοειδούς αυτόματου, που αντιστοιχούν στην κατάσταση του συστήματος

αρχικά, έπειτα από 20.000 επαναλήψεις, έπειτα από 40.000 και έπειτα από 80.000 επαναλήψεις. Η παρουσίαση επικεντρώνεται όχι στον ίδιο πολιτισμό που υπάρχει σε κάθε κελί, αλλά στην ομοιότητα των πολιτισμών που βρίσκονται σε γειτονικά κελιά, η οποία κωδικοποιείται με βάση το χρώμα της κοινής πλευράς των δύο κελιών ως εξής: μαύρο = 0% ή 20%, σκούρο γκρι = 40%, γκρι = 60%, ανοιχτό γκρι = 80% και λευκό = 100%. Στον χάρτη α της προσομοίωσης, στον πίνακα 3.2, παρατηρούμε ότι όλα τα κελιά έχουν αρχικά μια διαφορετική κουλτούρα, μιας και σχεδόν όλα τα όρια μεταξύ των κελιών είναι μαύρα. Ο χρόνος μετريέται σε επαναλήψεις (iterations) του αλγορίθμου. Κάθε επανάληψη αντιστοιχεί στην ενεργοποίηση ενός κελιού, όπως εξηγήσαμε κατά την παρουσίαση του αλγορίθμου. Μετά από 20.000 επαναλήψεις του αλγορίθμου όμως (χάρτης β του πίνακα 3.2) παρατηρούμε ότι πολλά όρια κελιών έχουν εξαφανιστεί και έχουν σχηματιστεί περιοχές με ομοειδή κουλτούρα των δύο, τριών, τεσσάρων ή και πέντε κελιών. Ονομάζουμε *περιοχή πολιτισμού (cultural region)* ένα σύνολο από κελιά που συνορεύουν μεταξύ τους και έχουν την ίδια ακριβώς κουλτούρα. Έπειτα από 40.000 επαναλήψεις (χάρτης γ του πίνακα 3.2) οι περιοχές πολιτισμών έχουν γίνει μεγαλύτερες και πολλά όρια κελιών έχουν χρώμα ανοιχτό γκρι, γεγονός που σημαίνει ότι ανάμεσα στα γειτονικά κελιά οι κουλτούρες διαφέρουν μόνο ως προς ένα χαρακτηριστικό. Στις 80.000 επαναλήψεις (χάρτης δ του πίνακα 3.2) έχουν απομείνει μόνο τέσσερις περιοχές πολιτισμών. Στις 81.000 επαναλήψεις η περιοχή του χάρτη γ που περιβάλλεται από ανοιχτό γκρι χρώμα έχει απορροφηθεί από την μεγαλύτερη περιοχή, αφήνοντας το σύστημα με τρεις περιοχές πολιτισμών σαν τελική κατάσταση, δύο από τις οποίες έχουν ένα πολύ μικρό αριθμό κελιών. Οι περιοχές αυτές είναι σταθερές, καθώς τα γειτονικά τους κελιά δεν έχουν κάποιο κοινό χαρακτηριστικό και κατά συνέπεια δεν υπάρχει δυνατότητα αλληλεπίδρασης. Η νοτιοανατολική περιοχή πολιτισμού στο χάρτη δ, που αποτελείται από τέσσερα κελιά και διαμορφώθηκε σε μια τελική κατάσταση, είχε σχηματιστεί προγενέστερα και μπορεί να ανιχνευθεί στο χάρτη β ανάμεσα σε πολλές άλλες περιοχές (του χάρτη β) που διαφέρουν εξ ολοκλήρου (100% διαφορετικά χαρακτηριστικά) από όλα τα γειτονικά τους κελιά. Μελετώντας το χάρτη β όμως, πριν τη διεξαγωγή της προσομοίωσης, δεν υπάρχει τρόπος να προβλεφθεί ποιες περιοχές πολιτισμών θα επιβιώσουν και ποιες θα απορροφηθούν από άλλες μεγαλύτερες.

Η όλη παρουσίαση μας βοηθά να αποσαφηνίσουμε το μηχανισμό με τον οποίο σχηματίζονται οι περιοχές πολιτισμών. Αρχικά οι πολιτισμοί των περισσότερων γειτονικών κελιών παρουσιάζουν μικρή ομοιότητα, άρα είναι απίθανο να πραγματοποιηθεί αλληλεπίδραση μεταξύ των κελιών αυτών. Έπειτα όμως από κάθε

αλληλεπίδραση, η ομοιότητα των πολιτισμών αυξάνει και κατά συνέπεια είναι περισσότερο πιθανό για τα συγκεκριμένα κελιά να αλληλεπιδράσουν στο μέλλον. Όσο ο χρόνος περνά (ο αριθμός των επαναλήψεων αυξάνει), κάποια χαρακτηριστικά των πολιτισμών επικρατούν σε περιοχές με όλο και μεγαλύτερο μέγεθος. Τελικά σχηματίζονται περιοχές όπου όλα τα κελιά έχουν όλα τα χαρακτηριστικά τους όμοια.

3.1.2. Διερεύνηση των Παραγόντων που καθορίζουν τον Αριθμό των Πολιτισμών που επιβιώνουν

Ένα πολύ σημαντικό ερώτημα είναι πόσες περιοχές πολιτισμών θα επιβιώσουν σε μια κοινωνία και από ποιους παράγοντες εξαρτάται ο αριθμός αυτός. Παρότι όλες οι κοινωνικές αλληλεπιδράσεις στο μοντέλο προωθούν τη σύγκλιση μεταξύ γειτόνων, η διαδικασία σύγκλισης μπορεί να σταματήσει και να έχουν επιζήσει πολλές περιοχές πολιτισμών, καθεμιά από τις οποίες είναι εντελώς διαφορετική από όλες τις άλλες με τις οποίες συνορεύει. Στο προηγούμενο παράδειγμα τρεις περιοχές πολιτισμών επέζησαν ως την τελική κατάσταση. Αυτό είναι σύνηθες κάτω από τις ίδιες προϋποθέσεις, με διαφορετικές τυχαίες αρχικές συνθήκες. Σε 100 παρόμοιες προσομοιώσεις που διεξήχθησαν με σκοπό να επιβεβαιώσουν ότι το αποτέλεσμα που παρουσιάστηκε στο σχήμα 3.1 δεν οφείλεται στην συγκεκριμένη τυχαία αρχική συνθήκη αλλά χαρακτηρίζει τις υποθέσεις και τις παραμέτρους του μοντέλου, ο μέσος όρος των σταθερών περιοχών πολιτισμών που επέζησαν στην τελική κατάσταση ήταν τρεις και στις 14 από αυτές τις 100 προσομοιώσεις υπήρξε τελικά μία σταθερή τελική περιοχή πολιτισμών, ενώ σε 10 από αυτές υπήρξαν περισσότερες από 6 (Axelrod 1997a).

Όπως συμβαίνει στα περισσότερα δραστοστρεφή μοντέλα, μεταβάλλοντας τις τιμές κάποιων παραμέτρων μπορεί κανείς να επιδοθεί σε ένα είδος πειραματικού χειρισμού. Με τον τρόπο αυτό το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της σχέσης του αριθμού των σταθερών τελικών περιοχών πολιτισμών με άλλους παράγοντες, όπως η πολυπλοκότητα του πολιτισμού, το μέγεθος της περιοχής αλληλεπίδρασης του κάθε πράκτορα και το μέγεθος της γεωγραφικής περιοχής. Θα θεωρήσουμε λοιπόν σαν «εξαρτημένη μεταβλητή» τον αριθμό των περιοχών πολιτισμού που επιβιώνουν και ανεξάρτητες μεταβλητές τον αριθμό των χαρακτηριστικών των πολιτισμών (number of features), τον αριθμό των τιμών κάθε χαρακτηριστικού (number of traits) (αυτές οι δύο μεταβλητές αφορούν στην πολυπλοκότητα κάθε πολιτισμού), τον

αριθμό των γειτονικών κελιών όπου μπορεί να λάβει χώρα αλληλεπίδραση (size of the neighborhood) και το μέγεθος της γεωγραφικής περιοχής δηλαδή του κυψελοειδούς αυτόματου (size of the geographic territory).

Όσον αφορά στο μοντέλο, η πολυπλοκότητα ενός πολιτισμού εξαρτάται από δύο παράγοντες, τον αριθμό των χαρακτηριστικών του πολιτισμού και τον αριθμό των τιμών κάθε χαρακτηριστικού. Στο παράδειγμά μας κάθε πολιτισμός είχε 5 χαρακτηριστικά και κάθε χαρακτηριστικό μπορούσε να πάρει 10 διαφορετικές τιμές. Μια εύλογη υπόθεση θα μπορούσε να είναι η εξής: αν ο πολιτισμός ήταν πιο πολύπλοκος, υπήρχε δηλαδή μεγαλύτερη ποικιλία χαρακτηριστικών και τιμών του κάθε χαρακτηριστικού, τότε θα ήταν μεγαλύτερος ο αριθμός των σταθερών τελικών περιοχών πολιτισμού. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζουμε το μέσο όρο των τελικών περιοχών πολιτισμού που προκύπτουν αν επαναλάβουμε την προσομοίωση για κάθε δυνατό συνδυασμό 5, 10 και 15 χαρακτηριστικών με 5, 10 ή 15 τιμές για κάθε χαρακτηριστικό.

Μέσος Όρος των Τελικών Περιοχών Πολιτισμού			
	Αριθμός των τιμών (traits) για κάθε χαρακτηριστικό (feature)		
Αριθμός των χαρακτηριστικών του πολιτισμού (number of cultural features)	5	10	15
5	1.0	3.2	20.0
10	1.0	1.0	1.4
15	1.0	1.0	1.2

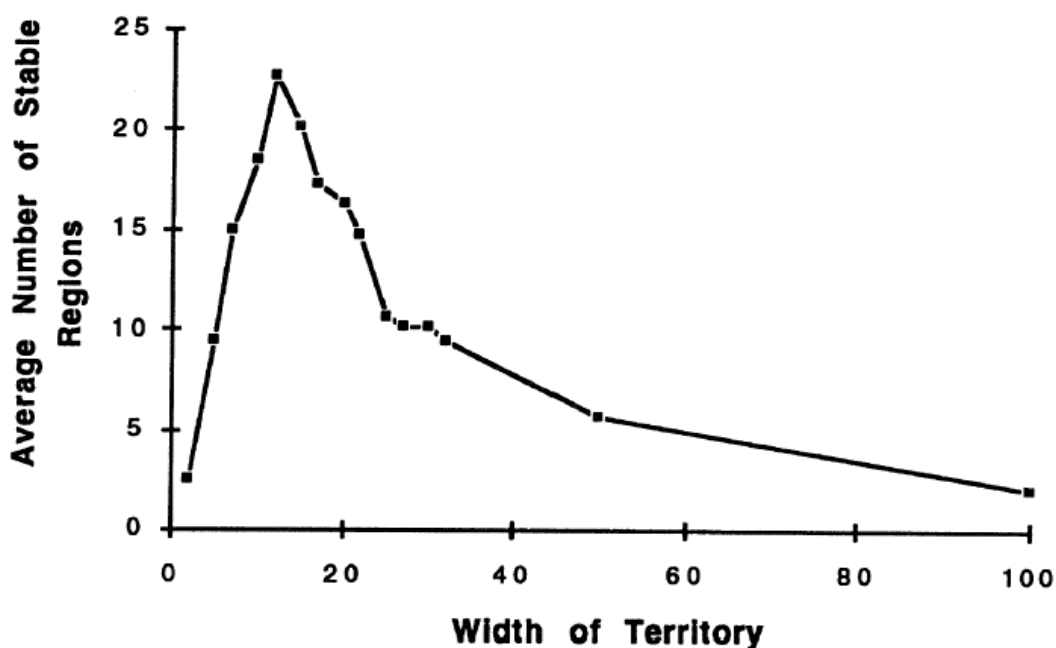
Πίνακας 3.3: Μέσος όρος των Τελικών Περιοχών Πολιτισμού που προκύπτουν αν επαναλάβουμε την προσομοίωση για κάθε δυνατό συνδυασμό 5, 10 και 15 χαρακτηριστικών με 5, 10 ή 15 τιμές για κάθε χαρακτηριστικό (Axelrod 1997a:160). Το κυψελοειδές αυτόματο έχει διάσταση 10x10 και κάθε κελί μπορεί να αλληλεπιδράσει με τα 4 γειτονικά του.

Από τον πίνακα 3.3 συμπεραίνουμε ότι *όσο ο αριθμός των χαρακτηριστικών αυξάνει, τόσο αυξάνει και ο αριθμός των τελικών περιοχών πολιτισμού*. Αυτό συμβαίνει γιατί όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των χαρακτηριστικών ενός πολιτισμού, τόσο μεγαλώνει και η πιθανότητα δύο γειτονικά κελιά να έχουν κάποια κοινή τιμή για κάποιο από τα χαρακτηριστικά και έτσι να αλληλεπιδράσουν. *Όσο όμως αυξάνεται ο αριθμός των τιμών κάθε χαρακτηριστικού, τόσο μειώνεται ο αριθμός των τελικών περιοχών*

πολιτισμού. Η ύπαρξη πολλών τιμών για κάθε χαρακτηριστικό μειώνει την πιθανότητα δύο γειτονικών κελιών να έχουν την ίδια τιμή για κάποιο χαρακτηριστικό και έτσι να αλληλεπιδράσουν. Θα πρέπει λοιπόν να διαχωρίσουμε την έννοια της πολυπλοκότητας του πολιτισμού για να συμπεράνουμε πώς επιδρά στον αριθμό των τελικών περιοχών πολιτισμού που επιβιώνουν.

Στη συνέχεια θα διερευνηθεί η επίδραση του μεγέθους της περιοχής, δηλαδή ο αριθμός των γειτονικών κελιών που κάθε κελί μπορεί να αλληλεπιδράσει στη διαδικασία σχηματισμού των πολιτισμών. Στο αρχικό παράδειγμα είχαμε θεωρήσει για κάθε κελί ως γειτονικά του κελιά τα τέσσερα που βρίσκονται ανατολικά, δυτικά, βόρεια και νότια από αυτό. Μπορούμε να προσθέσουμε σε αυτά και τα 4 κελιά που βρίσκονται στις διαγώνιες και να έχουμε έτσι περιοχή με 8 γειτονικά κελιά. Μπορούμε ακόμη να προσθέσουμε στα 8 αυτά κελιά άλλα 4 που βρίσκονται και πάλι ανατολικά, δυτικά, βόρεια και νότια, αλλά έχουν απόσταση 2 κελιών από το αρχικό και έτσι να έχουμε μια περιοχή με 12 γειτονικά κελιά σε σχήμα διαμαντιού. Διενεργώντας 10 προσομοιώσεις για την κάθε είδους περιοχή συμπεραίνουμε, όπως αναμέναμε, ότι *αν θεωρήσουμε ένα μεγαλύτερο αριθμό κελιών ως γειτονικά (μεγαλύτερες περιοχές με δυνατότητα αλληλεπίδρασης), αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό λιγότερων σταθερών περιοχών πολιτισμού.*

Η τελευταία διερεύνηση αφορά στην επίδραση του μεγέθους της γεωγραφικής περιοχής (size of the geographic territory), δηλαδή του κυψελοειδούς αυτόματου, στον αριθμό των περιοχών πολιτισμού που επιβιώνουν τελικά. Θα μπορούσε να υποθέσει κανείς ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της γεωγραφικής περιοχής, τόσο μεγαλύτερος θα είναι και ο αριθμός των τελικών περιοχών πολιτισμού που επιβιώνουν. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζουμε τη συνάρτηση των δύο μεγεθών υπό μελέτη.



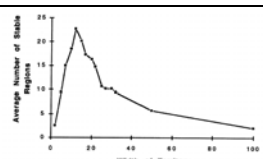
Σχήμα 3.1: Μέσος αριθμός των περιοχών τελικών σταθερών περιοχών πολιτισμού (average number of stable regions) σε συνάρτηση με το μέγεθος της γεωγραφικής περιοχής (width of territory) (Axelrod 1997a:162). Οι παράμετρες της προσομοίωσης είναι 5 χαρακτηριστικά για την κάθε κουλτούρα, 15 τιμές για το κάθε χαρακτηριστικό και 4 γειτονικά κελιά με δυνατότητα αλληλεπίδρασης. Για κάθε μέγεθος γεωγραφικής περιοχής η προσομοίωση επαναλήφθηκε 40 φορές, εκτός από τις περιπτώσεις 50x50 και 100x100, για τις οποίες η προσομοίωση διενεργήθηκε 10 φορές.

Η προσομοίωση επαναλήφθηκε 40 φορές για μεγέθη γεωγραφικής περιοχής από 2x2 ως 35x35 και 10 φορές για τα μεγέθη 50x50 και 100x100. *Ο αριθμός των σταθερών περιοχών πολιτισμού που επιβιώνουν αυξάνει με την αύξηση της γεωγραφικής περιοχής ώσπου φτάνει ένα μέγιστο ίσο με 23 περιοχές πολιτισμού για γεωγραφική περιοχή μεγέθους 12x12 κελιών. Στη συνέχεια ο μέσος όρος των τελικών περιοχών πολιτισμού μειώνεται σε περίπου 6 για γεωγραφική περιοχή μεγέθους 50x50 κελιών και σε 2 για περιοχή μεγέθους 100x100 κελιών.*

Στη συνέχεια του άρθρου ο Άξελροντ ερμηνεύει το μηχανισμό που λειτούργησε πίσω από αυτό το απροσδόκητο, αναδυόμενο (emergent) αποτέλεσμα. Για την επεξήγηση του μηχανισμού απαιτούνται αρκετοί νέοι ορισμοί εννοιών, όπως διάλεκτος, ζώνη πολιτισμού και άλλοι, καθώς και διεξαγωγή μεγάλου αριθμού

προσομοιώσεων, η αναλυτική παρουσίαση των οποίων ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας διατριβής.

Ανακεφαλαιώνοντας, στον πίνακα 5.3 συνοψίζουμε τους τέσσερις νόμους που συνήγαγε ο Άξελροντ από τη διερεύνηση του μοντέλου.

<i>Αριθμός των χαρακτηριστικών – τελικός αριθμός περιοχών πολιτισμού</i>	
<i>Αριθμός των τιμών των χαρακτηριστικών – τελικός αριθμός περιοχών πολιτισμού</i>	
<i>Αριθμός των κελιών που θεωρούνται γειτονικά και μπορούν να αλληλεπιδράσουν – τελικός αριθμός περιοχών πολιτισμού</i>	
<i>Μέγεθος της γεωγραφικής περιοχής – τελικός αριθμός περιοχών πολιτισμού</i>	

Πίνακας 3.4: Ανακεφαλαίωση των νόμων που προέκυψαν από την μελέτη του μοντέλου πολιτισμικής διασποράς. Η «εξαρτημένη μεταβλητή» είναι αριθμός των περιοχών πολιτισμού που επιβιώνουν (οι κουλτούρες) και οι «ανεξάρτητες» ο αριθμός των χαρακτηριστικών των πολιτισμών, ο αριθμός των τιμών για κάθε χαρακτηριστικό, ο αριθμός των γειτονικών κελιών όπου μπορεί να λάβει χώρα αλληλεπίδραση και το μέγεθος της γεωγραφικής περιοχής, δηλαδή του κυψελοειδούς αυτόματου. Τα τόξα δηλώνουν συµμεταβολή των δύο μεταβλητών, είτε προς την ίδια κατεύθυνση, είτε αντίστροφα.

Κάθε κελί στην αριστερή στήλη του πίνακα 3.4 ορίζει δύο μεταβλητές του μοντέλου. Τα τόξα στη δεξιά στήλη δηλώνουν ότι οι δύο μεταβλητές συµμεταβάλλονται, είτε προς την ίδια κατεύθυνση, δηλαδή όταν αυξάνεται η μία μεταβλητή αυξάνεται και η άλλη, είτε αντίστροφα όταν αυξάνεται η μια μεταβλητή μειώνεται η άλλη. Στην τελευταία γραμμή η σχέση των δύο μεταβλητών δίνεται από μια συνάρτηση, όπως αναλύθηκε διεξοδικά στην σελίδα που προηγήθηκε.

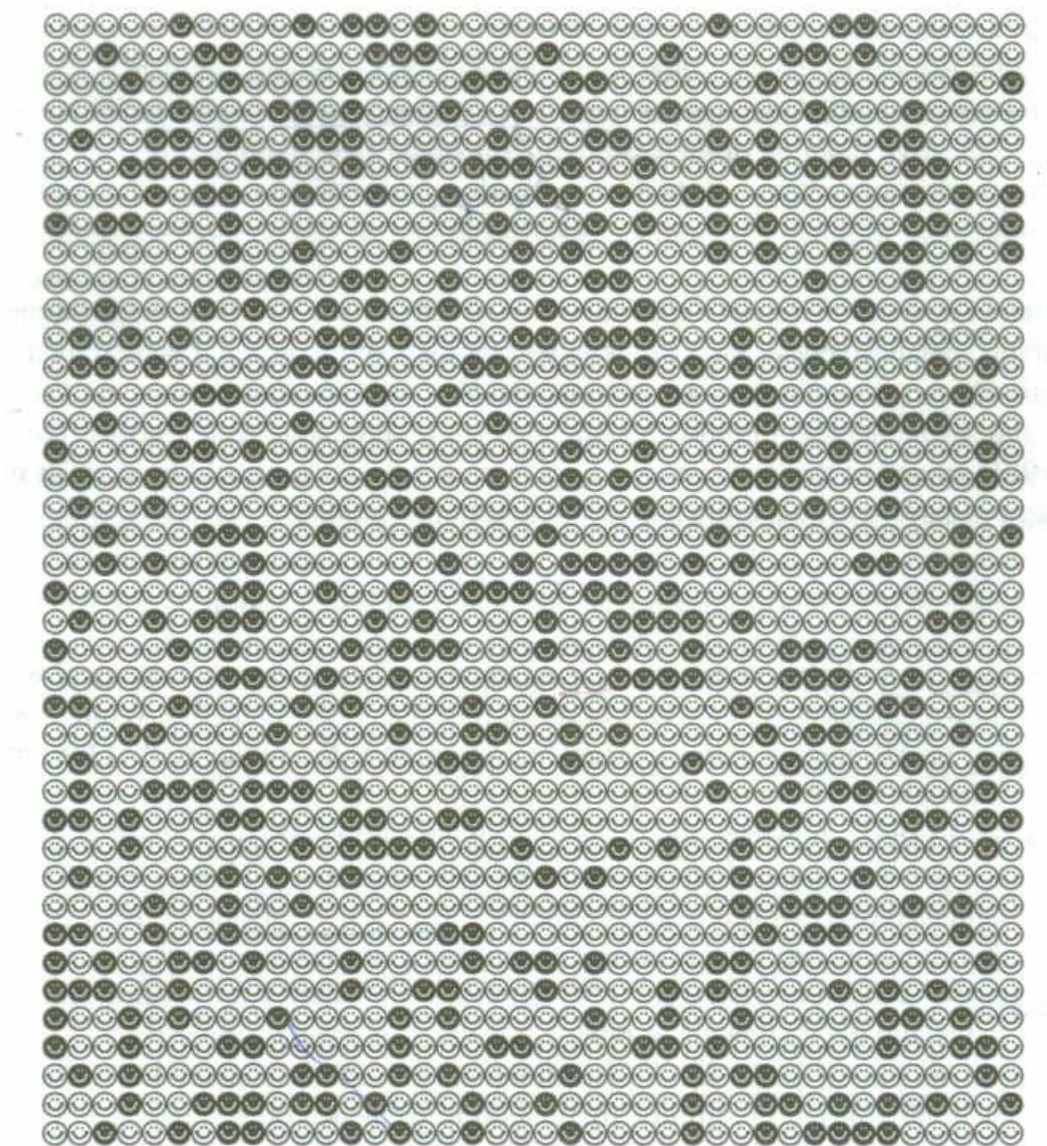
3.2. Μοντέλο της Θεωρίας της Κοινωνικής Απήχησης των Nowak και Latané

Το επόμενο μοντέλο δυναμικής εξέλιξης των γνώμων που θα παρουσιαστεί στην παρούσα ενότητα είναι το *μοντέλο κοινωνικής απήχησης των Nowak και Latané (model of dynamic social impact theory)*. Το δραστοστρεφές αυτό μοντέλο αποτελεί μια δυναμική εκδοχή της *θεωρίας της κοινωνικής απήχησης (social impact theory)* των Nowak και Latané, το οποίο επεκτείνει τη θεωρία και, σύμφωνα με τους κατασκευαστές του, διερευνά κάποιες συνέπειές της, οι οποίες είναι αδύνατο να διερευνηθούν με χρήση οποιασδήποτε άλλης ερευνητικής μεθόδου.

Στο χώρο της κοινωνικής ψυχολογίας, τα τελευταία χρόνια υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τη σχέση των μειονοτήτων και των πλειοψηφιών (Moscovici 1980, Latané 1996). Έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για να κατανοηθεί το γεγονός ότι, παρά την τάση για ομοιομορφία στις ομάδες που οι άνθρωποι σχηματίζουν, δεν έχει υπάρξει καθολική συμφωνία στον κόσμο για κανένα ζήτημα. Οι Latané & Nowak (1997), στα πλαίσια της επιστήμης της πολυπλοκότητας, υποστηρίζουν ότι η σχηματισμός των ομάδων (clustering) των ατόμων μπορεί να ερμηνευθεί αν θεωρήσουμε ότι είναι αναδυόμενο (emergent) φαινόμενο που προκαλείται από τις επαναλαμβανόμενες αλληλεπιδράσεις μεμονωμένων ατόμων.

Οι ίδιοι ορίζουν την έννοια της *κοινωνικής απήχησης (social impact)* αρκετά γενικά ως μια αλλαγή στα υποκειμενικά συναισθήματα, τα κίνητρα, τις συγκινήσεις ή τις πεποιθήσεις ενός ατόμου ως αποτέλεσμα των ενεργειών άλλων ατόμων. Ο Latané (1981) πρότεινε ότι η κοινωνική απήχηση είναι ανάλογη με το γινόμενο της δύναμης (strength) (π.χ. θέση, πειθώ, ελκυστικότητα, κ.λπ.), της αμεσότητας (immediacy) (κοντινή απόσταση χωρική ή χρονική) και του αριθμού των ανθρώπων που επηρεάζουν ένα άτομο. Οι υποθέσεις αυτές φαίνονται αρκετά απλές, όμως έχει δειχθεί ότι ισχύουν σε μια ευρεία ποικιλία καταστάσεων. Βέβαια, όπως είναι διατυπωμένες, αποτελούν μια στατική και εξατομικευμένη θεωρία (Latané, 1996). Πολύ μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το ερώτημα: υποθέτοντας ότι ισχύει η θεωρία της κοινωνικής απήχησης, τι συμβαίνει εάν έχουμε έναν πληθυσμό ανθρώπων όπου όλοι αλληλοεπηρεάζονται σύμφωνα με τις βασικές της προϋποθέσεις; Η καταλληλότερη και ίσως ακόμα η μοναδική μέθοδος για τη διερεύνηση του προηγούμενου ερωτήματος είναι η κατασκευή ενός δραστοστρεφούς μοντέλου και η διεξαγωγή προσομοίωσης (Latané, 1996).

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε ένα παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου, που αναφέρεται στο άρθρο των Nowak και Latané «Self-Organizing Social Systems: Necessary and Sufficient Conditions for the Emergence of Clustering, Consolidation and Continuing Diversity (Latané & Nowak, 1997). Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η κατανομή των στάσεων 1600 ατόμων ενός υποθετικού χωριού πριν αρχίσει η συζήτηση για ένα συγκεκριμένο θέμα.



Σχήμα 3.2: Αρχική τυχαία κατανομή των στάσεων 1600 ατόμων, όπου η μειονότητα (μαύρα πρόσωπα) αποτελεί το 30% του πληθυσμού (Latané & Nowak, 1997:49).

Σε κάθε χαμογελαστό πρόσωπο αντιστοιχεί ένα άτομο (πράκτορας). Τα άτομα αυτά είναι τοποθετημένα σε ένα κυψελοειδές αυτόματο 40x40. Μπορούμε να φανταστούμε ότι οι 1600 ενήλικες κάτοικοι του χωριού είναι καθισμένοι στην αίθουσα

συνεδριάσεων, στη διάταξη που φαίνεται στο σχήμα και πρόκειται να αποφασίσουν για ένα σημαντικό ζήτημα που έχει προκύψει. Για παράδειγμα μέσω ενός προγράμματος έχουν δοθεί στο σχολείο 15.000 ευρώ και μπορούν να επιλεγεί είτε να εμπλουτισθεί η βιβλιοθήκη του σχολείου είτε να αγοραστεί ένας προβολέας μαζί με εκπαιδευτικό υλικό. Τα άσπρα πρόσωπα αντιστοιχούν στα άτομα που ενστερνίζονται τη γνώμη της πλειοψηφίας (majority), ενώ τα μαύρα τη γνώμη της μειοψηφίας (minority), που αρχικά αποτελεί το 30% του συνόλου. Η γνώμη λοιπόν των ατόμων μπορεί να πάρει μόνο δύο τιμές (binary opinion dynamics). Η αρχική κατανομή είναι τυχαία μιας και το ζήτημα που προέκυψε είναι νέο. Τι θα συμβεί όταν τα 1600 αυτά άτομα αρχίσουν να συνομιλούν; Χωρίζουμε την ερώτηση αυτή σε δύο επιμέρους ερωτήσεις που αντιστοιχούν στο μικρο και μακρο επίπεδο. Τι θα συμβεί σε κάποιο συγκεκριμένο τυχαίο άτομο π.χ. στο άτομο που βρίσκεται στην 16^η σειρά, στην 39^η στήλη και που είναι εκτεθειμένο στο κοινωνικό περιβάλλον που απεικονίζεται στο σχήμα 5.3 και ποιο θα είναι το αναδυόμενο (emergent) αποτέλεσμα στο μακρο επίπεδο μετά την επαναλαμβανόμενη διαδικασία κοινωνικής επιρροής που θα λάβει χώρα ξεχωριστά για κάθε άτομο;

Το μοντέλο αυτό, όπως και όλα τα δραστοστρεφή μοντέλα θέτει τις υποθέσεις στο μικρο επίπεδο και μετά τη διεξαγωγή της προσομοίωσης διερευνά τα αποτελέσματα στο μακρο επίπεδο. Στο μικρο επίπεδο, ο Latané (1981) τεκμηρίωσε, σε μια μεγάλη γκάμα συνθηκών, ότι η επίδραση μιας ομάδας ατόμων σε ένα άλλο άτομο $\hat{i}$ είναι συνάρτηση των παρακάτω παραγόντων, σύμφωνα με τον τύπο

$$\hat{i} = f(SIN)$$

όπου $\hat{i}$ είναι η ολική επιρροή που επιδρά πάνω στο άτομο, S είναι η μέση τιμή της δύναμης των άλλων μελών της ομάδας (strength), I είναι η μέση τιμή της εγγύτητας (immediacy), δηλαδή η απόσταση στο χώρο και το χρόνο και η δυνατότητα λεκτικής ή οπτικής επαφής και τέλος N είναι ο αριθμός των ατόμων που αποτελούν την πηγή της επιρροής. Επιπλέον έδειξε ότι η επιρροή ως συνάρτηση του N είναι μια δυναμοσυνάρτηση (power function), έτσι ώστε όταν το N μεγαλώνει (προστίθενται επιπλέον άτομα που επηρεάζουν) η επίδραση αυξάνει και πάλι, αλλά σε μικρότερο βαθμό, δηλαδή

$$\hat{i} = SN^t$$

Έχειδειχθεί ότι τα εμπειρικά δεδομένα ταιριάζουν καλύτερα με τον προηγούμενο τύπο, όταν το t λαμβάνει την τιμή $\frac{1}{2}$ (Latané & Harkins 1976, Latané & Wolf, 1981).

Για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης οι Latané & Nowak (1997) διέκριναν δύο μορφές κοινωνικής επιρροής, τη **δύναμη της πειθούς** (*persuasive impact*) ή αλλιώς το βαθμό που μπορεί ένα άτομο να πείσει άλλα άτομα που έχουν αντίθετη γνώμη με αυτό να αλλάξουν γνώμη και την **υποστηρικτική δύναμη** (*supportive impact*) ή αλλιώς το βαθμό που μπορεί ένα άτομο να βοηθήσει άλλα άτομα που έχουν την ίδια γνώμη με αυτό να αντιμετωπίσουν τα επιχειρήματα των ατόμων με αντίθετη γνώμη. Υπέθεσαν ότι τα άτομα διαφέρουν στην ικανότητά τους να εφαρμόζουν τις δύο αυτές μορφές επιρροής, και ότι οι δύο αυτές δυνάμεις έχουν συντελεστή συσχέτισης μηδέν (uncorrelated) καθώς και ότι η επίδραση των δύο αυτών δυνάμεων είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης των δύο ατόμων. Τελικά υπολόγισαν τη συνολική επίδραση σαν N φορές τη μέση επίδραση του κάθε ατόμου.

Σε κάθε επανάληψη, ο υπολογιστής υπολογίζει για κάθε άτομο τη συνολική επίδραση της πειθούς που υποστηρίζει την αλλαγή της γνώμης και τη συνολική επίδραση που υποστηρίζει τη διατήρηση της ίδιας γνώμης. Η επίδραση της δύναμης της πειθούς (*persuasive impact*) δίνεται από τον τύπο

$$i_p = \frac{N_p^{1/2} * \frac{p_i}{d_i^2}}{N_p}$$

όπου i_p συμβολίζει την επίδραση της δύναμης της πειθούς, N_p τον αριθμό των ατόμων με αντίθετη γνώμη, p_i την πειθώ (*persuasiveness*) του ατόμου i και d_i την Ευκλείδεια απόσταση του ατόμου i . Σύμφωνα με τον προηγούμενο τύπο, η επίδραση της δύναμης της πειθούς από την ομάδα που υποστηρίζει την αντίθετη γνώμη είναι η μέση τιμή της δύναμης (η πειθώ δια το τετράγωνο της απόστασης) για κάθε άτομο που υποστηρίζει την αντίθετη άποψη, πολλαπλασιαζόμενη με την τετραγωνική ρίζα του αριθμού των ατόμων της αντίθετης γνώμης. Για να διευκολυνθεί η ταχύτητα των

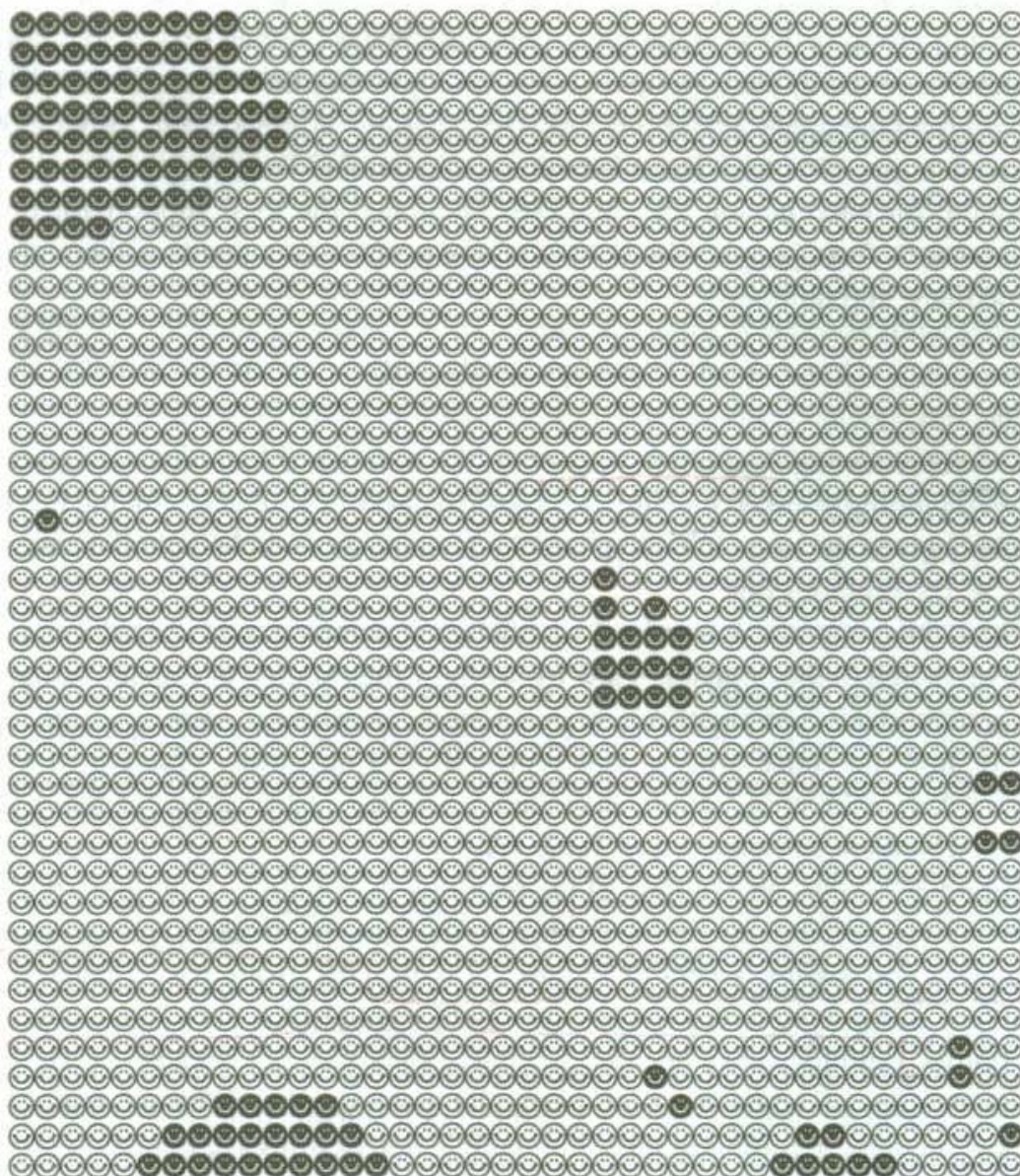
υπολογισμών, μόνο τα άτομα που απέχουν απόσταση μικρότερη από 10 συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς.

Στη συνέχεια, για κάθε άτομο, ο υπολογιστής υπολογίζει την ολική στήριξη για τη διατήρηση της γνώμης του από τα άτομα που έχουν την ίδια γνώμη. Η υποστηρικτική επιρροή i_s (supportive impact) δίνεται από τον τύπο

$$i_s = \frac{N_s^{1/2} * \frac{S_i}{d_i^2}}{N_s}$$

όπου N_s συμβολίζει τον αριθμό των ατόμων με την ίδια γνώμη, S_i την υποστήριξη (supportiveness) του ατόμου i και d_i την Ευκλείδεια απόσταση του ατόμου i .

Σε κάθε επανάληψη, ο υπολογιστής υπολογίζει αν κάθε άτομο θα διατηρήσει την ίδια γνώμη ή θα αλλάξει τη γνώμη του συγκρίνοντας το μέγεθος της επίδρασης της δύναμης πειθούς i_p και της υποστηρικτικής επιρροής i_s (supportive impact). Αν κάποιο άτομο αλλάξει γνώμη, η δύναμη της πειθούς και της επιρροής καθορίζονται εκ νέου τυχαία και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται, ώσπου το σύστημα να φτάσει σε μία τελική κατάσταση όπου καμία αλλαγή γνώμης δεν είναι πλέον δυνατή. Στον σχήμα 3.3 φαίνεται η τελική κατανομή των γνώμων έπειτα από 18 επαναλήψεις. Τα μέλη της μειονότητας από 30% έχουν περιοριστεί σε 8%.



Σχήμα 3.3: Τελική κατανομή των γνώμων έπειτα από 18 επαναλήψεις (κατάσταση ισορροπίας). Τα μέλη της μειονότητας από 30% έχουν περιοριστεί σε 8%. (Latané & Nowak, 1997:50).

Παρατηρούμε ότι τα μέλη της μειονότητας έχουν οργανωθεί σε (γεωγραφικές) υποομάδες, βρίσκονται το ένα κοντά στο άλλο και τα περισσότερα στις άκρες του κυψελοειδούς αυτομάτου. Η γεωγραφική αυτή αυτοοργάνωση του συστήματος δεν οφείλεται σε μετακινήσεις των ατόμων σε καλύτερες περιοχές αλλά προκύπτει από τις διαδικασίες της κοινωνικής επιρροής. Μετακινήθηκαν οι γνώμες και όχι τα άτομα. Τα ελάχιστα άτομα της μειονότητας που επιβίωσαν χωρίς να έχουν γύρω τους άλλα μέλη της μειονότητας είχαν μεγάλη υποστηρικτική επιρροή (supportive

impact) και περιτριγυρίζονταν από άτομα της πλειοψηφίας με χαμηλή δύναμη πειθούς (persuasive impact). Στην τελική κατάσταση ισορροπίας όλα τα άτομα ανήκαν στην πλειοψηφία, όσον αφορά στο γειτονικό τους μικρο επίπεδο, στο πώς δηλαδή τα ίδια αντιλαμβάνονταν τον περίγυρο.

Παρατηρούμε επίσης ότι, με δεδομένες τις υποθέσεις του μοντέλου, η ομάδα των 1600 ατόμων έχει φτάσει σε ισορροπία χωρίς να γίνει ομοιόμορφη. Με άλλα λόγια ακόμα και αν οι άνθρωποι συνέχιζαν να συζητούσαν, καμιά επιπλέον αλλαγή στη γνώμη κάποιου ατόμου δε θα λάμβανε χώρα. Οι Latané & Nowak (1997) υποστηρίζουν ότι η προσομοίωση αυτή καταδεικνύει ότι η επιβίωση των μειονοτήτων είναι αναμενόμενη, δίχως να τεθεί ως προϋπόθεση ότι η δύναμη πειθούς της μειονότητας έχει κάποια ειδικά πλεονεκτήματα (Moscovici, 1980).

Το αποτέλεσμα του σχήματος 5.4 είναι τυπικό όσες φορές και αν επαναλάβουμε την προσομοίωση, θέτοντας διαφορετική αρχική γεωγραφική κατανομή των γνώμων και διαφορετική υποστηρικτική επιρροή και δύναμη πειθούς για κάθε άτομο.

Το δραστοστρεφές αυτό μοντέλο έχει ντετερμινιστικά και στοχαστικά στοιχεία. Τυχαία είναι η αρχική κατανομή των γνώμων, η αρχική κατανομή των παραμέτρων της υποστηρικτικής επιρροής και της πειθούς προς αλλαγή καθώς και αλλαγή των παραμέτρων αυτών για κάθε άτομο, μετά από την αλλαγή της γνώμης του, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Λόγω των στοχαστικών στοιχείων της προσομοίωσης, η εξέλιξη της γνώμης οποιουδήποτε συγκεκριμένου ατόμου είναι μη προβλέψιμη και εξαρτάται κάθε φορά από τα στοχαστικά στοιχεία της προσομοίωσης. Όσον αφορά όμως τις ιδιότητες του συστήματος στο μακρο επίπεδο όπως το μέγεθος της μειονότητας που επιβιώνει και τη δημιουργία υποομάδων, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι προβλέψιμα και σταθερά, ανεξάρτητα από τα συγκεκριμένα στοχαστικά στοιχεία κάθε προσομοίωσης.

3.3. Το Μοντέλο Περιορισμένης Εμπιστοσύνης των

Hegselmann και Krause

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση του μοντέλου περιορισμένης εμπιστοσύνης (*bounded confidence model*) των Hegselmann και Crause. Το μοντέλο αυτό κατασκευάστηκε από τον Crause, δημοσιεύτηκε για πρώτη φορά στη διδακτορική του διατριβή και έχει διερευνηθεί και μελετηθεί συστηματικά σε μια πλειάδα παραλλαγών από ένα μεγάλο αριθμό ερευνητών (Krause 1997, 2000, Beckmann 1997, Dittmer 2000, 2001, Deffuant et al. 2001, Deffuant et al. 2002, Ben-Naim et al. 2003).

Το μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης διερευνά τη διαδικασία του σχηματισμού των γνώμων μιας μικρής ομάδας ή και μιας ολόκληρης κοινωνίας, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε συμφωνία (*consensus*), σχηματισμό δύο διαφορετικών αντίθετων γνώμων (*polarization*) ή και σχηματισμό ενός μεγάλου αριθμού γνώμων (*fragmentation*) (Hegselmann and Crause, 2002). Όσον αφορά στον πληθυσμό του οποίου θα μπορούσε να μελετηθεί η δυναμική εξέλιξη των γνώμων, μπορεί να θεωρηθεί μια μικρή ομάδα ειδικών που τους ζητείται από τα Ηνωμένα Έθνη να εκτιμήσουν ποιος θα είναι ο πληθυσμός της γης το 2030 και να καταθέσουν το πόρισμά τους. Μπορεί όμως η ομάδα να αποτελείται από ολόκληρο τον πληθυσμό μιας συγκεκριμένης κοινωνίας, στον οποίο τα άτομα επικοινωνούν μεταξύ τους σύμφωνα με κάποιο δίκτυο κοινωνικών αλληλεπιδράσεων. Κάθε πράκτορας εμπιστεύεται τη γνώμη άλλων πρακτόρων που ανήκουν σε μια επιλεγμένη ομάδα (διαθέτει περιορισμένη εμπιστοσύνη). Κατόπιν αλλάζει τη δική του γνώμη υιοθετώντας το μέσο όρο της γνώμης των πρακτόρων που εμπιστεύτηκε. Η ανάλυση του μοντέλου επικεντρώνεται στην κατηγοριοποίηση των τελικών καταστάσεων της κοινωνίας αυτής των πρακτόρων σε σχέση με τον τελικό αριθμό των ομάδων που σχηματίζονται. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αν όλοι τελικά συμφωνήσουν σε μια γνώμη έχουμε συμφωνία, αν καταλήξουν σε δύο ομάδες γνώμων έχουμε πόλωση και αν σχηματιστούν περισσότερες ομάδες έχουμε κατάτμηση.

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό θεωρούμε μια ομάδα πρακτόρων μεταξύ των οποίων λαμβάνει χώρα μια διαδικασία μετασχηματισμού των γνώμων τους για ένα συγκεκριμένο θέμα. Οι πράκτορες θα λάβουν υπόψη τους τη γνώμη κάποιων από τις υπόλοιπες πράκτορες για να μετασχηματίσουν τη δική τους γνώμη και συγκεκριμένα αυτών που έχουν γνώμη παρόμοια με τη δική τους. Θεωρούμε ότι η γνώμη κάθε πράκτορα εκφράζεται με έναν πραγματικό αριθμό μεταξύ του 0 και του 1. Οι

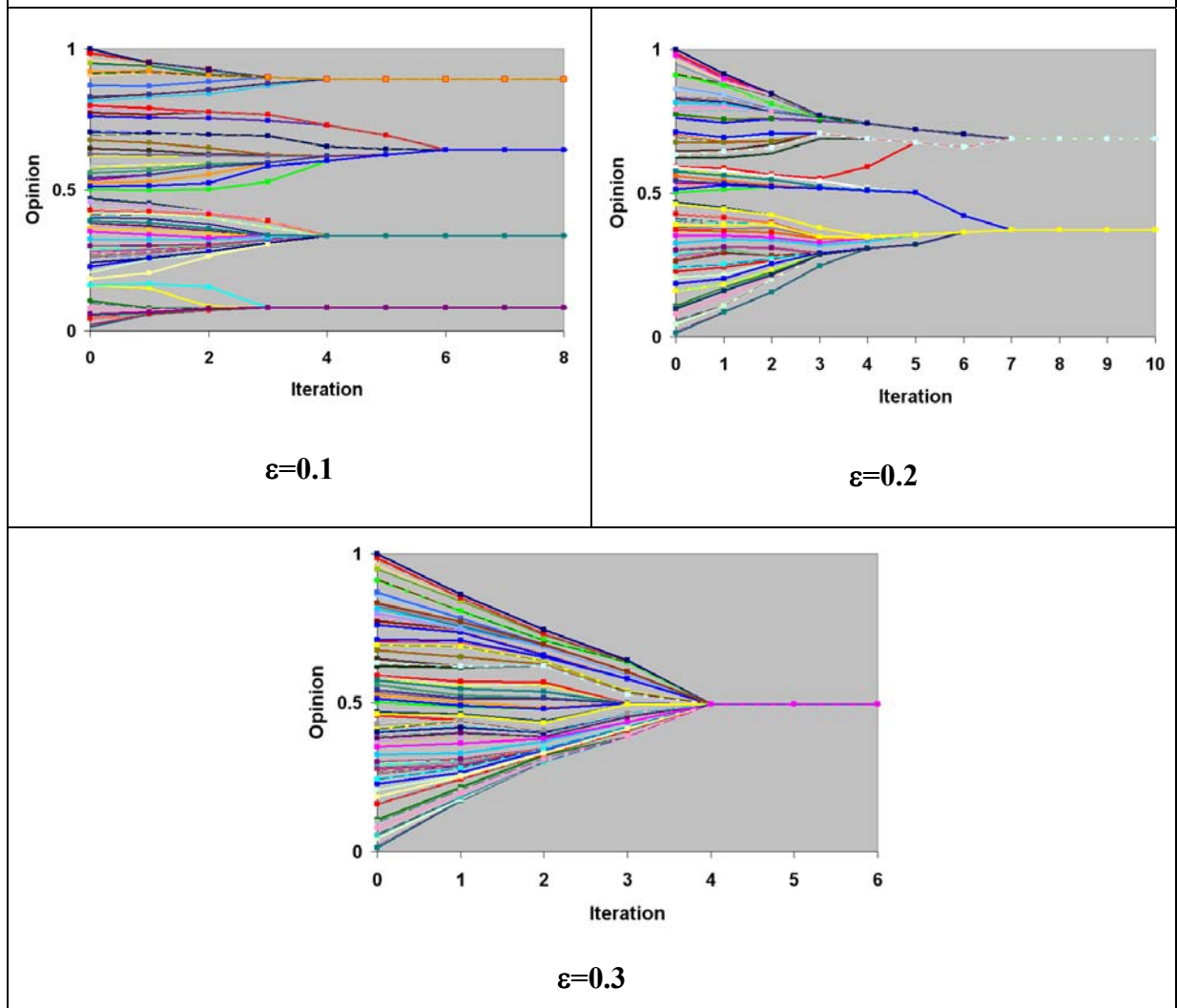
περιπτώσεις αυτές αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως συνεχή δυναμική των γνώμων (continuous opinion dynamics). Σε άλλες περιπτώσεις οι προσομοιώσεις προϋποθέτουν ότι οι γνώμες μπορούν να πάρουν μόνο διακριτές τιμές (discrete opinion dynamics) ή ακόμη πιο συγκεκριμένα οι γνώμες μπορούν να πάρουν μόνο δύο τιμές (binary opinion dynamics). Ο χρόνος παίρνει διακριτές τιμές που ονομάζονται επαναλήψεις (iterations). Κάθε πράκτορας θα λάβει υπόψη του τις γνώμες των άλλων, που δε διαφέρουν από τη δική του περισσότερο από το φράγμα εμπιστοσύνης ε (bound of confidence). Στη συνέχεια, από τις γνώμες αυτές, θα υπολογίσει το μέσο όρο και θα αλλάξει τη γνώμη του, εξισώνοντάς τη με το μέσο όρο. Αν για παράδειγμα η γνώμη κάποιου πράκτορα είναι ίση με 0.35 και το φράγμα εμπιστοσύνης ε ισούται με 0.2, τότε ο πράκτορας θα επηρεαστεί μόνο από τις γνώμες που βρίσκονται ανάμεσα στο $0.35-0.2=0.15$ και στο $0.35+0.2=0.55$. Το διάστημα $[0.15,0.55]$ ονομάζεται *διάστημα εμπιστοσύνης* (confidence interval). Ο μέσος όρος των γνώμων που βρίσκονται μέσα σ' αυτό το διάστημα θα αποτελέσει τη νέα γνώμη του προηγούμενου πράκτορα. Η αλλαγή των γνώμων όλων των πρακτόρων γίνεται ταυτόχρονα (simultaneous updating).

3.3.1. Περιγραφή του Μοντέλου χρησιμοποιώντας ως Τοπολογία Επικοινωνίας την Τοπολογία ενός Πλήρους Γράφου

Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης, όπου $\varepsilon=0.1$, $\varepsilon=0.2$ και $\varepsilon=0.3$, στο οποίο υποθέτουμε ότι κάθε πράκτορας επικοινωνεί με όλες τις υπόλοιπες και γνωρίζει τη γνώμη τους, δηλαδή η τοπολογία επικοινωνίας είναι αυτή ενός πλήρους γράφου, όπως θα αναλυθεί στην παράγραφο 8.3.

Μοντέλο Περιορισμένης Εμπιστοσύνης, Τοπολογία Πλήρους Γράφου, 100 πράκτορες

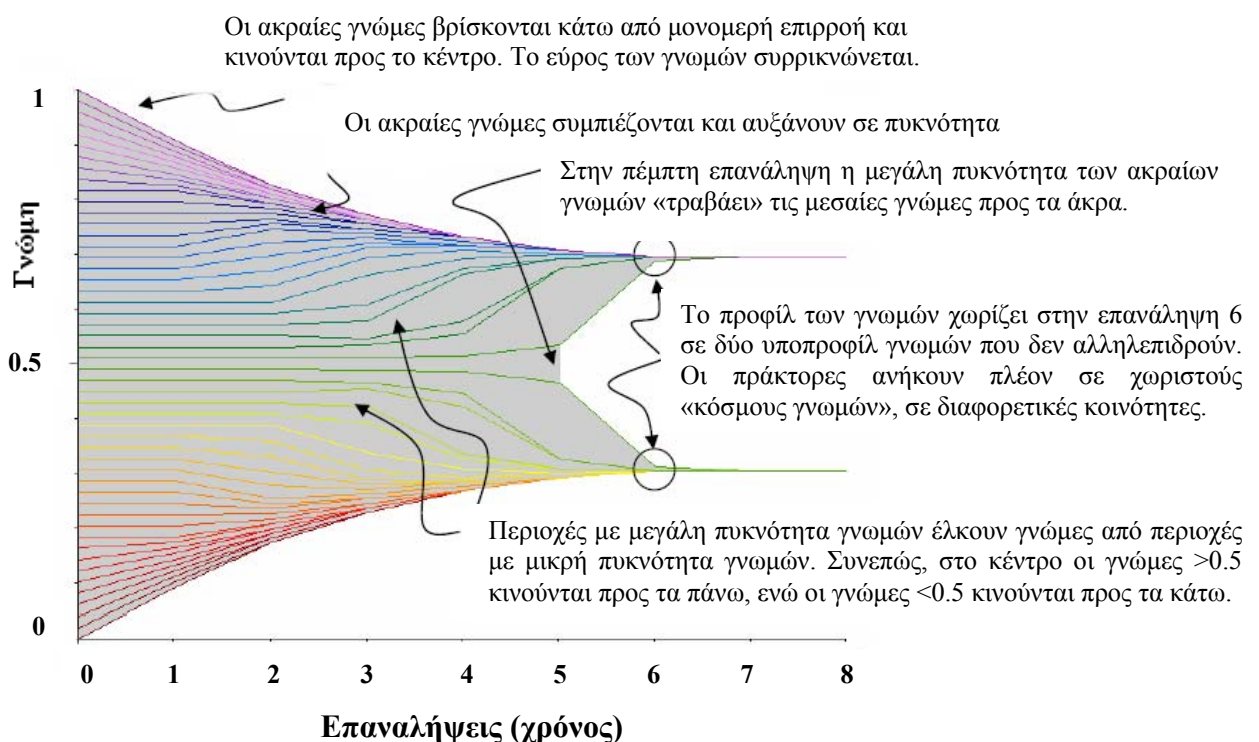
Τυχαίο Αρχικό Προφίλ Γνωμών



Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο Περιορισμένης Εμπιστοσύνης, Τοπολογία Πλήρους Γράφου, 100 πράκτορες, $\epsilon=0.1$, 0.2 και 0.3.

Για $\epsilon=0.1$ οι πράκτορες χωρίζονται σε 4 ομάδες, έχουμε δηλαδή κατάτμηση των γνωμών, για $\epsilon=0.2$ σχηματίζονται 2 ομάδες και έχουμε πόλωση και για $\epsilon=0.3$ οι γνώμες όλων των πρακτόρων ταυτίζονται και έχουμε ομοφωνία-συμφωνία. Τα μικρά διαστήματα εμπιστοσύνης οδηγούν σε κατάτμηση, τα μεσαία σε πόλωση και τα μεγάλα σε ομοφωνία. Η διάταξη αυτή ήταν μάλλον αναμενόμενη. Το ενδιαφέρον εδώ είναι ότι ενώ όλοι οι πράκτορες τείνουν να συμφωνήσουν με τους άλλους, έτσι ώστε να ισορροπήσουν κοινωνικά, είναι δυνατό τελικά να σχηματιστούν ομάδες πρακτόρων με διαφορετικές γνώμες (διαφορετικοί κόσμοι γνωμών), οι οποίες παύουν να επικοινωνούν και κατά συνέπεια να αλληλεπιδρούν. Για να εξηγήσουμε το μηχανισμό, παρουσιάζουμε

και πάλι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης, για $\varepsilon=0.2$ και για ένα ομοιόμορφο αρχικό προφίλ γνώμων, ένα προφίλ δηλαδή που οι αρχικές αποστάσεις μεταξύ δύο γειτονικών γνώμων είναι ίδιες. Για να φανεί καλύτερα το σχήμα χρησιμοποιούμε 50 πράκτορες με τις αρχικές τους γνώμες ομοιόμορφα μοιρασμένες στο διάστημα $[0,1]$. Δηλαδή, ο πράκτορας 1 έχει αρχική γνώμη ίση με 0, ο πράκτορας 2 ίση με 0.02, ο πράκτορας 3 ίση με 0,04 κ.λπ. Ο πράκτορας 50 έχει αρχική γνώμη ίση με 1. Στο επόμενο σχήμα εξηγούμε το μηχανισμό που μας δίνει δύο διαφορετικές γνώμες στην τελική κατάσταση.



Σχήμα 3.4: Επεξήγηση του μηχανισμού που μας οδηγεί στην πόλωση (σχηματισμό δύο γνώμων), μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης, τοπολογία πλήρους γράφου, 50 πράκτορες, $\varepsilon=0.2$.

Από το σχήμα 3.4 προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα:

- Οι ακραίες γνώμες υπόκεινται σε μονομερή επιρροή και συγκλίνουν προς το κέντρο.
- Στα άκρα οι γνώμες γίνονται πιο πυκνές.
- Οι συμπυκνωμένες γνώμες έλκουν προς το μέρος τους άλλες γνώμες, από λιγότερο πυκνές περιοχές, που βρίσκονται βέβαια μέσα στο διάστημα εμπιστοσύνης τους.

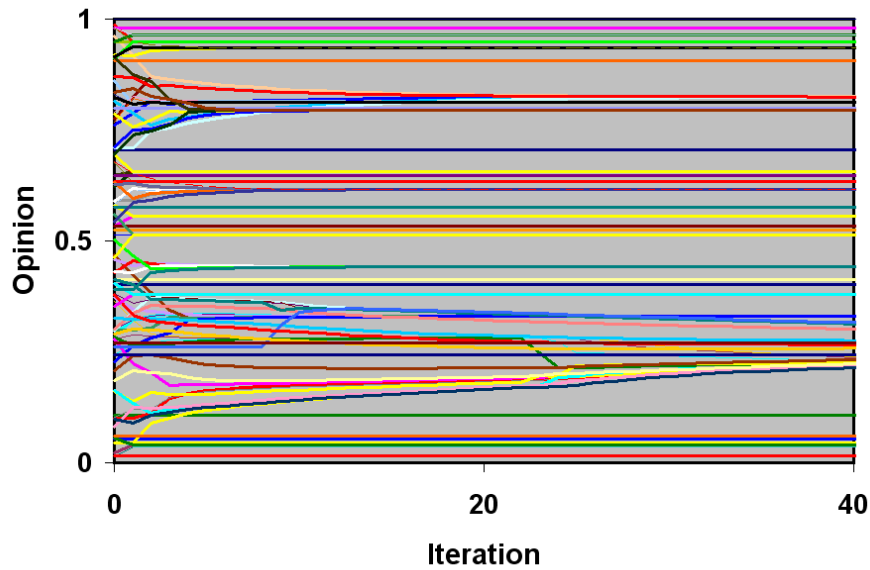
- Οι κεντρικές γνώμες αν είναι μεγαλύτερες του 0.5 κινούνται προς τα πάνω, ενώ αν είναι μικρότερες του 0.5 κινούνται προς τα κάτω.
- Το προφίλ γνώμών διαχωρίζεται στην έκτη επανάληψη. Στο εξής οι πράκτορες ανήκουν σε δύο διαφορετικούς κόσμους γνώμών (*opinion worlds*), όπου πλέον δεν λαμβάνει χώρα καμία αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

Όταν συμβεί ένας διαχωρισμός των γνώμών, τότε αυτές δε μπορούν στη συνέχεια να αλληλεπιδράσουν σε καμία περίπτωση, αντίθετα με το μοντέλο MER, όπου υπάρχει συνεχής αλληλεπίδραση των ομάδων των πρακτόρων και σε καμία περίπτωση δεν εμφανίζεται ομάδα απομονωμένη από όλες τις άλλες. Η ανάδειξη του μηχανισμού με τον οποίο μια τεχνητή κοινωνία μπορεί να καταλήξει στην πόλωση ή κατάτμηση των γνώμών των πρακτόρων της, παρά το γεγονός ότι όλοι τείνουν να υιοθετήσουν τη γνώμη των άλλων και να ισορροπήσουν κοινωνικά, αποτελεί κατά τη γνώμη μας τη σημαντικότερη συνεισφορά του μοντέλου περιορισμένης εμπιστοσύνης.

3.3.2. Το Μοντέλο Περιορισμένης Εμπιστοσύνης με Τοπολογία Επικοινωνίας ενός Κυψελοειδούς Αυτόματου

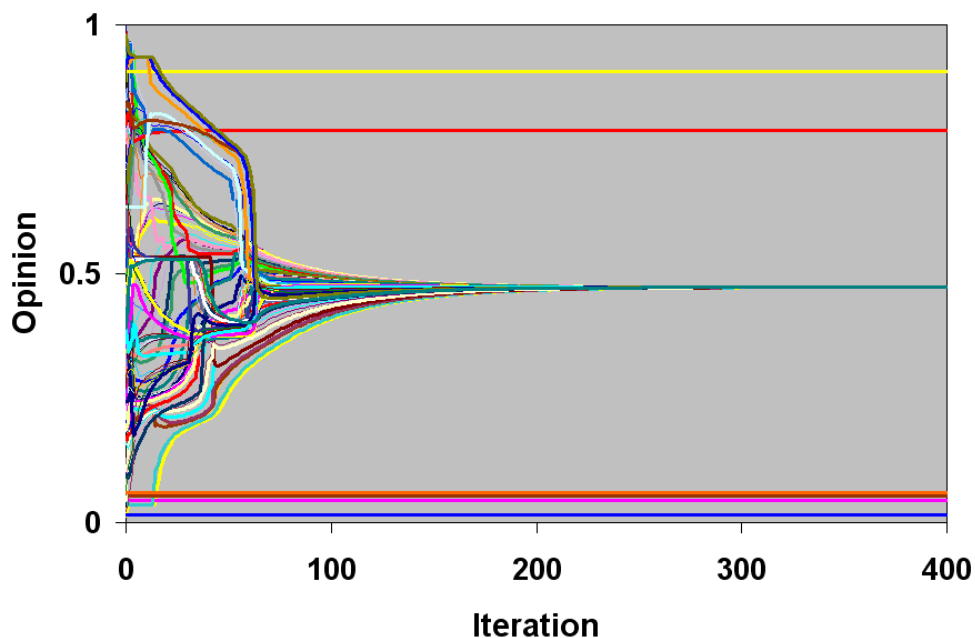
Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης χρησιμοποιώντας σαν τοπολογία επικοινωνίας μεταξύ των πρακτόρων αυτή του κυψελοειδούς αυτομάτου⁴. Η επίδραση της τοπολογίας αυτής δεν έχει μελετηθεί στη βιβλιογραφία, ως τώρα, για το συγκεκριμένο μοντέλο. Για την παραγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το ίδιο πρόγραμμα που παρήγαγε και τα αποτελέσματα του Μοντέλου MER, (δίνοντας στο συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ την τιμή 0, όπως θα αναλύσουμε στη συνέχεια, κατά την παρουσίαση του Μοντέλου MER) και επιλέγοντας την τοπολογία που μας ενδιαφέρει, στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτή των κυψελοειδών αυτομάτων. Το πρόγραμμα αυτό θα περιγραφεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 6. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την τιμή του φράγματος εμπιστοσύνης $\varepsilon=0.1$ παρουσιάζονται στο σχήμα 3.5.

⁴ Η τοπολογία αυτή θα παρουσιαστεί αναλυτικά στην παράγραφο 8.3.



Σχήμα 3.5: Μοντέλο Περιορισμένης Εμπιστοσύνης, Τοπολογία Κυψελοειδούς Αυτόματου, 100 πράκτορες, Τυχαίο Αρχικό Προφίλ Γνωμών, $\varepsilon=0.1$.

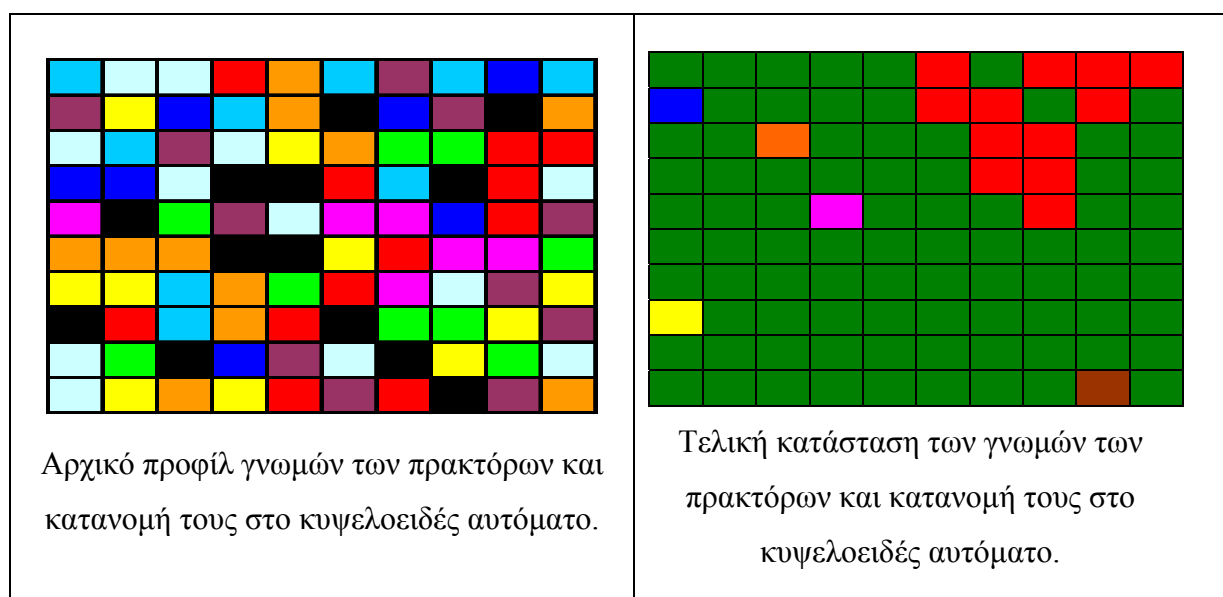
Παρατηρείται κατάτμηση των γνωμών των πρακτόρων σε ένα πολύ μεγάλο αριθμό ομάδων. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη επικοινωνίας που επιβάλλει η τοπολογία του κυψελοειδούς αυτόματου, επιπλέον του μικρού φράγματος εμπιστοσύνης $\varepsilon=0.1$. Για $\varepsilon=0.2$ όμως το αποτέλεσμα είναι τελείως διαφορετικό, όπως φαίνεται στον σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Μοντέλο Περιορισμένης Εμπιστοσύνης, Τοπολογία Κυψελοειδούς Αυτόματου, 100 πράκτορες, Τυχαίο Αρχικό Προφίλ Γνωμών, $\varepsilon=0.2$.

Η τελική κατάσταση που διαμορφώνεται σ' αυτή την περίπτωση θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι «σχεδόν ομοφωνία». Οι 83 από τις 100 πράκτορες

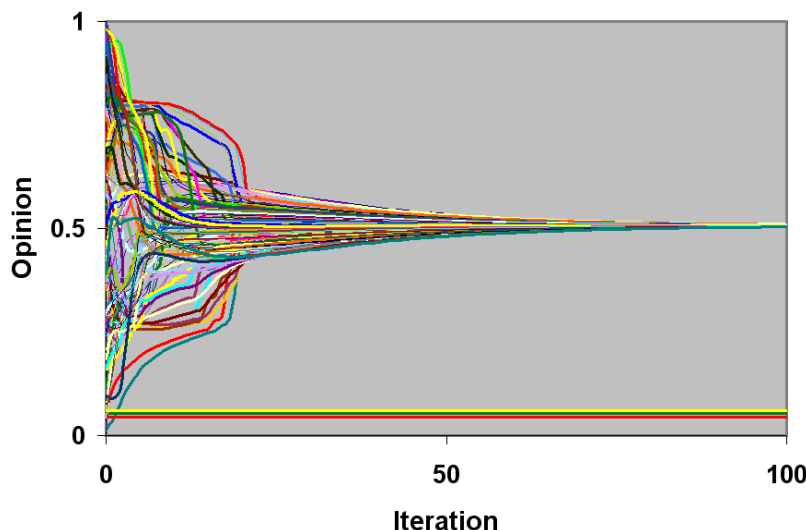
καταλήγουν να έχουν γνώμη ίση με 0.5 ενώ οι γνώμες των 17 υπολοίπων πρακτόρων τερμάτισαν μακριά από την κεντρική αυτή τιμή. Αυτό συνέβη διότι οι γειτονικές τους πράκτορες είχαν γνώμη που διέφερε από τη δική τους περισσότερο από το μέγεθος του φράγματος εμπιστοσύνης $\varepsilon=0.2$, από την πενήτηκοστή επανάληψη και έπειτα. Για την πληρέστερη παρουσίαση της προσομοίωσης, στον πίνακα 3.6 δίνεται το αρχικό προφίλ καθώς και η τελική κατάσταση των γνώμών των πρακτόρων, όπως αυτές είναι κατανεμημένες στο κυψελοειδές αυτόματο. Προφανώς κάθε πράκτορας καταλαμβάνει ένα κελί του κυψελοειδούς αυτομάτου.



Πίνακας 3.6: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης με τοπολογία επικοινωνίας ενός κυψελοειδούς αυτομάτου, 100 πράκτορες, $\varepsilon=0.2$. Τα ανοιχτόχρωμα χρώματα δηλώνουν γνώμες με τιμές κοντά στο 1 ενώ τα πιο σκούρα κοντά στο 0.

Στην αριστερή στήλη του πίνακα 3.6, παρατηρούμε ένα μωσαϊκό χρωμάτων, που αντιστοιχεί στις αρχικές τυχαίες γνώμες των 100 πρακτόρων. Στην τελική κατάσταση του συστήματος, που παρουσιάζεται στη δεξιά στήλη του πίνακα 3.6, παρατηρούμε μια οργάνωση των χρωμάτων-γνώμών. Με πράσινο χρώμα απεικονίζονται 83 πράκτορες, οι οποίες καταλήγουν να έχουν γνώμη ίση με 0.5. Δώδεκα πράκτορες σχηματίζουν μια άλλη ομάδα με γνώμη ίση με 0.78 και απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα. Υπάρχουν ακόμη πέντε πράκτορες που είναι απομονωμένες από όλους τους υπολοίπους και δεν αλληλεπιδρούν με καμιά άλλη πράκτορα, διότι οι γειτονικές τους πράκτορες είχαν γνώμη που διέφερε από τη δική τους περισσότερο από το μέγεθος του

φράγματος εμπιστοσύνης $\varepsilon=0.2$ από την αρχή και καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για $\varepsilon=0.3$.



Σχήμα 3.7: Μοντέλο Περιορισμένης Εμπιστοσύνης, Τοπολογία Κυψελοειδούς Αυτομάτου, 100 πράκτορες, Τυχαίο Αρχικό Προφίλ Γνώμων, $\varepsilon=0.3$

Ως τελικό αποτέλεσμα λαμβάνουμε ομοφωνία των 97 πρακτόρων με γνώμη ίση με 0.5. Τρεις μόνο πράκτορες ξέφυγαν από αυτή την ομοφωνία, οι πράκτορες 11, 23 και 99. Οι συγκεκριμένες πράκτορες παρέμειναν απόλυτα σταθερές στην αρχική τους γνώμη, επειδή όλες οι γειτονικές τους πράκτορες είχαν γνώμη που διέφερε από τη δική τους περισσότερο από το μέγεθος του φράγματος εμπιστοσύνης $\varepsilon=0.3$ καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και κατά συνέπεια δεν υπήρξε καμιά αλληλεπίδραση των συγκεκριμένων πρακτόρων με τις υπόλοιπες.

Παρατηρούμε ότι η εισαγωγή της τοπολογίας του κυψελοειδούς αυτομάτου δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το μοντέλο της περιορισμένης εμπιστοσύνης, μιας και τα αποτελέσματα δε διαφέρουν ιδιαίτερα από τα αντίστοιχα για την τοπολογία του πλήρους γράφου. Το αντίθετο ισχύει για το μοντέλο MER: η εισαγωγή οποιασδήποτε τοπολογίας που εισάγει την τοπικότητα στην επικοινωνία, όπως αυτή του κυψελοειδούς αυτομάτου, προκαλεί δραματικές αλλαγές στο σύνολο σχεδόν των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, και θα παρουσιαστεί διεξοδικά στο 8ο κεφάλαιο της διατριβής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΔΡΑΣΤΟΣΤΡΕΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΓΕΝΕΤΙΚΗ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗ – ΜΙΑ ΝΕΑ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΟΙΝΩΝΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ

Agent-based computational modelling is changing the face of social science. This powerful, novel technique permits the social sciences to meet a fundamentally new standard of explanation, in which one "grows" the phenomenon of interest in an artificial society of interacting agents where heterogeneous, bloodedly rational actors are represented as mathematical or software objects.

Generative Social Science, Joshua Epstein (2006)

4.1. Δραστοστρεφή Μοντελοποίηση και Κοινωνική Θεωρία

Τα τελευταία χρόνια οι κοινωνικές επιστήμες έχουν συμπεριλάβει την προσομοίωση σαν ένα νέο ισχυρό εργαλείο εξερεύνησης της δυναμικής των κοινωνικών συστημάτων (Gilbert, 1996b). Τα δραστοστρεφή μοντέλα προσομοιώσεων είναι ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος έρευνας για την εξερεύνηση των ελάχιστων συνθηκών και προϋποθέσεων κάτω από τις οποίες εμφανίζονται συγκεκριμένα κοινωνικά φαινόμενα.

Η *δραστοστρεφή μοντελοποίηση (agent-based modeling)* και οι *κοινωνικές προσομοιώσεις (social simulations)* είναι μια νέα προσέγγιση στη μοντελοποίηση συστημάτων που αποτελούνται από αυτόνομους αλληλεπιδρώντες δράστες. Τα δραστοστρεφή μοντέλα ασκούν ήδη μεγάλη επίδραση στον τρόπο που κοινωνικοί ερευνητές χρησιμοποιούν ηλεκτρονικούς υπολογιστές και εργαστήρια για να παράγουν νέα γνώση και να στηρίζουν την ερευνητική τους δραστηριότητα καθώς και στα στελέχη των επιχειρήσεων για να υποστηρίξουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Η ισχυροποίηση της υπολογιστικής ικανότητας των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει επιτρέψει τη διεξαγωγή ενός μεγάλου αριθμού από εφαρμογές της δραστοστρεφούς μοντελοποίησης σε μια ευρεία γκάμα ερευνητικών πεδίων.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '90 ένας αυξανόμενος αριθμός κοινωνικών επιστημόνων που ενδιαφέρονταν για τα πολύπλοκα φαινόμενα αναζήτησε νέες προσεγγίσεις για τη διερεύνηση της πολυπλοκότητας της κοινωνικής δυναμικής. Μέχρι την πλήρη ανάπτυξη του δραστοστρεφών μοντέλων προσομοίωσης, στη δεκαετία του '90, οι προσομοιώσεις σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές αφορούσαν τη *μοντελοποίηση που βασιζόταν σε μαθηματικές εξισώσεις (equation-based modelling)*, όπως για παράδειγμα τα μοντέλα της συστημικής δυναμικής (Forrester, 1968) καθώς και οι άλλες περιπτώσεις μοντέλων προσομοίωσης που αναλύθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής. Στη είδος αυτό της μοντελοποίησης, κάθε μοντέλο αποτελείται από ένα σύνολο εξισώσεων (διαφορικές εξισώσεις ή εξισώσεις διαφορών) και η εκτέλεση της προσομοίωσης αφορά την διερεύνηση και την αξιολόγηση των εξισώσεων αυτών (Halpin, 1999). Ακόμη και σήμερα, ένας μεγάλος αριθμός κοινωνικών επιστημόνων πιστεύουν ότι η μοντελοποίηση που βασίζεται σε μαθηματικές εξισώσεις αποτελεί το μοναδικό διαθέσιμο εργαλείο προσομοίωσης σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές και αποτελεί κλάδο της *μαθηματικής κοινωνιολογίας (mathematical sociology)*.

Η δραστοστρεφή μοντελοποίηση και οι κοινωνικές προσομοιώσεις έχουν συνεισφέρει ουσιαστικά στην έρευνα των κοινωνικών επιστημών και στη διερεύνηση

μιας σειράς κοινωνικών φαινομένων που έχουν απασχολήσει τις κοινωνικές επιστήμες από τη γέννησή τους, όπως το πρόβλημα της κατανόησης της ανάδυσης (emergence) και ειδικότερα τη σχέση των μικρο και μακρο ιδιοτήτων των πολύπλοκων συστημάτων, τη σχέση δομής και δράσης κλπ. Τα κοινωνικά συστήματα καθώς και τα δραστοστρεφή μοντέλα προσομοίωσης μπορούν να περιγραφούν και μελετηθούν είτε αποκλειστικά με όρους των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς των πρακτόρων και μόνο είτε μελετώντας τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος. Το πρόβλημα είναι πώς να χαρακτηριστούν οι δύο αυτοί τύποι περιγραφής, ειδικά όταν οι μακρο-ιδιότητες του συστήματος «αναδύονται» από τις αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων στο μικρο-επίπεδο (Gilbert, 1996). Με βάση τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 2 και 3 και τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στη συνέχεια όσον αφορά στο μοντέλο πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών, στο παρόν κεφάλαιο θα επιχειρηθεί να αναλυθεί η σχέση των αποτελεσμάτων αυτών και η επίδραση που αυτά έχουν στην κοινωνική θεωρία και στη συνέχεια, θα αναλυθεί η επιστημολογική διάσταση της δραστοστρεφούς μοντελοποίησης.

Τα δραστοστρεφή μοντέλα κοινωνικών προσομοιώσεων περιλαμβάνουν τρία βασικά συστατικά: τις δράστες, το περιβάλλον τους και τους κανόνες συμπεριφοράς και αλληλεπίδρασης μεταξύ των πρακτόρων. Οι δράστες είναι οι άνθρωποι των τεχνητών κοινωνιών. Το περιβάλλον τους είναι ένα μέσο ξεχωριστό από τους δράστες μέσα στο οποίο οι δράστες δρουν, συμπεριφέρονται και με αλληλεπιδρούν με τους υπόλοιπους δράστες. Οι κανόνες καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι δράστες συμπεριφέρονται και αλληλεπιδρούν καθώς επίσης και τον τρόπο που το περιβάλλον μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Παρότι πολύ συχνά οι κανόνες είναι εξαιρετικά απλοί, το μοντέλο μπορεί να επιδείξει εξαιρετικά πολύπλοκη συμπεριφορά. Στα δραστοστρεφή μοντέλα ακόμη, συχνά δεν τίθεται ως προϋπόθεση κάποια κοινωνική δομή η οποία να επιδρά στα μεμονωμένα άτομα αλλά αντίθετα οι θεμελιώδεις κοινωνικές δομές και οι διομαδικές συμπεριφορές προκύπτουν από τις τοπικές αλληλεπιδράσεις των μεμονωμένων πρακτόρων, οι οποίοι αναπτύσσουν δραστηριότητες στο τεχνητό περιβάλλον που «ζουν» σύμφωνα με τους κανόνες του μοντέλου. Οι κανόνες αυτοί θέτουν ακόμη περιορισμούς στις πληροφορίες και στην υπολογιστική ικανότητα κάθε πράκτορα.

Σύμφωνα με τον Παπαστάμου οι λόγοι για την επιλογή μιας συγκεκριμένης μεθόδου από έναν ερευνητή δεν περιορίζονται στο απλό μεθοδολογικό επίπεδο αλλά επεκτείνονται ισομερώς στο θεωρητικό, επιστημολογικό και ιδεολογικό επίπεδο. Η

κοινωνική ψυχολογία καλείται ήδη από το ξεκίνημά της, αλλά ακόμα και σήμερα, να επιλέξει ανάμεσα σε δύο διαφορετικά μεθοδολογικά παραδείγματα: αυτό του μεθοδολογικού ολισμού (*methodological holism*) και εκείνο του μεθοδολογικού ατομικισμού (*methodological individualism*), έστω κι αν όταν η κοινωνική ψυχολογία έκανε τα πρώτα της βήματα δε χρησιμοποιούνταν ακόμα οι συγκεκριμένοι όροι αυτού του διλήμματος (Παπαστάμου, 2001)

Είναι σαφές ότι στην πλειοψηφία των δραστοστρεφών μοντέλων κοινωνικών προσομοιώσεων ακολουθείται, με βάση τις προϋποθέσεις του κάθε μοντέλου, μια προσέγγιση η οποία σαφώς εντάσσεται στα πλαίσια του μεθοδολογικού ατομικισμού/αναγωγισμού, δεδομένου ότι οι κανόνες αφορούν την ατομική συμπεριφορά μεμονωμένων δραστών, η συνολική συμπεριφορά των οποίων αποτελεί την τεχνητή κοινωνία, η οποία εξελίσσεται δυναμικά και διερευνάται. Σε αντίθεση με τον μεθοδολογικό ολισμό ο μεθοδολογικός αναγωγισμός βλέπει τα μακρο-φαινόμενα ως αποτέλεσμα των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς των ατόμων στο μικρο-επίπεδο. Η θεώρηση αυτή απαιτεί όλες οι έννοιες της κοινωνικής θεωρίας να αναλύονται με όρους των ενδιαφερόντων, των δραστηριοτήτων και των συμφερόντων των ατόμων.

4.1.1. Μεθοδολογικός Αναγωγισμός και το Μικρο-Μάκρο Πρόβλημα στη Δραστοστρεφή Μοντελοποίηση και στην Κοινωνική Θεωρία

Στις δεκαετίες του 70 και του 80 έλαβε χώρα μια διαμάχη μεταξύ των δύο θεωρήσεων και παρότι υπάρχει κάποια βάση και στις δύο, καμιά δε φάνηκε αρκετή να αποκαλύψει τη σχέση των μικρο και μακρο κοινωνικών φαινομένων. Παρόλα αυτά, αν όχι σε όλες, στις περισσότερες κοινωνικές προσομοιώσεις υιοθετείται μια από τις δύο αυτές προσεγγίσεις, συνήθως σιωπηρά, δίχως δηλαδή να γίνεται ρητή αναφορά. Τα περισσότερα μοντέλα δραστοστρεφούς μοντελοποίησης στηρίζονται πάνω στον μεθοδολογικό αναγωγισμό, καθώς η ίδια η ιδέα της μοντελοποίησης ευνοείται από αυτή την προσέγγιση. Σε όλα σχεδόν τα δραστοστρεφή μοντέλα κάθε δράστης αντιστοιχεί σε ένα άτομο του οποίου η συμπεριφορά και οι κανόνες αλληλεπίδρασης με τους άλλους δράστες αποτελούν τις υποθέσεις του μοντέλου και παράγουν τα υπό μελέτη μακρο φαινόμενα από τις υποθέσεις αυτές στο μικρο επίπεδο. Ο μεθοδολογικός αναγωγισμός δεν είναι αναπόφευκτος, όμως συχνά αποτελεί μια μη ρητή υπόθεση των μοντέλων αυτού του είδους, ο οποίος μάλιστα συνοδεύεται από μια μονόδρομη αντίληψη της

έννοιας της ανάδυσης, ότι δηλαδή το κοινωνικό προκύπτει από το ατομικό και όχι αντίστροφα (O'Sullivan & Haklay, 2000). Οι δύο αυτές υποθέσεις συνήθως υιοθετούνται σιωπηρά και δεν τεκμηριώνονται θεωρητικά κατά την παρουσίαση των μοντέλων. Όσον αφορά στα δραστοστρεφή μοντέλα που παρουσιάστηκαν στην παρούσα διατριβή, υιοθετούν όλα σε μεγάλο βαθμό τον μεθοδολογικό αναγωγισμό, όπως συμβαίνει και με τα περισσότερα δραστοστρεφή μοντέλα.

Το πρόβλημα του πως οι ενέργειες του ατόμου και οι δομικοί κανόνες της κοινωνίας αλληλεπιδρούν είναι ένα θεμελιώδες ερώτημα για τις κοινωνικές επιστήμες, που συχνά ονομάζεται *μίκρο-μάκρο πρόβλημα (micro-macro problem)* (Schillo et al, 1979). Στο θεμελιώδες αυτό ζήτημα περιλαμβάνεται και ο χαρακτηρισμός της σχέσης ανάμεσα στους δύο αυτούς τύπους περιγραφής, ειδικότερα όταν οι μάκρο-ιδιότητες φαίνεται να «αναδύονται» από τη συμπεριφορά των πρακτόρων και τις ιδιότητές τους στο μικρο-επίπεδο. Η βαθμός κατανόηση της σχέσης τους αντιστοιχεί και στο βαθμό κατανόησης της ανθρώπινης κοινωνίας καθώς και μια αυξημένη ικανότητα για τους κοινωνικούς ερευνητές στο σχεδιασμό των δραστοστρεφών μοντέλων για τη διεξαγωγή δυναμικών κοινωνικών προσομοιώσεων μεγάλης κλίμακας.

Οι δραστοστρεφείς προσομοιώσεις έχουν πια αποκτήσει ένα επίπεδο ωριμότητας και προσφέρονται πλέον στους κοινωνιολόγους και τους υπόλοιπους κοινωνικούς επιστήμονες ως ένα πανίσχυρο εργαλείο επιστημονικής έρευνας (Sawyer, 2003), το οποίο προσφέρει μια νέα προοπτική στο πρόβλημα της μικρο-μάκρο σύνδεσης στην κοινωνιολογική θεωρία επικεντρώνοντας σε τρεις πτυχές της σύνδεσης αυτής, στη μικρο-μάκρο ανάδυση (micro-to-macro emergence), στις μάκρο-μίκρο αιτιώδεις σχέσεις (macro-to-micro social causation) και στη διαλεκτική ανάμεσα στην ανάδυση και τις αιτιώδεις σχέσεις (Alexander et al, 1987).

Όπως οι κοινωνίες έτσι και τα πολύπλοκα υπολογιστικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν συγκεκριμένα κοινωνικά φαινόμενα, αποτελούνται από πολλούς δράστες που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Τα συστήματα αυτά λοιπόν μπορούν να περιγραφούν με όρους και ιδιότητες είτε των πρακτόρων είτε του συστήματος. Ο πρώτος τρόπος περιγραφής αναφέρεται στο «μίκρο» επίπεδο και στα ατομικά χαρακτηριστικά των πρακτόρων, ενώ ο δεύτερος στο «μάκρο» επίπεδο, στα συνολικά σχήματα και στις κανονικότητες που παρουσιάζονται από τη συμπεριφορά των πρακτόρων συνολικά.

Η σχέση των μικρο και μάκρο ιδιοτήτων μιας κοινωνίας έχει απασχολήσει τους κοινωνικούς επιστήμονες αρχίζοντας από τους θεμελιωτές της κοινωνιολογίας. Ήδη στα

τέλη του δέκατου ένατου αιώνα, ο Durkheim (1895/1965) έδωσε έμφαση στην εξωτερική φύση των κοινωνικών θεσμών (μια μάκρο-ιδιότητα της κοινωνίας) και ισχυρίστηκε ότι οι θεσμοί είναι εξωτερικοί των ατόμων και επιβάλλονται στα άτομα στο μικρο-επίπεδο. Για τον Durkheim η συλλογική συνείδηση είναι διαφορετική από την ατομική συνείδηση και ο τρόπος σκέψης μιας ομάδας είναι διαφορετικός από τον τρόπο σκέψης του μεμονωμένου ατόμου. Για να καταλάβουμε τον τρόπο με τον οποίο η κοινωνία αντιλαμβάνεται τον εαυτό της και τον εξωτερικό κόσμο, πρέπει να εξετάσουμε τη φύση της κοινωνίας και όχι τη σκέψη του ατόμου. Σύμφωνα με τον Durkheim υπάρχουν συλλογικές αναπαραστάσεις που δε μπορούν να αναχθούν στα άτομα από τα οποία αποτελείται η κοινωνία. Τα κοινωνικά γεγονότα έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και αποτελούνται από τρόπους ενεργειών, σκέψεων και συναισθημάτων που είναι εξωτερικά των ατόμων και επιβάλλονται στα άτομα, ασκώντας έλεγχο πάνω σ' αυτά (Durkheim, 1895/1965). Η κοινωνία είναι κάτι περισσότερο από το άθροισμα των μελών της, διότι έχει ένα πολύ ισχυρό συνεκτικό δεσμό, τη συλλογική συνείδηση. Η συλλογική συνείδηση είναι το σύνολο των πεποιθήσεων και των αισθημάτων, που είναι κοινά στα μέλη μιας κοινωνίας. Αυτό το σύνολο σχηματίζει ένα καθορισμένο σύστημα που έχει τη δική του ζωή (Durkheim, 1895/1965).

Ο Durkheim διαφωνούσε με την ατομικιστική ερμηνεία των κοινωνικών φαινομένων και σε άλλα σημεία: πίστευε ότι τα δομικά χαρακτηριστικά της κοινωνίας επιβάλλονται αναγκαστικά στους ανθρώπους, εφόσον όμως οι άνθρωποι αποκτήσουν μια ισχυρή συλλογική συνείδηση, δηλαδή μια συναινετική αποδοχή των κοινωνικών αξιών, θα υποχωρήσει ο ατομικισμός και θα αποφεύγονται επίσης οι καταστάσεις δυσλειτουργίας, όπως η πάλη των τάξεων ή άλλες ανομικές καταστάσεις. Η επίδραση του Durkheim στις κοινωνικές επιστήμες οφείλεται κυρίως στην αντίθεσή του στον ατομικισμό και στην προτεραιότητα που απέδιδε στην κοινωνική αλληλεγγύη.

Η σχέση μεταξύ μικρο και μάκρο-επιπέδου υπήρξε επίσης ένα από τα κεντρικότερα σημεία στα κείμενα του James Coleman. Από τον καιρό της παλαιότερης έρευνάς του πάνω σε διαδικασίες διάχυσης, μέχρι τις αναλύσεις του της ορθολογικής επιλογής των δεκαετιών 1980 και 1990, η συζήτησή του για το ζήτημα των συνδέσεων μεταξύ των δυο αυτών επιπέδων ανάλυσης καταλάμβανε μια θέση κομβικής σημασίας (Coleman, 1990). Όπως οι περισσότεροι κοινωνιολόγοι, ο Coleman ενδιαφερόταν κυρίως για κοινωνικά ή φαινόμενα του μάκρο-επιπέδου, αλλά αντίθετα με πολλούς κοινωνιολόγους, πάντοτε τόνιζε ότι οι μεταβολές σ' αυτά πρέπει να εξηγούνται με αναφορά στις δράσεις, που τις προκαλούσαν. Για να εξηγήσει την κοινωνική ή τη

μεταβολή στο μάκρο-επίπεδο, δεν αρκούσε απλώς να συσχετίσει μεταξύ τους φαινόμενα του μάκρο-επιπέδου. Για να έχει επεξηγηματική ισχύ μια θεωρία πρέπει να καθορίζει ένα σύνολο αιτιακών μηχανισμών, που ενδέχεται να προκαλούν τη μεταβολή, κάτι που αναγκάζει το μελετητή να δείξει πώς οι μάκρο-καταστάσεις κάποια χρονική στιγμή επηρεάζουν τις δράσεις των ατόμων και πώς οι τελευταίες συνεπάγονται το σχηματισμό νέων μάκρο-καταστάσεων σε μια μετέπειτα χρονική στιγμή (Hedström, 2005).

Εκτός από τα δύο επίπεδα θεώρησης στην κοινωνική επιστήμη, το μικρο και το μάκρο, υπάρχει ακόμη μια σημαντική διάκριση των κοινωνικών θεωριών μεταξύ αυτών που επικεντρώνονται στην ατομική δράση των πρακτόρων (action oriented theories) και αυτών που επικεντρώνονται στις κοινωνικές δομές (structure oriented theories) καθώς και μια σειρά από ενδιάμεσες θεωρίες που επιχειρούν να ερμηνεύσουν τη σύνδεση ανάμεσα στην ατομική δράση και τις κοινωνικές δομές. Μια διεξοδική ανάλυση των ορισμών των μικρο και μάκρο εννοιών στην κοινωνιολογία ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας διατριβής. Σύμφωνα με τους Schillo et al (1979), ανάλογα με τον τρόπο παρατήρησης, περιγραφής και ερμηνείας των κοινωνικών φαινομένων, το αντικείμενο των κοινωνικών επιστημών μπορεί να εξεταστεί από μικρο, μέσο, μάκρο και μετακοινωνιολογικό επίπεδο. Βεβαίως απουσιάζει μια κοινά αποδεκτή κοινωνική θεωρία, γεγονός που οδηγεί στο κατακερματισμό και σχηματισμό ενός μεγάλου αριθμού από σχολές.

4.1.2. Η Ανάδυση των Μάκρο-Κοινωνικών Φαινομένων από τις Τοπικές Αλληλεπιδράσεις των Μεμονωμένων Πρακτόρων

Ο όρος *ανάδυση (emergence)* εμφανίζεται πάμπολλες φορές στη δραστοστρεφή μοντελοποίηση, στη θεωρία της πολυπλοκότητας, στις τεχνητές κοινωνίες καθώς και στη φιλοσοφία της επιστήμης. Χρησιμοποιείται με πολλούς τρόπους για να περιγράψει καταστάσεις στις οποίες η αλληλεπίδραση πολλών *αυτόνομων συνιστωσών (autonomous individual components)* παράγει κάποιο είδος συνεκτικής, συλλογικής, συστηματικής συμπεριφοράς. Η μέθοδος αυτή των κοινωνικών προσομοιώσεων εισάγει ένα νέο τρόπο σκέψης και έρευνας σχετικά με τις κοινωνικές και τις οικονομικές διαδικασίες, ο οποίος βασίζεται στην ιδέα της «ανάδυσης» πολύπλοκης συμπεριφοράς από σχετικά απλές δραστηριότητες. Σε πολλές περιπτώσεις οι προσομοιώσεις είναι δυστυχώς, μέχρι αυτή τη στιγμή το μοναδικό εργαλείο έρευνας κάποιων κοινωνικών φαινομένων που διαθέτουμε.

Ως τώρα δεν έχει δοθεί μια πλήρης και ικανοποιητική τυπική θεωρία για την ανάδυση (Gilbert, 1996a).

Ανάδυση λαμβάνει χώρα όταν αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε αντικείμενα σε ένα επίπεδο έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση κανονικοτήτων σε ένα άλλο επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, ένα φαινόμενο λέμε ότι «αναδύεται» (*is emergent*) όταν απαιτεί νέες κατηγορίες για να περιγραφεί, κατηγορίες που δεν απαιτούνται για να περιγράψουν τη συμπεριφορά των συνιστωσών που δρουν σε ένα προγενέστερο επίπεδο. Ένα πρώτο απλοποιημένο παράδειγμα από το χώρο των θετικών επιστημών είναι η θερμοκρασία. Η θερμοκρασία είναι μια αναδύμενη ιδιότητα από τις κινήσεις των ατόμων της ύλης. Για ένα μεμονωμένο άτομο δεν έχει νόημα η έννοια της θερμοκρασίας, για ένα σύνολο όμως ατόμων μπορεί να οριστεί. Ο Nagel (1961) υποστήριξε ότι μια ιδιότητα ενός αντικειμένου μπορούμε να πούμε ότι αναδύεται όταν είναι αδύνατο να συμπεράνουμε αυτή την ιδιότητα από την πλήρη γνώση των συνιστωσών που αποτελούν το αντικείμενο καθώς και των σχέσεων μεταξύ αυτών των συνιστωσών.

Ο Parsons αναπτύσσει μια άποψη για την κοινωνία ως σύνολο αλληλοσυνδεδεμένων συστημάτων, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα «αναδύμενα» γνωρίσματα. Προσδιορίζει έτσι τη σχέση ανάμεσα στην ατομική συμπεριφορά και το κοινωνικό περιβάλλον μέσα στο οποίο αυτή διαδραματίζεται προβάλλοντας τη «στρωματοποιημένη» φύση της κοινωνίας (Layder, 1981). Κατ' αυτό τον τρόπο τα συστήματα δράσης συνδεόμενα μεταξύ τους με αλληλουχίες διαντιδράσεων, διαμορφώνουν αναδύμενες δομές, οι οποίες αποτελούν μη αναγώγιμα στοιχεία. Για παράδειγμα, στο επίπεδο του ατομικού φορέα δράσης διαμορφώνονται οι αναδύμενες δομές που συνιστούν την ατομική προσωπικότητα και άρα το σύστημα της προσωπικότητας δεν μπορεί να αναχθεί στις επιμέρους δράσεις του ατόμου. Στο κοινωνικό επίπεδο, οι αναδύμενες δομές συνίστανται σε «κανονιστικά πρότυπα», «ρόλους» και «θεσμούς», ενώ στο πολιτιστικό επίπεδο οι αναδύμενες δομές αφορούν «κοινωνικές αξίες», «νόρμες» και «ιδέες» που παρέχουν κίνητρα για δράση. (Πετμεζίδου (εκδ.), 1996). Με την έννοια της ανάδυσης ο Parsons εννοεί ότι τα συστήματα έχουν ιδιότητες οι οποίες δεν μπορούν να αναχθούν ή να εξηγηθούν στη βάση των συστατικών μερών τους και ότι στα διάφορα επίπεδα της οργανωτικής πολυπλοκότητας πάντα τείνουν να αναδύονται νέες τάξεις συστημάτων.

Στο πλαίσιο των δραστοστρεφών κοινωνικών προσομοιώσεων, μια αναδύμενη ιδιότητα του συστήματος ή της τεχνητής κοινωνίας δε μπορεί να προβλεφθεί αναλυτικά ή μαθηματικά παρά την πλήρη γνώση των ιδιοτήτων όλων των πρακτόρων και των

αλληλεπιδράσεών τους. Πρόβλεψη μπορεί να γίνει μόνο κατόπιν διεξαγωγής προσομοίωσης. Το τελευταίο αυτό κριτήριο δυστυχώς δεν είναι επαρκώς τεκμηριωμένο, μιας και είναι πάντοτε δυνατό στο μέλλον να αναπτυχθούν οι αναλυτικές μέθοδοι που θα επιτρέψουν να προβλεφθούν οι μακρο-ιδιότητες του συστήματος από τις ιδιότητες στο μικρο-επίπεδο (Gilbert, 1996a). Αν ορίσουμε λοιπόν την ιδιότητα της ανάδυσης ενός κοινωνικού φαινομένου με βάση την αδυναμία να βρούμε μια αναλυτική λύση, κάθε αναδυόμενη ιδιότητα κινδυνεύει ανά πάσα στιγμή να πάψει να χαρακτηρίζεται έτσι, μιας και κανείς δε μπορεί να προσδιορίσει το χρόνο και τη δυνατότητα να προκύψει μια αναλυτική λύση.

Τα δραστοστρεφή μοντέλα είναι ουσιαστικά εφαρμογή αυτόνομων πρακτόρων που προγραμματίζονται ώστε να συμπεριφέρονται με διαφορετικούς τρόπους κατ' αλληλεπίδραση με τους άλλους πράκτορες ή τις διαφορετικές πτυχές του περιβάλλοντός τους, πολλές φορές μέσα σε ένα κυψελοειδές αυτόματο ή σε μια άλλου είδους τοπολογία, η οποία ορίζει κανόνες γειτνίασης μεταξύ των πρακτόρων και επιτρέπει ή όχι στους πράκτορες να αλληλεπιδράσουν. Επιχειρούν έτσι να μελετήσουν την «ανάδυση» ιδιαίτερα σύνθετης, πολύπλοκης και απροσδόκητης συλλογικής συμπεριφοράς του συστήματος από φαινομενικά απλούς κανόνες δράσης και αλληλεπίδρασης των μεμονωμένων πρακτόρων, με βάση κάθε φορά τις υποθέσεις του μοντέλου. Η προσέγγιση των δραστοστρεφών κοινωνικών προσομοιώσεων επιτρέπει στους ερευνητές να δημιουργήσουν νέους κόσμους από την αρχή, τροποποιώντας τις υποθέσεις και τις παραμέτρους του μοντέλου σύμφωνα με το φαινόμενο-στόχο της μοντελοποίησης. Με τον πειραματισμό αυτό διερευνάται η «αναδυόμενη» συνολική συμπεριφορά ως δομή και συνολικό σχέδιο (pattern) που προκύπτει από τις πολυάριθμες αλληλεπιδράσεις μικρής κλίμακας. Οι υποθέσεις σχετικά με την ανάδυση της δομής ή την επιτυχία των ποικίλων στρατηγικών που ακολουθούν οι δράστες είναι δυνατό να χρησιμεύσουν για να επιβεβαιώσουν ή να ανασκευάσουν θεωρίες των κοινωνικών επιστημών. Η δραστοστρεφής μοντελοποίηση μπορεί έτσι να χρησιμεύσει για τον έλεγχο θεωριών που αφορούν μια μεγάλη γκάμα κοινωνικών φαινομένων. Με αυτή την έννοια, η μέθοδος αυτή μπορεί να αποτελέσει ενός είδους "πειραματικό εργαστήριο" όπου καθίσταται δυνατή η πραγματοποίηση εικονικών μεν πειραμάτων, τα οποία όμως είναι αδύνατο να πραγματοποιηθούν στα πραγματικά εργαστήρια (Elliott & Kiel, 2004). Όσον αφορά μάλιστα στην κοινωνική ψυχολογία, η μεθοδολογική ιδιαιτερότητά της συνίσταται στο ότι, απ' όλες τις κοινωνικές επιστήμες, είναι ίσως η μόνη που χρησιμοποιεί, σχεδόν αποκλειστικά, τον πειραματισμό για να ελέγξει την ορθότητα των υποθέσεών της

(Παπαστάμου, 1999/1990). Η δραστοστρεφής μοντελοποίηση αποτελεί κι αυτή μια μορφή πειραματισμού, μιας και προσφέρει τη δυνατότητα να τροποποιήσουμε τις υποθέσεις και να διαπιστώσουμε αιτιακές σχέσεις, με μόνη διαφορά ότι τα υποκείμενα του πειράματος είναι τεχνητά άτομα, δηλαδή οι δράστες του μοντέλου: προσφέρει δε εξορισμού στον ερευνητή και τον απόλυτο έλεγχο των υποθέσεων του (Gilbert & Troitzsch, 2005/1999).

4.2. Κοινωνικές Προσομοιώσεις και Επιστημολογία

Στην παρούσα ενότητα θα αναφερθούμε σε μια επιστημολογική θεώρηση της δραστοστρεφούς μοντελοποίησης και των κοινωνικών προσομοιώσεων, ως ερευνητικής μεθόδου. Τα ερωτήματα που θα επιχειρηθεί να απαντηθούν είναι, *από επιστημολογική σκοπιά, τι είδους επιστήμη κάνουμε όταν κατασκευάζουμε δραστοστρεφή μοντέλα κοινωνικών προσομοιώσεων, και οι εξηγήσεις των κοινωνικών φαινομένων που μας παρέχονται με αυτή τη μέθοδο είναι επιστημονικές και αν ναι, τι είδους;* Απαντήσεις στα προηγούμενα ερωτήματα έχουν δώσει αρκετοί ερευνητές, κάποιες από τις οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια, κυρίως αυτές που έχουν δοθεί από τον Robert Axelrod και τους Epstein και Axtell.

4.2.1. Δραστοστρεφή Μοντελοποίηση και Κοινωνικές Προσομοιώσεις:

Ο Τρίτος Τρόπος Διεξαγωγής Επιστημονικής Έρευνας

Όσον αφορά την επιστημολογική διάσταση των κοινωνικών προσομοιώσεων, ο Axelrod (1997a) έχει διατυπώσει την άποψη ότι **η κατασκευή και η μελέτη των δραστοστρεφών μοντέλων αποτελεί μια τρίτη προσέγγιση επιστημονικής έρευνας, η οποία μπορεί να αντιπαρατεθεί με τους δύο γνωστούς ως τώρα τρόπους επιστημονικής έρευνας, την επαγωγική (*inductive*⁵) και την παραγωγική (*deductive*⁶) μέθοδο.** Η επαγωγική μέθοδος θα μπορούσε να περιγραφεί ως ανακάλυψη οργανώσεων και μακρο-σημάτων στα εμπειρικά δεδομένα. Η παραγωγική μέθοδος, από την άλλη μεριά, συμπεριλαμβάνει την διατύπωση ενός συνόλου αξιωμάτων και την απόδειξη των θεωρημάτων και των συνεπειών που προκύπτουν από αυτά τα αξιώματα. Η μέθοδος των δραστοστρεφών μοντέλων κοινωνικών προσομοιώσεων, όπως και η επαγωγή, δεν αποδεικνύει θεωρήματα. Αντίθετα παράγει δεδομένα που θα μπορούσαν να

⁵ Παρατήρηση.

⁶ Πείραμα.

χαρακτηριστούν ως ψευδοεμπειρικά⁷. Είναι ξεκάθαρο ότι αυτού του είδους η προσέγγιση δεν μπορεί να θεωρηθεί ούτε επαγωγική ούτε παραγωγική.

Ο σκοπός της δημιουργίας και της μελέτης των δραστοστρεφών μοντέλων προσομοίωσης είναι να κατανοήσουμε ιδιότητες των πολύπλοκων κοινωνικών συστημάτων (Axelrod, 1997a). Παρά το γεγονός όμως ότι τα θέματα προς διερεύνηση μπορεί να είναι εξαιρετικά πολύπλοκα, οι υποθέσεις των δραστοστρεφών μοντέλων πρέπει να είναι οι απλούστερες δυνατές. Η πολυπλοκότητα των μοντέλων πρέπει να βρίσκεται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης και όχι στις υποθέσεις του κάθε μοντέλου (Axelrod, 1997a). Φυσικά στις κοινωνικές επιστήμες υπάρχουν και πολλές άλλες χρήσεις των προσομοιώσεων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, για τις οποίες απαιτείται μια, όσο το δυνατό πιστότερη αναπαραγωγή του συγκεκριμένου κοινωνικού φαινομένου. Μια οικονομική προσομοίωση που στοχεύει να προβλέψει το ύψος των επιτοκίων μετά την πάροδο τριών μηνών απαιτείται να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής, άρα η πολυπλοκότητα των δεδομένων και των υποθέσεων είναι απαραίτητη για την επιτυχία του μοντέλου. Ακόμη, μοντέλα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για εκπαιδευτικούς σκοπούς, όπως για εκπαίδευση των πληρωμάτων ενός νέου τύπου αεροσκάφους, στηρίζουν την επιτυχία τους στην πιστή αναπαράσταση της «πραγματικότητας» και της πολυπλοκότητάς της. *Αν όμως ο σκοπός της μοντελοποίησης είναι να κατανοήσουμε πληρέστερα κάποιους θεμελιώδεις μηχανισμούς ανάδυσης των κοινωνικών φαινομένων, τότε απαιτείται η εστίαση στην απλότητα των υποθέσεων του μοντέλου⁸, ενώ αντίθετα δεν παίζει σημαίνοντα ρόλο η πιστή αναπαράσταση όλων των λεπτομερειών των συγκεκριμένων κοινωνικών συνθηκών. Ένα δραστοστρεφές μοντέλο των κοινωνικών επιστημών που στοχεύει στην βαθύτερη κατανόηση κάποιων κοινωνικών διαδικασιών οφείλει να κριθεί με βάση την ποσότητα και την ποιότητα των αποτελεσμάτων του, με τις υποδείξεις του για περαιτέρω έρευνα και τον εμπλουτισμό της θεωρίας, παρά για την ακρίβεια στην αναπαράσταση των υπό διερεύνηση φαινομένων. Για το σκοπό αυτό η ρεαλιστική αναπαράσταση πολλών λεπτομερειών είναι ανώφελη και μάλιστα πολλές φορές περιορίζει το εύρος των αποτελεσμάτων (Axelrod, 1997a).*

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα περισσότερα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 2 και 3, δηλαδή το μοντέλο διαχωρισμού του Thomas Schelling (1969), το μοντέλο της ντάμας της κοινωνικής αλληλεπίδρασης του James Sakoda (1971), το μοντέλο πολιτισμικής διασποράς του Robert Axelrod (1997a), το δυναμικό μοντέλο της

⁷ Κατερέλος, προσωπική επικοινωνία (8-11-2007)

⁸ Η πολυπλοκότητα αναδύεται και δεν προϋποτίθεται.

θεωρίας της κοινωνικής απήχησης των Nowak και Latané (1994), το μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης των Hegselmann και Krause (2002) καθώς και το μοντέλο πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών.

Αντίθετα με τα προαναφερθέντα δραστοστρεφή μοντέλα, όπου οι υποθέσεις τους είναι οι απλούστερες δυνατές, το μοντέλο Sugarscape των Epstein και Axtell (1996), το οποίο διακρίνεται από τα υπόλοιπα στο ότι δεν παρουσιάζεται ως μια έρευνα σε κάποιο συγκεκριμένο θεωρητικό ή πρακτικό ζήτημα ή κοινωνικό φαινόμενο αλλά σα μια συνολικά νέα προσέγγιση στις κοινωνικές επιστήμες, όπου στόχος είναι να παράγει μια σειρά κοινωνικών φαινομένων με τη σταδιακή προσθήκη επιπλέον υποθέσεων.

4.2.2. Γενετική Κοινωνική Επιστήμη

Κατά την πρώτη παρουσίαση του μοντέλου *Sugarscape* από τους Epstein και Axtell (1996) διατυπώθηκε η ιδέα μιας γενετικής επιστήμης που θα εξερευνούσε και θα προσομοίωνε τον «πραγματικό» κόσμο μέσω διαδικασιών παραγωγής μοντέλων προσομοίωσης των υπό μελέτη κοινωνικών φαινομένων. Οι Epstein και Axtell (1996:177), όπως και ο Axelrod, υποστηρίζουν ότι η δραστοστρεφής μοντελοποίηση και η δημιουργία τεχνητών κοινωνιών αποτελεί μια ξεχωριστή μέθοδο έρευνας για τις κοινωνικές επιστήμες, για την οποία μάλιστα προτείνουν τον όρο **γενετική επιστήμη (generative science)**⁹. Κατά τους Epstein και Axtell, μια τέτοια μέθοδο φιλοδοξεί να υλοποιήσει το **μοντέλο Sugarscape** (Epstein & Axtell, 1996). Το μοντέλο αυτό διακρίνεται από τα υπόλοιπα στο ότι δεν παρουσιάζεται ως μια έρευνα σε κάποιο

⁹ Μεταφράζουμε τον αγγλικό όρο generative με το επίθετο γενετική. Ένας πιο δόκιμος όρος θα ήταν το παραγωγική. Δυστυχώς ο όρος αυτός στην ελληνική γλώσσα χρησιμοποιείται ήδη στη λογική και την επιστημολογία (παραγωγικός και επαγωγικός συλλογισμός). Στην αγγλική γλώσσα για τον παραγωγικό συλλογισμό υπάρχει ο όρος deductive και για την παραγωγική επιστημονική μέθοδο ο όρος deduction (deduce=συμπεραίνω, produce=παράγω, generate=παράγω). Ο Axtell, χρησιμοποιεί τον όρο generate γιατί πιστεύει ότι το είδος αυτό της κοινωνικής επιστήμης αποτελεί ένα είδος παραγωγικής επιστήμης (Axtell, 1999:43). Ο ίδιος αναφέρει ότι λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορές μεταξύ της δραστοστρεφούς μοντελοποίησης και των επαγωγικών και παραγωγικών κοινωνικών επιστημών, χρειαζόταν ένας ιδιαίτερος όρος για να τις χαρακτηρίσει και η επιλογή του όρου γενετική επιστήμη εμπνεύστηκε από την πρόωρη χρήση του όρου από τον Chomsky. Σύμφωνα με τον Chomsky (1965) η συντακτική θεωρία αναζητά τα ελάχιστα συστήματα κανόνων που είναι επαρκή για να παραγάγουν τις δομές ενδιαφέροντος, ανάμεσά τους και γραμματικές κατασκευές. Όσον αφορά στη γενετική επιστήμη βέβαια, οι παραγμένες δομές ενδιαφέροντος είναι κοινωνικές (Axtell, 1999).

ιδιαίτερο θεωρητικό ή πρακτικό ζήτημα ή κοινωνικό φαινόμενο αλλά σε μια συνολικά νέα προσέγγιση στις κοινωνικές επιστήμες.

Το Sugarscape είναι κυψελοειδές αυτόματο, διάστασης 50x50, όπου κάθε κελί περιέχει κάποια προκαθορισμένη ποσότητα ζάχαρης (sugar), η οποία αρχικά αποτελεί το μοναδικό πόρο στην τεχνητή αυτή κοινωνία. Η συμπεριφορά των πρακτόρων περιπλέκεται σε κάθε μια από τις συνεχόμενες επεκτάσεις του μοντέλου και οι κατασκευαστές του διερευνούν σταδιακά μια όλο και πιο λεπτομερή τεχνητή κοινωνία, στην οποία περιλαμβάνονται όλο και περισσότεροι και πιο πολυσύνθετοι δράστες. Το μοντέλο αυτό, είναι εξαιρετικά φιλόδοξο σε σχέση με την προοπτική μιας «γενετικής κοινωνικής επιστήμης», σύμφωνα με την οποία η κατανόηση κάποιου σύνθετου κοινωνικού φαινομένου θα κρίνεται από την επιτυχία με την οποία μπορεί να παραχθεί το φαινόμενο αυτό από σχετικά απλούς μεμονωμένους κανόνες μέσα σε μια τεχνητή κοινωνία.

Είναι γνωστό ότι πολλές σημαντικές κοινωνικές διαδικασίες δεν είναι δυνατό να διαχωριστούν σε επιμέρους διαδικασίες, οικονομικές, δημογραφικές, πολιτιστικές, των οποίων η εξειδικευμένη ανάλυση να μπορεί κάπως "να αθροιστεί" για να παραγάγει μια επαρκή ανάλυση ολόκληρης της διαδικασίας. Αντίστοιχα είναι οργανωμένες οι κοινωνικές επιστήμες και τα αντίστοιχα επιστημονικά περιοδικά, οικονομικά, δημογραφικά, ανθρωπολογικά, κλπ. Μολονότι αυτή η διαίρεση φαίνεται να είναι τεχνητή, δεν υπάρχει κάποια παραδοσιακή μέθοδο για να διερευνηθούν ταυτόχρονα όλων των ειδών οι διαδικασίες μαζί, καθώς αυτές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Στο μοντέλο Sugarscape κάθε μεμονωμένος δράστης ακολουθεί απλούς κανόνες που κυβερνούν τις μετακινήσεις του, τη σεξουαλική αναπαραγωγή, τη συμπεριφορά στις εμπορικές συναλλαγές, τις συγκρούσεις, την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον, τη μετάδοση του πολιτισμού, των ασθενειών κλπ. Αυτοί οι κανόνες μπορούν όλοι να είναι όλοι "ενεργοί" ταυτόχρονα. Αρχίζοντας από την απλή συμπεριφορά συλλογής ζάχαρης (δηλαδή συσσώρευσης πλούτου) με την οποία οι δράστες κινούνται, στη συνέχεια διαμορφώνουν όλο και περισσότερο σύνθετες συμπεριφορές, όπως εμπόριο, πόλεμο, φυλετικά ή πολιτιστικά γνωρίσματα, μετάδοση ασθενειών, μεταβίβαση πλούτου (κληρονομιάς) στην επόμενη γενιά, γεννήσεις και θάνατοι κ.α. Όταν ένας αρχικός πληθυσμός τέτοιων πρακτόρων απελευθερώνεται σε ένα περιβάλλον με το οποίο αλληλεπιδρά, η προκύπτουσα «κοινωνία» συνδέει αναπόφευκτα τη δημογραφία, τα οικονομικά, την πολιτιστική προσαρμογή, τη γενετική εξέλιξη, τις συγκρούσεις, τις

περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την επιδημιολογία. Τα άτομα είναι πολυδιάστατα και κατά συνέπεια το ίδιο ισχύει και για την κοινωνία.

Κατόπιν δεκαετούς συνεχούς δραστηριότητας και πολλαπλών δημοσιεύσεων ο Epstein στο βιβλίο του *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling* (Epstein, 2006) αναπτύσσει πλήρως την άποψή του, υποστηρίζοντας ότι αυτή η ισχυρή, νέα μέθοδος των δραστοστρεφών μοντέλων κοινωνικών προσομοιώσεων αλλάζει το πρόσωπο των κοινωνικών επιστημών, επιτρέποντάς τους να ανταποκριθούν σε νέα πρότυπα επιστημονικής εξήγησης, σύμφωνα με τα οποία κάποιος "παράγει" (*generates*) το υπό μελέτη μάκρο-κοινωνικό φαινόμενο στα πλαίσια μιας τεχνητής κοινωνίας αλληλεπιδρώντων πρακτόρων, όπου αυτοί οι ετερογενείς, λογικοί δράστες αντιπροσωπεύονται ως μαθηματικά αντικείμενα ή τμήματα λογισμικού ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ο σκοπός της μεθόδου αυτής είναι να παρέχει επαρκείς αρχικές μικρο-συνθήκες (δράστες, περιβάλλον και κανόνες αλληλεπίδρασης), ώστε η διεξαγωγή της προσομοίωσης να παράγει (*generate*) τις μάκρο-ιδιότητες και δομές που επιθυμούμε να μελετήσουμε. Αντικαθιστάται με τον τρόπο αυτό η ερώτηση «μπορείς να το ερμηνεύσεις;» με την ερώτηση «μπορείς να το παράγεις;» Προτείνεται ακόμη η δημιουργία ενός γενετικού (*generative*) προγράμματος για τις κοινωνικές επιστήμες, στο οποίο τα δραστοστρεφή μοντέλα και οι τεχνητές κοινωνίες θα αποτελούν το βασικό επιστημονικό όργανο. Για να τεκμηριωθεί ο όρος γενετική επιστήμη θα αναφερθούν στη συνέχεια μια σειρά από χαρακτηριστικά γνωρίσματα που διακρίνουν την ερευνητική αυτή προσέγγιση και από τη "επαγωγική" και "παραγωγική" επιστημονική έρευνα καθώς και τη συνεισφορά συγκεκριμένων μοντέλων στην έρευνα των κοινωνικών επιστημών.

Το βασικό επιχείρημα του Epstein (2006) είναι ότι μέσω της μελέτης των δραστοστρεφών μοντέλων επιτυγχάνεται ένας νέος τύπος επιστημονικής εξήγησης, ο οποίος αποτελεί στην ουσία μια *παραγωγική εξήγηση* (*generative explanation*), η έννοια της οποίας θα αναλυθεί στη συνέχεια, και τεκμηριώνει την άποψή του με παραδείγματα από τομείς πολύ διαφορετικούς, όπως την αρχαιολογία, τις διεθνείς πολιτικές συγκρούσεις, την εξέλιξη των κανόνων (νορμών), την επιδημιολογία, τα οικονομικά που αφορούν στη συνταξιοδότηση, και αρκετούς άλλους.

Για τους Epstein και Axtell (1996), τα δραστοστρεφή μοντέλα περιλαμβάνουν τρία βασικά συστατικά: τους δράστες, το περιβάλλον τους και τους κανόνες συμπεριφοράς και αλληλεπίδρασης των πρακτόρων. Οι δράστες είναι οι άνθρωποι των τεχνητών κοινωνιών. Το περιβάλλον τους είναι ένα μέσο ξεχωριστό, μέσα στο οποίο οι δράστες δρουν, συμπεριφέρονται και αλληλεπιδρούν με τους υπόλοιπους δράστες. Οι

κανόνες καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι δράστες συμπεριφέρονται και αλληλεπιδρούν καθώς επίσης και τον τρόπο που το περιβάλλον μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Δεν υπάρχουν κοινωνικές δομές που να επιδρούν στα μεμονωμένα άτομα αλλά αντίθετα οι θεμελιώδεις κοινωνικές δομές και οι διομαδικές συμπεριφορές προκύπτουν από τις αλληλεπιδράσεις των μεμονωμένων πρακτόρων, οι οποίοι αναπτύσσουν δραστηριότητες στο τεχνητό περιβάλλον που «ζουν» σύμφωνα με τους κανόνες του μοντέλου(προσέγγιση κάτωθεν (bottom-up)). Οι κανόνες αυτοί θέτουν ακόμη περιορισμούς στις πληροφορίες και στην υπολογιστική ικανότητα κάθε πράκτορα. Αυτή η προσέγγιση ακολουθεί σαφώς το μεθοδολογικό αναγωγισμό, δεδομένου ότι υπάρχουν μεμονωμένοι δράστες που δεσμεύονται από κανόνες, η συνολική συμπεριφορά των οποίων αποτελεί την κοινωνία.

Για τον επιστήμονα που εφαρμόζει αυτή τη μέθοδο επιστημονικής έρευνας, η εξήγηση της ανάδυσης των μακροσκοπικών κοινωνικών κανονικότητων, είτε αφορούν στις νόρμες (norms), είτε την ύπαρξη κοινωνικών ομάδων, είτε την ισορροπία των τιμών (price equilibria), απαιτεί να απαντηθεί η εξής ερώτηση: *πως μπορεί από τις αποκεντρωμένες τοπικές αλληλεπιδράσεις αυτόνομων πρακτόρων (heterogeneous autonomous agents) στο μικρό επίπεδο να αναδυθεί (emerge) ή, διαφορετικά, να παραχθεί (be generated) η ζητούμενη κανονικότητα στο μάκρο επίπεδο* (Epstein, 1999). Αν δοθεί ένα κοινωνικό φαινόμενο, μια κανονικότητα στο μάκρο επίπεδο προς διερεύνηση, ένα εξηγητέο (*explanandum*), το «*πείραμα*» της δραστοστρεφούς μοντελοποίησης έχει ως εξής: τοποθετούμε σε ένα χωρικό περιβάλλον έναν πληθυσμό από αυτόνομους δράστες, τους επιτρέπουμε να αλληλεπιδρούν σύμφωνα με απλούς κανόνες και επιδιώκουμε την παραγωγή της υπό διερεύνηση μάκρο κανονικότητας κάτωθεν (bottom up) (Epstein, 1999). Στόχος αυτής της μεθόδου είναι να προσδιοριστούν μηχανισμοί που δημιουργούν οργάνωση και δομή στην ανθρώπινη κοινωνία. .

Βέβαια, σύμφωνα με τον ίδιο συγγραφέα, τα δραστοστρεφή μοντέλα παρέχουν μόνο την *ένδειξη* ότι ένα δεδομένο σύνολο υποθέσεων στο μικρό επίπεδο, που αφορά κανόνες συμπεριφοράς και αλληλεπίδρασης των πρακτόρων στο τοπικό μικρό επίπεδο, είναι στην πραγματικότητα μια *επαρκής εξήγηση* του μάκρο φαινομένου που αποτελούσε τον στόχο της μοντελοποίησης. Οι κατασκευαστές του μοντέλου μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιήσουν στατιστικές μεθόδους για να μετρήσουν την παραγωγική επάρκεια του συνόλου των αξιωμάτων του μοντέλου, να εξετάσουν δηλαδή το βαθμό της συμφωνίας μεταξύ του «πραγματικού» κόσμου και της παραγόμενου μάκρο-φαινομένου (Axtell & Epstein, 1999). Ένας μεγάλος βαθμός συμφωνίας αποδεικνύει ότι το μάκρο-

κοινωνικό φαινόμενο στόχος, το εξηγηταίο (*explanandum*), είτε πρόκειται για τη κατανομή του πλούτου, το φυλετικό διαχωρισμό, την ισορροπία των τιμών, το σχηματισμό ομάδων γνώμων ή οποιοδήποτε μάκρο φαινόμενο που έχει αποτελέσει στόχο μιας δραστοστρεφούς μοντελοποίησης, είναι εφικτό ως αποτέλεσμα των υποθέσεων του μοντέλου, κατόπιν επαναλαμβανόμενης εφαρμογής τους. Πράγματι η κατασκευή του μοντέλου θεωρείται ως απαραίτητος όρος για την εξήγηση την ίδια (Axtell, 2000a). Ο γενετιστής (generativist) επιθυμεί έναν απολογισμό της επίτευξης της διαμόρφωσης από ένα αποκεντρωμένο σύστημα των ετερογενών αυτόνομων πρακτόρων. Κατά συνέπεια, το ρητό των γενετικών κοινωνικών επιστημών θα μπορούσε να διατυπωθεί ως εξής: *εάν δεν μπόρεσες να παράγεις το φαινόμενο από ένα αποκεντρωμένο σύστημα ετερογενών, αυτόνομων πρακτόρων, δεν εξήγησες την ανάδυσή του* (Epstein, 1999)

Προφανώς, το αντίστροφο δεν ισχύει: αν το παρήγαγες δε σημαίνει ότι το εξήγησες, παρά μόνο ότι βρήκες μια πιθανή ή υποψήφια εξήγηση. Με τον τρόπο αυτό ο Epstein αποφεύγει την απαίτηση για επιστημονική εξήγηση (*the explanatory claim*) αλλά αντίθετα υποστηρίζει μια πιο ασθενή απαίτηση για πιθανή εξήγηση (*potential explanation claim*). Αν ένα σύνολο υποθέσεων (*microspecification*) μ στο μικρό επίπεδο παράγει μια μακροδομή τότε το μ αποτελεί μια υποψήφια εξήγηση (*candidate explanation*) (Epstein 1999:43). Ο Epstein διευκρινίζει ότι αυτή η ρήση ισχύει μόνο για τα μακροσκοπικά φαινόμενα που αναδύονται από συμπεριφορές και αλληλεπιδράσεις στο μικρό επίπεδο. Μπορεί μάλιστα να έχει βρεθεί μια μάλλον απίθανη εξήγηση: απλά και μόνο να παράγει κάποιο μοντέλο την μάκρο δομή, δεν εξηγεί απαραίτητα ικανοποιητικά το φαινόμενο. Εν κατακλείδι, αν ένα δραστοστρεφές μοντέλο με ένα σύνολο αξιωμάτων μ δεν παράγει το μάκρο φαινόμενο χ, τότε το μ δεν αποτελεί μια υποψήφια επιστημονική εξήγηση για το χ. Αν το μ παράγει το χ τότε αποτελεί μια πιθανή επιστημονική εξήγηση. Για λόγους απλότητας της διατύπωσης αναφέρουμε ότι το χ παράγεται από το μ ή όχι. Στην πραγματικότητα πάντα παράγεται σε κάποιο βαθμό, μικρό ή μεγάλο και ποτέ απόλυτα.

Μπορεί ακόμη να συμβεί το ίδιο μάκρο φαινόμενο να παράγεται από δύο διαφορετικά δραστοστρεφή μοντέλα όπου οι παραγόμενες μάκρο δομές να ταιριάζουν με τα δεδομένα του «πραγματικού» κόσμου εξίσου καλά. Σύμφωνα με τον Epstein (1999), στις περιπτώσεις αυτές απαιτείται επιπλέον ερευνητική εργασία και παραγωγή νέων πειραματικών σχεδιασμών και εμπειρικών δεδομένων, ώστε να υποστηριχθεί περαιτέρω μία από τις πολλαπλές εναλλακτικές επιλογές. Εάν υπάρχουν περισσότερα από ένα υποψήφια μ τότε περαιτέρω εργασία απαιτείται στο εμπειρικό πεδίο, ώστε να καθοριστεί ποιο μ αποτελεί την καταλληλότερη επιστημονική εξήγηση. Με τον τρόπο αυτό τα

δραστοστρεφή μοντέλα μπορούν ακόμη και να τροφοδοτήσουν την εργαστηριακή έρευνα με υποθέσεις που έρχονται σε αντίθεση με την λογική ή τη διαίσθηση (counterintuitive hypotheses) του ερευνητή σχετικά με τη μεμονωμένη συμπεριφορά των ατόμων. Κάποιες φορές παράξενες και σε αντίθεση με τη λογική υποθέσεις που αφορούν τη συμπεριφορά ή/και τις αλληλεπιδράσεις μεμονωμένων πρακτόρων, μπορούν να παραγάγουν μακροδομές και μάκρο φαινόμενα που μιμούνται με μεγάλη επιτυχία τα αντίστοιχα παρατηρηθέντα. Είναι στις περιπτώσεις αυτές δυνατό να είναι οι συγκεκριμένες μικρο-υποθέσεις αυτές που στην «πραγματικότητα» παράγουν τις μάκρο κανονικότητες; Ίσως τότε να είναι ερευνητικά χρήσιμο να σχεδιαστούν και διεξαχθούν αντίστοιχα εργαστηριακά πειράματα για περεταίρω διερεύνηση των εν λόγω υποθέσεων (Epstein, 1999). Το αυτό ισχύει και όταν συμβεί δύο διαφορετικά μοντέλα, με διαφορετικές μικρο-υποθέσεις παράγουν το ίδιο μάκρο φαινόμενο. Απαιτείται τότε περεταίρω διερεύνηση και σχεδιασμός εμπειρικής εργαστηριακής έρευνας για να αποφασιστεί πιο είναι το περισσότερο κατάλληλο για να παρέχει επιστημονική εξήγηση στο υπό μελέτη μάκρο φαινόμενο. Αυτός είναι ακόμη ένας τρόπος με τον οποία η δραστοστρεφής μοντελοποίηση μπορεί να συμβάλει στην εμπειρική έρευνα κοινωνικών επιστημών.

Επανερχόμενοι στη γενετική κοινωνική επιστήμη σύμφωνα με τον Epstein (1999), από επιστημολογική σκοπιά, παρότι εμπειρική, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, δεν είναι *επαγωγική (inductive)*, τουλάχιστον σύμφωνα με τη χρήση του όρου στις κοινωνικές επιστήμες, όπου π.χ. μετά τη συγκέντρωση μακροοικονομικών στοιχείων προσδιορίζονται οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών.

Η σχέση της γενετικής κοινωνικής επιστήμης με την *παραγωγική μέθοδο (deduction)* απαιτεί μεγαλύτερη ανάλυση. Η σύνδεση τους έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή υπάρχει μια πνευματική παράδοση σύμφωνα με την οποία θεωρούμε ότι μια παρατήρηση *εξηγείται* πλήρως όταν μπορούμε να συναγάγουμε την πρόταση που εκφράζει την παρατήρηση αυτή από άλλες γενικότερες προτάσεις. Παραδείγματος χάριν, *εξηγούμε* την παρατήρηση του Γαλιλαίου στον κεκλιμένο πύργο της Πίζας, ότι δηλαδή τα βαριά και τα ελαφριά αντικείμενα που πέφτουν από το ίδιο ύψος χτυπούν το έδαφος ταυτόχρονα, όταν συμπεραίνουμε με αυστηρό τρόπο από το δεύτερο νόμο Newton και το νόμο της βαρύτητας, την ακόλουθη πρόταση: «Η επιτάχυνση ενός σώματος που πραγματοποιεί ελεύθερη πτώση κοντά στην επιφάνεια της γης είναι ανεξάρτητη από τη μάζα του». Κατ' αναλογία επιδιώκουμε να εξηγήσουμε τα μακροσκοπικά κοινωνικά φαινόμενα, απαιτώντας να παραχθούν από ένα δραστοστρεφές μοντέλο προσομοίωσης.

Σύμφωνα με τον Epstein (1999) μπορούμε νόμιμα να υποστηρίξουμε ότι στην περίπτωση αυτή τα φαινόμενα είναι αυστηρά συναγόμενα σύμφωνα με την επαγωγική μέθοδο. Ειδικότερα, εάν κάποιος αποδέχεται τον *Αίτημα Church-Turing (Church-Turing Thesis)*¹⁰, σύμφωνα με τον οποίο οποιοσδήποτε υπολογισμός που δύναται να πραγματοποιηθεί μπορεί να εκτελεσθεί από έναν αλγόριθμο που τρέχει σε έναν υπολογιστή, υπό τον όρο είναι διαθέσιμος ο χρόνος και ο χώρος αποθήκευσης που απαιτείται, τότε κάθε υπολογισμός, συμπεριλαμβανομένου κάθε δραστοστρεφούς μοντέλου προσομοίωσης, μπορεί να εκτελεσθεί από μια κατάλληλη υπολογιστική μηχανή (Jeffrey, 1991). Το ακόλουθο θεώρημα στη γλώσσα της τυπικής λογικής ορίζει ότι κάθε πρόγραμμα μπορεί να γραφεί από μια τυπική γλώσσα πρώτης τάξης (first-order language). Στο ακόλουθο θεώρημα με N συμβολίζεται το σύνολο των φυσικών αριθμών.

Θεώρημα: Έστω P πρόγραμμα. Υπάρχει μια τυπική γλώσσα πρώτης τάξης L και για κάθε $a \in N$ μια πρόταση $C(a)$ της L , έτσι ώστε για όλα τα $a \in N$, ο P -υπολογισμός με είσοδο a τερματίζει $\Leftrightarrow$ η πρόταση $C(a)$ ισχύει λογικά (Epstein 1999:43).

Αυτό το θεώρημα επιτρέπει τη διασύνδεση της μη αποφασισιμότητας του

¹⁰ Ο Άλαν Τούρινγκ (1912-1954) ήταν Βρετανός μαθηματικός, δάσκαλος της λογικής, κρυπτογράφος και θεωρείται συχνά πατέρας της επιστήμης των υπολογιστών. Με τη δοκιμή *Turing*, είχε μια σημαντική και χαρακτηριστική συμβολή στη συζήτηση σχετικά με τη τεχνητή νοημοσύνη: εάν είναι δυνατό να ειπωθεί ότι μια μηχανή γνωρίζει και μπορεί να σκεφτεί. Παρείχε μία επίσημη έννοια του αλγορίθμου και των υπολογισμών αριθμών με τη μηχανή *Turing*, διατυπώνοντας την ευρέως αποδεκτή έκδοση "*Turing*" για την *καθολική μηχανή Turing*, δηλαδή ότι οποιοδήποτε πρακτικό πρότυπο υπολογισμού έχει είτε ένα ισότιμο είτε ένα υποσύνολο των ικανοτήτων μιας μηχανής *Turing*. Σχεδίασε επίσης έναν από τους πρώτους ηλεκτρονικούς προγραμματίσιμους ψηφιακούς υπολογιστές. Στο άρθρο του "*Για τους υπολογίσιμους αριθμούς, με μια εφαρμογή στην αποφασισιμότητα*", ο Τούρινγκ αναδιατύπωσε τα αποτελέσματα του 1931 του Κούρτ Γκέντελ για τα όρια της απόδειξης και του υπολογισμού, αντικαθιστώντας την επίσημη γλώσσα του Γκέντελ από αυτές που καλούνται τώρα καθολικές μηχανές *Turing*. Οι μηχανές *Turing* είναι αφηρημένες συσκευές σύμβολο-χειρισμού που, παρά την απλότητά τους, μπορούν να προσαρμοστούν για να μιμηθούν τη λογική οποιοσδήποτε υπολογιστή που θα μπορούσε ενδεχομένως να κατασκευαστεί. Αρχικά θεωρήθηκε ότι η κατασκευή τους είναι τεχνικά εφικτή. Οι μηχανές *Turing* δεν αποτέλεσαν μια πρακτική τεχνολογία υπολογισμού αλλά ένα πείραμα ελέγχου των ορίων των μηχανικών υπολογισμών που είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν και κατά συνέπεια δεν κατασκευάστηκαν ποτέ. Η επιστήμη της πληροφορικής ασχολείται με τη μελέτη των αφηρημένων ιδιοτήτων τους και είναι σημαντική η συνεισφορά τους στην έρευνα που διεξάγεται στα πλαίσια της θεωρίας της πολυπλοκότητας. Ο Κούρτ Γκέντελ απέδειξε το 1931 ότι μια μηχανή *Turing* θα ήταν σε θέση να υπολογίσει οποιοδήποτε κατανοητό μαθηματικό πρόβλημα εάν ήταν δυνατό να αναπαρασταθεί από έναν αλγόριθμο, ακόμα κι αν καμία πραγματική μηχανή *Turing* δεν θα ήταν πιθανό να έχει τις πρακτικές εφαρμογές, όντας πολύ πιο αργή από τις εναλλακτικές λύσεις.

προβλήματος τερματισμού¹¹ με το πρόβλημα της εγκυρότητας στην λογική πρώτης τάξης¹². Υπάρχει δηλαδή μια αντιστοιχία μεταξύ ενός υπολογισμού και μιας λογικής παραγωγής, κάθε φορά που ο υπολογισμός ενός αλγορίθμου τερματίζει, μπορεί δηλαδή να ολοκληρωθεί, είναι δυνατό να αποδείξουμε λογικά το αποτέλεσμα του υπολογισμού. Το συμπέρασμα αυτό ισχύει ακόμη και για τις περιπτώσεις που ο υπολογισμός συμπεριλαμβάνει στοχαστικά στοιχεία, δεδομένου ότι σε οποιοδήποτε υπολογιστή αυτά παράγονται από μια αιτιοκρατική ψευδοτυχαία παραγωγή αριθμών. Σύμφωνα με τον Salmon (1984), ακόμα και η διεξαγωγή μιας στατιστικής ανάλυσης στα αποτελέσματα μιας σειράς προσομοιώσεων, χρησιμοποιώντας διαφορετικές αρχικές συνθήκες θα μπορούσε να θεωρηθεί ως ένα παραγωγικό συμπέρασμα που προκύπτει από έναν επαγωγικό στατιστικό υπολογισμό. Η τελική άποψη του Epstein (1999) είναι ότι, τουλάχιστον από τεχνική σκοπιά, *κάθε γενετικό (generative) αποτέλεσμα είναι και παραγωγικό (deductive) αποτέλεσμα*.

Το αντίστροφο όμως δεν ισχύει: δεν έχουν όλα τα παραγωγικά επιχειρήματα τον κατασκευαστικό χαρακτήρα των δραστοστρεφών μοντέλων προσομοίωσης, όπως για παράδειγμα οι μη κατασκευαστικές αποδείξεις ύπαρξης στα μαθηματικά οικονομικά και στη θεωρία παιγνίων, όπου με την μέθοδο της απαγωγής σε άτοπο (η οποία είναι μια παραγωγική (deductive) μέθοδος) αποδεικνύονται μια σειρά θεωρημάτων για την ύπαρξη σταθερού σημείου ισορροπίας. Θα μπορούσαμε να σκιαγραφήσουμε την απόδειξη ως εξής: χρησιμοποιώντας ως αξίωμα της αρχής της αποκλίσεως του τρίτου (law of the excluded middle) ότι δηλαδή το x είτε υπάρχει είτε δεν υπάρχει, υποθέτουμε ότι το x δεν υπάρχει και μετά από μια σειρά από παραγωγικούς συλλογισμούς καταλήγουμε σε ένα

¹¹ Σύμφωνα με τη *θεωρία της υπολογισιμότητας (computability theory)*, το *πρόβλημα τερματισμού (halting problem)* είναι ένα *πρόβλημα απόφασης (decision problem)* που μπορεί να περιγραφεί, με όχι αυστηρά μαθηματικό τρόπο ως εξής: αν δοθεί μια περιγραφή ενός προγράμματος και μια πεπερασμένη ακολουθία αρχικών δεδομένων για το πρόγραμμα αυτό, είναι δυνατό να καθοριστεί αν το πρόγραμμα θα τερματίσει; Ο Alan Turing απέδειξε το 1936 ότι ένας γενικός αλγόριθμος επίλυσης για το πρόβλημα αυτό για όλα τα πιθανά ζεύγη προγραμμάτων και αρχικών συνθηκών είναι αδύνατο να κατασκευαστεί και άρα το πρόβλημα αυτό είναι *μη αποφασίσιμο (undecidable)* για όλες τις Μηχανές Turing

¹² Η *λογική πρώτης τάξης (first-order logic)* είναι μια συμβολική γλώσσα, η οποία χρησιμοποιείται από τους μαθηματικούς, τους φιλοσόφους, τους γλωσσολόγους καθώς και τους ερευνητές στο χώρο της επιστήμης των υπολογιστών. Η λογική πρώτης τάξης είναι ένα σύστημα που επεκτείνει την προτασιακή λογική, διαθέτοντας τη δυνατότητα έκφρασης σχέσεων μεταξύ των ατόμων (π.χ. ανθρώπων, αριθμών και "πραγμάτων" γενικότερα).

συμπέρασμα που είναι αδύνατο, παράγει μια αντίφαση. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι το x υπάρχει. *Αλλά έχουμε αποτύχει να βρούμε το x ή έναν αλγόριθμο που θα το παρήγαγε.*

Βέβαια, επειδή κανένας γενικός επιστημονικός (επικαλύπτων) νόμος δεν συμπεριλαμβάνεται, η παραγωγική επάρκεια αποτυγχάνει να ικανοποιήσει τη δεύτερη συνθήκη επάρκειας του παραγωγικού-νομολογικού μοντέλου επιστημονικής εξήγησης (Epstein, 1999). Οι επιστημονικές εξηγήσεις διασαφηνίζουν γιατί συμβαίνουν τα γεγονότα, γιατί κάποια πράγματα αλλάζουν με το χρόνο ή γιατί καταστάσεις και γεγονότα μπορούν να συν-μεταβάλλονται χρονικά ή χωρικά. Δυστυχώς, ως τώρα δεν υπάρχει γενική συμφωνία για το πώς πρέπει να είναι μια αποδεκτή εξήγηση. Πολλοί κοινωνιολόγοι, για παράδειγμα, συνδέουν την εξήγηση ενός κοινωνικού φαινομένου με τη δυνατότητα πρόβλεψης, ενώ για πολλούς φιλόσοφους, σε μια αποδεκτή εξήγηση, το προς εξήγηση γεγονός πρέπει να υπαχθεί σε κάποιο γενικό αιτιατό νόμο (Hedström, 2005).

Ως γνωστόν, στην κλασσική εργασία τους του 1948, οι Hempel και Oppenheim διαμόρφωσαν με μεγάλη ακρίβεια ένα σχήμα επιστημονικής εξήγησης το οποίο κατέχει έκτοτε κεντρική θέση σε όλες τις σχετικές συζητήσεις. Πρόκειται για το γνωστό ως *παραγωγικό-νομολογικό (deductive-nomological) μοντέλο της επιστημονικής εξήγησης*. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, οι Hempel και Oppenheim (1948) παραθέτουν τέσσερις συνθήκες επάρκειας για τις παραγωγικές-νομολογικές εξηγήσεις: α) το εξηγητέο (explanandum) πρέπει να είναι λογική συνέπεια του εξηγούντος (explanans), β) στο εξηγούν πρέπει να περιέχεται τουλάχιστον ένας γενικός νόμος, ο οποίος θα πρέπει να είναι απαραίτητος για τη συναγωγή του εξηγητέου, γ) το εξηγούν πρέπει να έχει εμπειρικό περιεχόμενο, να είναι δυνατός δηλαδή ο έλεγχός του μέσω πειράματος ή παρατήρησης και τέλος δ) οι προτάσεις που συνιστούν το εξηγούν πρέπει να είναι αληθείς. Οι τρεις πρώτες έχουν καταχωρηθεί ως λογικές συνθήκες επάρκειας και η τέταρτη ως εμπειρική. Οι Hempel και Oppenheim έδωσαν έμφαση στον αποφασιστικής σημασίας ρόλο που παίζουν οι νόμοι στην επιστημονική εξήγηση, γι' αυτό και το παραγωγικό-νομολογικό μοντέλο συχνά ονομάζεται και *μοντέλο του επικαλύπτοντος νόμου (covering law model)*. Οι νόμοι παίζουν κεντρικό ρόλο ακόμα και σε άλλες αντιλήψεις περί επιστημονικής εξήγησης. Σύμφωνα με τον Salmon (1984), ο νόμος είναι μια κανονικότητα που έχει ισχύ για όλο το σύμπαν, σε κάθε τόπο και σε κάθε χρόνο και μια *πρόταση-δηλώνουσα-νόμο (law statement)* είναι απλώς μια πρόταση που δηλώνει ότι μια τέτοια κανονικότητα υφίσταται.

Στο βαθμό που υπάρχουν γενικοί νόμοι του τύπου ‘Όλα τα A είναι B ,’ η ιδέα των Hempel και Oppenheim φαντάζει ιδιαίτερα ελκυστική. Αν B είναι μια ιδιότητα της κοινωνίας x , μια εντελώς λογική απάντηση στην ερώτηση ‘Γιατί η x είναι B ;’ θα ήταν ότι η κοινωνία x είναι ‘ A ’ και ‘Όλα τα A είναι B .’ Αλλά μολονότι θεωρούνται, από μια πρώτη ματιά, ελκυστικές, τέτοιες εξηγήσεις έχουν ελάχιστη σχέση με τις κοινωνικές επιστήμες, μιας και ακόμη δεν γνωρίζουμε κανένα γενικό νόμο του τύπου ‘Όλα τα A είναι B ’ και επιπροσθέτως οι ανθρώπινες πράξεις φαίνεται να καθιστούν τέτοιους νόμους ιδιαίτερα απίθανους στις κοινωνικές και τις ανθρώπινες επιστήμες. Σύμφωνα με τον Hedström (2005), παρά το ότι το παραγωγικό-νομολογικό μοντέλο έχει πολλά ελκυστικά χαρακτηριστικά δεν θεωρείται ως ιδιαίτερα χρήσιμο για την κοινωνιολογία και δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε αυτή διότι οι αιτιοκρατικοί κοινωνικοί νόμοι, που προϋποθέτει, δεν υφίστανται.

Μιας και δεν είναι όλες οι εξηγήσεις παραγωγικο-νομολογικού τύπου, αργότερα ο Hempel (1965) πρότεινε μια θεωρία στατιστικής εξήγησης που περιλαμβάνει δύο τύπους, το *παραγωγικό-στατιστικό μοντέλο (deductive-statistical)*, όπου οι στατιστικές κανονικότητες εξηγούνται μέσω της παραγωγής τους από πιο ευρείς στατιστικούς νόμους και το *επαγωγικό-στατιστικό μοντέλο (inductive-statistical)*, το οποίο εξηγεί επιμέρους συμβάντα υπάγοντάς τα σε στατιστικούς νόμους, με τον ίδιο τρόπο που οι παραγωγικές νομολογικές εξηγήσεις υπάγουν επιμέρους γεγονότα σε καθολικούς νόμους. Οι στατιστικές εξηγήσεις βρίσκονται στο επίκεντρο του μεγαλύτερου μέρους των εμπειρικών ερευνών στην κοινωνιολογία, αλλά σπάνια συζητούνται σε μεθοδολογικά πλαίσια. Το χαρακτηριστικό, που ορίζει τη στατιστική εξήγηση, όπως εδώ την εννοούμε, είναι ότι, για να έχουμε μια κατάλληλη εξήγηση, χρειάζεται να έχουμε πρώτα προσδιορίσει τους παράγοντες, οι οποίοι φαίνεται να καθορίζουν την πιθανότητα του προς εξήγηση γεγονότος. Ο προσδιορισμός τέτοιων παραγόντων τυπικά υλοποιείται με το χωρισμό του υπό μελέτη πληθυσμού σε διαφορετικές κατηγορίες. Οι διαφορές σε κάποιες κοινωνικές καταστάσεις ή γεγονότα θεωρούνται ότι εξηγούνται, όταν οι χρησιμοποιούμενοι διαχωρισμοί του πληθυσμού τις εξαλείφουν, και θεωρούνται ότι εξηγούνται μερικώς, όταν τις εξαλείφουν μόνο εν μέρει. Στο πλαίσιο της ανάλυσης παλινδρόμησης, ο βαθμός εξάλειψης των παρατηρούμενων διαφορών τυπικά μετράται σαν το ποσοστό της διασποράς της εξαρτημένης μεταβλητής, που ‘εξαλείφεται,’ όταν εισάγονται οι επεξηγηματικοί παράγοντες (οι ανεξάρτητες μεταβλητές).

Ο Salmon (1990) συνόψισε την ανάλυση των Hempel και Oppenheim από το 1948 ως το 1965 στον ακόλουθο πίνακα 11.1.

Νόμοι \ Εξηγητέα (Laws) \ (Explananda)	Επιμέρους Γεγονότα (Particular Facts)	Γενικές Κανονικότητες (General Regularities)
Καθολικοί Νόμοι (Universal Laws)	Παραγωγικο-νομολογικοί (Deductive-Nomological)	Παραγωγικο-νομολογικοί (Deductive-Nomological)
Στατιστικοί Νόμοι (Statistical Laws)	Επαγωγικο-στατιστικοί (Inductive-Statistical)	Παραγωγικο-στατιστικοί (Deductive-Statistical)

Πίνακας 11.1: Οι τύποι επιστημονικής εξήγησης επιμέρους γεγονότων και γενικών κανονικοτήτων σε συνάρτηση με το είδος των νόμων που χρησιμοποιούνται (Salmon, 1990).

Βεβαίως υπάρχουν επιχειρήματα που πληρούν όλες τις προϋποθέσεις που απαιτούν οι παραγωγικές-νομολογικές εξηγήσεις που αποτυγχάνουν ολοφάνερα ως καλόπιστες (*bona fide*) εξηγήσεις, άρα οι προδιαγραφές που τέθηκαν από τους Hempel και Oppenheim δεν είναι επαρκείς για να καθορίσουν τι συνιστά μια αποδεκτή επιστημονική εξήγηση και υπάρχουν ακόμη παραδείγματα που φέρονται ως καλόπιστες εξηγήσεις, αλλά αποτυγχάνουν να ικανοποιήσουν τις προδιαγραφές των Hempel και Oppenheim, κατά συνέπεια δεν είναι αναγκαίο να πληρούνται αυτές οι προδιαγραφές για να έχουμε αποδεκτές επιστημονικές εξηγήσεις.

Σύμφωνα με τον Hedström (2005) όμως, ούτε και το επαγωγικό-στατιστικό μοντέλο είναι χρήσιμο για την κοινωνιολογία ως επεξηγηματικό μοντέλο, διότι επιτρέπει και άρα νομιμοποιεί αφελείς θεωρίες κι εξηγήσεις, καθώς επίσης και δεν αναγνωρίζει τον προνομιούχο ρόλο που πρέπει να έχουν οι εξηγήσεις που είναι βασισμένες στη δράση και την αλληλεπίδραση. Η ιδέα μάλιστα ότι μπορούμε να κατανοήσουμε τις αιτίες των κοινωνικών φαινομένων παρατηρώντας τις σχέσεις μεταξύ μεταβλητών φαντάζει απλοϊκή. Ο ίδιος προτείνει αντί της προσπάθειας εδραίωσης ‘φαινομενολογικών νόμων’ στη βάση στατιστικών αναλύσεων, την ιδέα του Boudon (1976: 117) ότι πρέπει ‘να προχωρήσουμε πέρα από τις στατιστικές σχέσεις, για να διερευνήσουμε τους γενεσιουργούς μηχανισμούς, που τις προκαλούν’. Οι στατιστικές αναλύσεις είναι σημαντικές για τον έλεγχο των προτεινόμενων υποθέσεων, αλλά πρέπει να θυμόμαστε

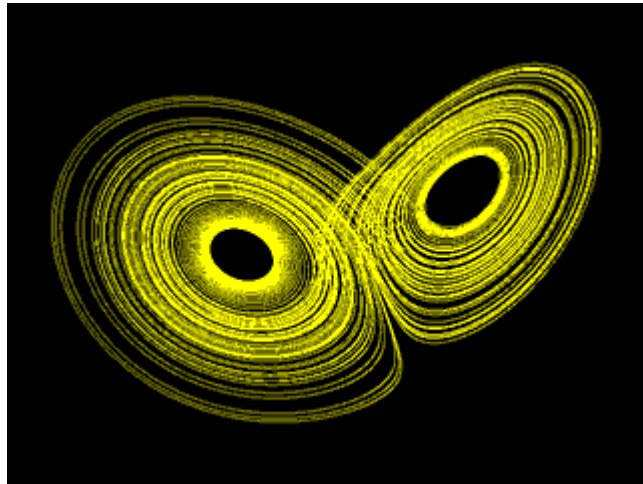
ότι οι στατιστικές αναλύσεις αποτελούν τους ελέγχους των εξηγήσεων κι όχι τις ίδιες τις εξηγήσεις. Συνήθως, αυτή η διάκριση ξεχνιέται σε ορισμένες προσεγγίσεις, που έχουν στατιστικούς προσανατολισμούς.

Ακόμη, αν εστιασθούμε σε μηχανισμούς, που παράγουν τη μεταβολή στις κοινωνικές οντότητες, αντί να ασχολούμαστε με τις στατιστικές κανονικότητες μεταξύ μεταβλητών, τότε θα μπορούσαμε να εδραιώναμε τα θεμέλια των ισχυρών εξηγήσεων (Hedström, 2005). Οι εξηγήσεις οι βασισμένες σε μηχανισμούς βρίσκονται στο επίκεντρο της αναλυτικής προσέγγισης της κοινωνιολογίας. Η κεντρική ιδέα πίσω από τη προσέγγιση των κοινωνικών μηχανισμών είναι ότι μπορούμε να εξηγήσουμε κάποια κοινωνικά φαινόμενα, όχι μόνο επικαλούμενοι κάποιους καθολικούς νόμους ή αναγνωρίζοντας κάποιους στατιστικά σημαντικούς παράγοντες, αλλά κατανοώντας τους μηχανισμούς, οι οποίοι δείχνουν πώς τα φαινόμενα αυτά προκαλούνται.

Η διαδικασία σχηματισμού μοντέλων στις κοινωνικές επιστήμες και η μελέτη των μηχανισμών που δημιουργούν και εξελίσσονται τα κοινωνικά φαινόμενα βασίζεται όλο και περισσότερο σε καλά δομημένες θεωρίες. Ταυτόχρονα όλο και μεγαλύτερες υπολογιστικές δυνατότητες είναι διαθέσιμες στους ερευνητές. Τα περισσότερα δραστοστρεφή μοντέλα δεν ερμηνεύουν ένα συγκεκριμένο κοινωνικό γεγονός αλλά στοχεύουν στην κατανόηση της δυναμικής των κοινωνικών διαδικασιών. Οι τεχνητές κοινωνίες μπορούν να προσφέρουν πολλαπλά οφέλη για την κοινωνιολογική θεωρία, καθώς αντιστοιχούν σε αξιωματικές, καλά αναπτυγμένες τυπικές (formal) κοινωνιολογικές θεωρίες (Sawyer, 2003). Ακόμη, επειδή είναι τυπικές θεωρίες που αναπαράγονται σε ένα πρόγραμμα ηλεκτρονικών υπολογιστών, επιτρέπουν στις επιπτώσεις των θεωριών να παραχθούν αυτόματα και συστηματικά, κατά συνέπεια τα δραστοστρεφή μοντέλα των κοινωνικών προσομοιώσεων μπορούν να ανταποκριθούν στην απαίτηση για συνέπεια και πληρότητα σε ένα βαθμό που οι παραδοσιακές κοινωνιολογικές θεωρίες δύσκολα μπορούν να επιτύχουν. Αναμφίβολα οι δραστοστρεφείς προσομοιώσεις που βασίζονται σε απλοποίηση των διαδικασιών είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την κατανόηση του πραγματικού κόσμου των μεγαλύτερων διαστάσεων (Hegselmann & Flache, 1998).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΧΑΟΣ: ΜΙΑ ΝΕΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗ



Τίποτε στη φύση δεν είναι τυχαίο. Ένα πράγμα μπορεί να φαίνεται τυχαίο μόνο εξαιτίας της ελλιπούς μας γνώσης.

Μπαρούχ. Σπινόζα

ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΧΑΟΣ:

ΜΙΑ ΝΕΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗ

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μια ιστορική εισαγωγή στην επιστήμη των δυναμικών συστημάτων και του χάους καθώς και μια σύντομη αναφορά σε κάποιους όρους της επιστήμης αυτής, με σκοπό να καταδειχθεί ότι έχει προχωρήσει σε πολλές κατευθύνσεις και προσφέρει πανίσχυρα ερευνητικά εργαλεία που μπορούν να βρουν εφαρμογή σε πολλούς και μάλιστα εντελώς διαφορετικούς ερευνητικούς τομείς. Δυστυχώς πολλά από τα πορίσματα των τελευταίων τριάντα ετών δεν έχουν ακόμα αξιοποιηθεί, στο βαθμό που θα ήταν επιθυμητό, ειδικά από τις κοινωνικές επιστήμες, λόγω του υψηλού επιπέδου των γνώσεων που απαιτείται να διαθέτει κανείς στους τομείς των μαθηματικών και της επιστήμης των υπολογιστών.

5.1. Η Ανάπτυξη του Διαφορικού Λογισμού και των Δυναμικών Συστημάτων

Για τους προϊστορικούς ανθρώπους τα φυσικά φαινόμενα και ο κόσμος όλος παρουσιάζονταν σαν χάος. Με την πάροδο του χρόνου και την ανάπτυξη των επιστημών άρχισε να μπαίνει μια τάξη στο χάος αυτό, καθώς όλο και περισσότερα φαινόμενα εξηγούνταν μιας και διατυπώνονταν νόμοι που τα ερμήνευαν. Παράλληλα με τις φυσικές επιστήμες αναπτύσσονταν και τα μαθηματικά και η κατανόηση ενός φυσικού φαινομένου συμπεριλάμβανε και μια κατάλληλη μαθηματική περιγραφή του. Μια από τις πρώτες και σημαντικότερες εφαρμογές των μαθηματικών ήταν πάνω σε ένα πρωταρχικό ερώτημα, που από καταβολής κόσμου έκανε τον άνθρωπο να προβληματισθεί σχετικά με τους νόμους και την προβλεψιμότητα της φύσης. Πρόκειται για την κίνηση των ουρανίων σωμάτων. Χρειάστηκαν πολλές χιλιετίες και ένας ολόκληρος θησαυρός παρατηρήσεων συσσωρευμένων από την αρχαιότητα, οι οποίες μεταδόθηκαν με θρησκευτική ευλάβεια από τη μια γενιά αστρονόμων στην άλλη, ώσπου να ανακαλυφθούν οι νόμοι της κίνησης των πλανητών από τον Γιόχαν Κέπλερ. Παράλληλα, την ίδια εποχή, πριν από τρακόσια περίπου χρόνια, πραγματοποιήθηκε ένα μνημειώδες επίτευγμα, η ανάπτυξη του διαφορικού λογισμού από τον Isaac Newton και (ανεξάρτητα) τον Wilhelm Leibniz.

Ο Νεύτωνας, το 1687, στο βιβλίο του με τίτλο «Φιλοσοφία των Φυσικών Επιστημών» (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*), με βάση το νόμο της

παγκόσμιας έλξης, την ύπαρξη δηλαδή της βαρυτικής δύναμης, η οποία είναι ανάλογη με τη μάζα των δύο σωμάτων και αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασής τους, *απέδειξε* τους τρεις νόμους του Κέπλερ για την κίνηση των πλανητών. Οι ελλειπτικές τροχιές των πλανητών, οι ταχύτητες διαδρομής τους και τα πλανητικά έτη εμφανίζονται στο εξής ως κοινότοπες συνέπειες του απλού αυτού νόμου. Οι κυκλικές, ελλειπτικές και παραβολικές τροχιές της αστρονομίας έπαψαν να είναι θεμελιώδεις κινήσεις, αλλά προέκυπταν ως λύσεις διαφορικών εξισώσεων. Έτσι, σύμφωνα με τη νευτώνεια φυσική, η γνώση της παρούσας κατάστασης του ηλιακού συστήματος μας επιτρέπει να προβλέψουμε τη μελλοντική του εξέλιξη.

Οι νόμοι του Νεύτωνα διατυπώνονται υπό τη μορφή συνήθων διαφορικών εξισώσεων και είναι νόμοι καθαρά αιτιοκρατικοί. Αυτό σημαίνει ότι σε μια συγκεκριμένη αιτία αντιστοιχεί ένα και μοναδικό αποτέλεσμα, το οποίο είναι πάντοτε το ίδιο, εφόσον ξεκινούμε με την ίδια αρχική κατάσταση (αιτία). Ειδικότερα, στην περίπτωση του Ηλιακού συστήματος, ως αιτία θεωρούμε μια αρχική κατάσταση του συστήματος (θέση και ταχύτητα των πλανητών) σε κάποια αρχική χρονική στιγμή και το αποτέλεσμα είναι η κατάσταση του συστήματος (δηλαδή θέση και ταχύτητα των πλανητών) μια καθορισμένη επόμενη χρονική στιγμή, όπως προκύπτει από τη λύση των σχετικών διαφορικών εξισώσεων. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να υπολογισθούν οι θέσεις των πλανητών στην τροχιά τους γύρω από τον Ήλιο για τα επόμενα χρόνια και έτσι να προβλέψουμε τα διάφορα αστρονομικά φαινόμενα που θα συμβούν στο μέλλον, όπως π.χ. μια έκλειψη Ηλίου ή Σελήνης, την εμφάνιση ενός κομήτη ή ακόμη και την τροχιά ενός αστεροειδή, ο οποίος ακολουθεί μια πορεία συγκρούσεως με τη Γη. Με τους ίδιους νόμους υπολογίζονται και οι τροχιές των διαστημοπλοίων, τα οποία εκτοξεύονται για την εξερεύνηση του διαστήματος. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις η τροχιά υπολογίζεται ακριβώς, με τη βοήθεια των αιτιοκρατικών νόμων του Νεύτωνα και εθεωρείτο αυτονόητο ότι αρκεί να αναπτύξουμε την κατάλληλη μαθηματική θεωρία και να χρησιμοποιήσουμε ισχυρούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές για τους αριθμητικούς υπολογισμούς, ώστε να προβλέψουμε, με όση ακρίβεια επιθυμούμε, την κίνηση ενός σώματος, είτε πρόκειται για τη Σελήνη, έναν πλανήτη, ή ένα διαστημόπλοιο, και μάλιστα για οσοδήποτε μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι επιστήμονες προσπάθησαν να αποδείξουν ότι αυτός ο μοναδικός νόμος ήταν αρκετός για να ερμηνευθούν όλες οι κινήσεις των άστρων και ότι η θεωρία του Νεύτωνα μας επιτρέπει να προβλέπουμε με ακρίβεια όλα τα ουράνια φαινόμενα.

Οι επιτυχίες των Μαθηματικών στην περιγραφή των φυσικών φαινομένων άρχισαν να διαδέχονται η μία την άλλη με εντυπωσιακούς ρυθμούς κατά τον 17ο, 18ο και 19ο αιώνα και η μέθοδος αυτή της μοντελοποίησης χρησιμοποιώντας τις διαφορικές εξισώσεις και τις εξισώσεις διαφορών χρησιμοποιήθηκε έκτοτε στις περισσότερες επιστήμες με εξαιρετικά αποτελέσματα.. Με βάση το παράδειγμα της Νευτώνειας φυσικής και χρησιμοποιώντας το πανίσχυρο εργαλείο των διαφορικών εξισώσεων κατέστη δυνατό να μοντελοποιηθούν φαινόμενα απ' όλο το φάσμα των επιστημών. Αυτό δημιούργησε την εικόνα, κυρίως κατά το δέκατο ένατο και τις αρχές του εικοστού αιώνα, ενός καθαρά μηχανιστικού κόσμου, όπου τα πάντα είναι προβλέψιμα, με επιπτώσεις ακόμα και στη φιλοσοφική αντίληψη του κόσμου. Δημιουργήθηκε *η εικόνα ενός σύμπαντος που λειτουργεί με απόλυτη τάξη, όπως ο μηχανισμός ενός ρολογιού ακριβείας*, όπου η παρούσα κατάσταση είναι απλώς μια συνέπεια της προγενέστερης κατάστασης και η αιτία της κατάστασης που θα ακολουθήσει (Κουλούρης, 2007).

5.2. Ντετερμινισμός και ο Δαίμονας του Λαπλάς

Η επιτυχία αυτών των υπολογισμών στην πρόβλεψη της θέσεως ενός σώματος για μεγάλα χρονικά διαστήματα απέτέλεσε τον θρίαμβο της αιτιοκρατίας. Εφόσον η εξέλιξη ενός φαινομένου που διέπεται από καθαρά αιτιοκρατικούς νόμους, όπως είναι οι νόμοι του Νεύτωνα, έχει κατανοηθεί πλήρως και μπορεί να προβλεφθεί, εισήχθη με τον τρόπο αυτό στην επιστήμη η έννοια του ντετερμινισμού και ταυτόχρονα επικράτησε η πεποίθηση ότι οι όροι ντετερμινισμός και προβλεψιμότητα είναι ισοδύναμοι.

Ντετερμινισμός είναι η θεωρία που ισχυρίζεται πως οτιδήποτε συμβαίνει στο σύμπαν καθορίζεται επακριβώς από πρότερες συνθήκες. Όταν επομένως παρατηρείται ένα φαινόμενο, υπάρχουν οπωσδήποτε οι αυστηρά καθορισμένες συνθήκες ύπαρξης που το προκαλούν και αντίστροφα, όταν οι συνθήκες αυτές υπάρχουν το αντίστοιχο φαινόμενο και μόνο αυτό θα προκύψει υποχρεωτικά. Με απλούστερα λόγια *τα ίδια αίτια προκαλούν τα ίδια αποτελέσματα*. Αν αυτή η θεωρία είναι σωστή, τότε οτιδήποτε συμβαίνει στο σύμπαν, είτε ανήκει στο παρελθόν είτε στο παρόν είτε στο μέλλον, είναι κατ' αρχήν παραγωγικά εξηγήσιμο. Η έννοια αυτή διαφέρει από το μοιραίο, την ειμαρμένη των Αρχαίων Ελλήνων, και από το φαταλισμό, γιατί ενώ για το φαταλισμό η ανάγκη είναι έξω από τα πράγματα, είναι υπερβατική και η φύση υπακούει σε μια δύναμη δυνατότερη από την ίδια, για το ντετερμινισμό είναι μέσα στα πράγματα,

σύμφωνα με μια αλύγιστη νομοτέλεια (Θεοδωρίδης, 1955). Σύμφωνα με τη φιλοσοφική αυτή τάση, η οποία επηρέασε ιδιαιτέρως την επιστημονική σκέψη από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα, είναι αποδεκτή η ύπαρξη μιας καθολικής αιτιώδους και νομοτελειακής συνάφειας όλων των φαινομένων. Κατά συνέπεια *δεν υπάρχουν ανεξήγητα ή τυχαία γεγονότα*.

Η κατ' εξοχήν διατύπωση του ντετερμινιστικού δόγματος που στηριζόταν στην μαθηματική ανάπτυξη του διαφορικού λογισμού και που αναφέρεται πιο συχνά είναι αυτή που προέρχεται από το έργο του Λαπλάς «Αναλυτική Θεωρία των Πιθανοτήτων», η οποία αποτέλεσε το σύμβολο μιας ολόκληρης εποχής και αποκαλείται *διάνοια* ή *δαίμονας του Λαπλάς* έχει ως εξής: Αν υπήρχε μια διάνοια που να διαθέτει τη γνώση του συνόλου των δυνάμεων που κυβερνούν τη φύση, καθώς και της αντίστοιχης κατάστασης των όντων που την απαρτίζουν, μια διάνοια τέτοιου μεγέθους που να είναι σε θέση να υποβάλλει όλα αυτά τα δεδομένα σε ανάλυση, τότε θα μπορούσε να συμπεριλάβει μέσα στον ίδιο μαθηματικό τύπο τόσο την κίνηση των μεγαλύτερων σωμάτων του σύμπαντος όσο και αυτή των μικρότατων ατόμων. Για μια τέτοια διάνοια τίποτα δεν θα ήταν αβέβαιο, το μέλλον αλλά και το παρελθόν, θα ξανοιγόταν ολοκάθαρα μπροστά στα μάτια της (Laplace, 1814/1951)

Ο δαίμονας του Λαπλάς αποτελεί μια από τις ζωηρότερες εικόνες που αναδύθηκε μέσα από το σύνολο της βιβλιογραφίας για τον ντετερμινισμό και προϋποθέτει ότι το παρελθόν, το παρόν και το μέλλον είναι συνδεδεμένα με σχέσεις αιτιότητας. Κατά συνέπεια, *το πρόβλημα της ακριβούς πρόγνωσης βρίσκεται στη δυσκολία της καταγραφής των σχετικών δεδομένων και της «προσωρινής» άγνοιας των νόμων που διέπουν τα φαινόμενα*. Το πρώτο ισχυρότατο πλήγμα, τουλάχιστον για τις φυσικές επιστήμες, δέχθηκε το ντετερμινιστικό αυτό δόγμα από την αρχή της απροσδιοριστίας του Werner Heisenberg.

5.3. Η Αρχή της Απροσδιοριστίας του Heisenberg

Το 1927 ο Werner Heisenberg διατύπωσε την περίφημη *αρχή της απροσδιοριστίας* (*indeterminacy principle*) ή *αρχή της αβεβαιότητας* (*uncertainty principle*). Σύμφωνα με την αρχή αυτή είναι αδύνατο να μετρήσουμε με απεριόριστη ακρίβεια, τη θέση και την ορμή ενός σωματιδίου ταυτόχρονα. Εάν μετράμε τη θέση ενός σωματίου με αβεβαιότητα Δx και ταυτόχρονα μετράμε την ορμή του με αβεβαιότητα Δp ,

τότε το γινόμενο των δύο μεγεθών δεν μπορεί να είναι μικρότερο από έναν αριθμό, δηλαδή:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2}$$

όπου h είναι η μειωμένη σταθερά του Planck (δηλαδή η σταθερά του Planck διαιρούμενη με το 2π). Η ελάχιστη αβεβαιότητα στη μέτρηση των Δx και Δp δεν είναι πειραματικό σφάλμα, δεν οφείλεται δηλαδή στις ατέλειες των πειραματικών συσκευών, αλλά προκύπτει από την δομή της ύλης και η σχέση αβεβαιότητας είναι άμεση συνέπεια του κυματοσωματιδιακού δυϊσμού της ύλης.

Πιο συγκεκριμένα, για να μπορέσουμε να προβλέψουμε τη μελλοντική θέση και ταχύτητα ενός σωματιδίου πρέπει να μπορούμε να μετρήσουμε επακριβώς την τωρινή του θέση και ταχύτητα. Για να το επιτύχουμε αυτό είναι απαραίτητο να φωτίσουμε το σωματίδιο. Κάποια από τα κύματα του φωτός θα ανακλαστούν πάνω του και θα υποδείξουν το σημείο όπου βρίσκεται. Δεν θα μπορούμε όμως να προσδιορίσουμε τη θέση του με μεγαλύτερη προσέγγιση από την απόσταση μεταξύ των κορυφών των κυμάτων του φωτός που χρησιμοποιούμε. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι, για να μετρήσουμε με πολύ μεγάλη ακρίβεια τη θέση ενός σωματιδίου, χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε φως με πολύ μικρό μήκος κύματος (δηλαδή με πολύ μικρή απόσταση μεταξύ των κορυφών των κυμάτων). Αλλά από την υπόθεση των κβάντων του Planck προκύπτει ότι δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οσοδήποτε μικρή ποσότητα φωτός. Θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τουλάχιστον ένα κβάντο. Αυτό το κβάντο θα προκαλέσει μια απρόβλεπτη διαταραχή στη θέση και την ταχύτητα του σωματιδίου. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη ακρίβεια μέτρησης της θέσης του σωματιδίου τόσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος του φωτός που χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε και τόσο μεγαλύτερη η ενέργεια του κβάντου. Κατά συνέπεια, η ταχύτητα του σωματιδίου θα υποστεί ακόμη μεγαλύτερη διαταραχή. Με άλλα λόγια, όσο πιο μεγάλη είναι η ακρίβεια με την οποία προσπαθούμε να μετρήσουμε τη θέση του σωματιδίου τόσο πιο μικρή είναι η ακρίβεια με την οποία μπορούμε να μετρήσουμε την ταχύτητά του και αντίστροφα.

Ο Χάιζενμπεργκ έδειξε ότι αν πολλαπλασιάσουμε την απροσδιοριστία στη θέση του σωματιδίου επί την απροσδιοριστία στην ταχύτητά του επί τη μάζα του, θα έχουμε έναν αριθμό που δεν μπορεί ποτέ να γίνει πιο μικρός από μια ορισμένη ποσότητα, τη λεγόμενη μειωμένη σταθερά του Planck. Αυτή η ποσότητα μάλιστα δεν εξαρτάται από

τον τρόπο με τον οποίο προσπαθούμε να μετρήσουμε τη θέση ή την ταχύτητα του σωματιδίου ή από το είδος του σωματιδίου και δεν οφείλεται σε ατέλεια των επιστημονικών μας οργάνων. Η αρχή της απροσδιοριστίας του Χάιζενμπεργκ είναι θεμελιώδης, αναπόδραστη, χαρακτηριστική ιδιότητα του κόσμου (Hawking, 1996).

Παρόλα αυτά, η συνηθισμένη εμπειρία δεν παρέχει καμιά ένδειξη για την αλήθεια της αρχής αυτής. Φαίνεται να είναι εύκολο να υπολογίσει κανείς με ακρίβεια την ταχύτητα και τη θέση ενός αυτοκινήτου την ίδια χρονική στιγμή. Αυτό όμως συμβαίνει διότι για τα αντικείμενα αυτού του μεγέθους οι αβεβαιότητες που ορίζει η αρχή της απροσδιοριστίας είναι πολύ μικρές για να παρατηρηθούν έξω από ένα πειραματικό εργαστήριο φυσικής.

Το πλήγμα που δέχθηκε ο κλασσικός ντετερμινισμός από την αρχή της απροσδιοριστίας ήταν πολύ μεγάλο, παρόλα αυτά δε σήμανε και το τέλος του ντετερμινισμού. Στην πραγματικότητα κανείς επιστήμονας δεν είχε πιστέψει ως απόλυτα εφικτό το ντετερμινιστικό δόγμα του Λαπλάς (Peitgen et al, 1992). Ακόμα και το πιο προσεκτικά μελετημένο πείραμα ποτέ δεν είναι εντελώς απομονωμένο από τις επιδράσεις του περιβάλλοντος και η κατάσταση οποιουδήποτε συστήματος δεν είναι ποτέ απόλυτα γνωστή μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Αυτό που πραγματικά πίστευαν οι επιστήμονες είναι ότι *από σχεδόν τις ίδιες αιτίες ακολουθούν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα*, τόσο στη φύση όσο και σε οποιοδήποτε πείραμα (Gleick, 1987/1990). Αν δηλαδή γνωρίζουμε προσεγγιστικά τις αρχικές συνθήκες ενός συστήματος και κατανοούμε τους φυσικούς νόμους, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε προσεγγιστικά τη συμπεριφορά του συστήματος. **Η υπόθεση αυτή βρίσκεται στην καρδιά της φιλοσοφίας της επιστήμης.** Αν τα πράγματα δεν είχαν έτσι, τότε κανείς δε θα μπορούσε να βεβαιώσει την ισχύ οποιουδήποτε φυσικού νόμου. Δε χρειάζεται να λάβει υπόψη του κανείς την πτώση ενός χαλικιού σε κάποιον πλανήτη ενός άλλου γαλαξία, όταν προσπαθεί να μελετήσει την κίνηση της μπάλας του μπιλιάρδου σε ένα τραπέζι πάνω στη Γη. Οι πολύ μικρές επιδράσεις μπορούν να παραλειφθούν. Ένα ελάχιστο σφάλμα στον προσδιορισμό της θέσης του κομήτη του Χάλλεϋ το 1910 θα μπορούσε να προκαλέσει ένα μικρό μόνο λάθος στην πρόβλεψη της άφιξής του το 1986 και το σφάλμα αυτό θα παρέμενε μικρό για εκατομμύρια χρόνια. Υπάρχει μια σύγκλιση στον τρόπο που δουλεύουν τα πράγματα και *οι τυχαίες μικρές επιδράσεις δεν ενισχύονται ώστε να δίνουν μεγάλα τυχαία αποτελέσματα.* Δυστυχώς όμως, ούτε αυτή η τόσο εύλογη επιστημονική απαίτηση αποδείχθηκε εφικτή αλλά κλονίστηκε εκ νέου τη δεκαετία του 1970, από την ανακάλυψη του αιτιοκρατικού χάους (αν και η σύλληψή της έννοιας αυτής

είχε διατυπωθεί και προγενέστερα) στη μοντελοποίηση των δυναμικών συστημάτων με διαφορικές εξισώσεις και εξισώσεις διαφορών.

5.4. Δυναμικά Συστήματα

Η έννοια ενός δυναμικού συστήματος οφείλει την προέλευσή της στη Νευτώνεια μηχανική αλλά ως σήμερα δεν υπάρχει άλλος κλάδος των μαθηματικών με τόσες πολλές εφαρμογές, όσο αυτός των δυναμικών συστημάτων.

Τα *δυναμικά συστήματα* (*dynamical systems*) είναι τα φυσικά φαινόμενα ή οι διεργασίες εκείνες που περιγράφονται από *συστήματα διαφορικών εξισώσεων* (*systems of differential equations*) ή *εξισώσεων διαφορών* (*systems of difference equations*), των οποίων η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι ο χρόνος. (Μπούντης, 1995). Μια *διαφορική εξίσωση* (*differential equation*) είναι μια μαθηματική εξίσωση που εμπεριέχει μια άγνωστη συνάρτηση μιας ή περισσότερων μεταβλητών. Η διαφορική εξίσωση συσχετίζει τις τιμές της ίδιας της συνάρτησης και της παραγώγου της και ο χρόνος λαμβάνει συνεχείς τιμές. Μια *εξίσωση διαφορών* (*difference equation*) είναι μια μαθηματική εξίσωση που εμπεριέχει μια άγνωστη συνάρτηση μιας ή περισσότερων μεταβλητών, η οποία όμως συσχετίζει τις τιμές της συνάρτησης του επόμενου χρονικού βήματος με αυτές του προηγούμενου χρονικού βήματος. Σε μια εξίσωση διαφορών ο χρόνος παίρνει διακριτές τιμές. Οι διαφορικές εξισώσεις δηλαδή εκφράζουν το ρυθμό που μεταβάλλονται (αυξάνονται ή μειώνονται) οι τιμές των μεταβλητών σε σχέση με τις ίδιες τις τιμές και ο χρόνος θεωρείται συνεχής, ενώ οι εξισώσεις διαφορών εκφράζουν την τρέχουσα κατάσταση ενός δυναμικού συστήματος σε συνάρτηση με την προηγούμενη (η σε συνάρτηση με κ προηγούμενες), σε διακριτό χρόνο. Ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων έχει τη μορφή

$$dx/dt=f(x,t) \quad (1)$$

όπου το $\mathbf{x}$ είναι ένα διάνυσμα, δηλαδή $\mathbf{x}=\mathbf{x}(t)=(x_1(t),x_2(t),\dots,x_N(t))$. Παρόμοια μορφή έχει και ένα σύστημα εξισώσεων διαφορών:

$$\mathbf{x}_{n+1}=\mathbf{g}(\mathbf{x}_n) \quad (2)$$

όπου και πάλι το $\mathbf{x}_n$ είναι ένα διάνυσμα, δηλαδή $\mathbf{x}_n=\mathbf{x}(t_n)=(x_{1,n},x_{2,n},\dots,x_{N,n})$. Τα $\mathbf{x}$ και $\mathbf{x}_n$

είναι διανύσματα στον Ευκλείδειο χώρο των N διαστάσεων R^N . Ο R^N , στον οποίο εξελίσσονται τα διανύσματα x και x_n ονομάζεται *χώρος φάσεων (phase space)* του συστήματος. Ο κανόνας εξέλιξης των δυναμικών συστημάτων δίνεται από τις σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών, οι οποίες με τον τρόπο αυτό καθορίζουν την κατάσταση του συστήματος για ένα σύντομο χρονικό διάστημα στο μέλλον. Οι σχέσεις αυτές εκφράζονται από τις διανυσματικές συναρτήσεις f και g , οι οποίες και αποτελούν τη μαθηματικοποίηση του φαινομένου και φυσικά διαφέρουν ανάλογα με τους φυσικούς νόμους που διέπουν το συγκεκριμένο φαινόμενο. Οι λύσεις των εξισώσεων των δυναμικών συστημάτων, ως συναρτήσεις του χρόνου είναι ο πρωταρχικός στόχος, μιας και αυτές περιγράφουν την ιστορία των συστημάτων αυτών, για $t < 0$ και τη μελλοντική τους εξέλιξη, για $t > 0$.

Οι διαφορικές εξισώσεις χρησιμοποιούνται ευρέως σε όλες τις επιστήμες και παρέχουν την απλούστερη μορφή μοντελοποίησης για οποιοδήποτε φαινόμενο στο οποίο μία ή περισσότερες μεταβλητές εξαρτώνται από το χρόνο. Η θεωρία των δυναμικών συστημάτων μελετά τις διαφορικές εξισώσεις από διάφορες σκοπιές. Αυτό που ενδιαφέρει κυρίως είναι η εύρεση λύσης, η συνάρτηση δηλαδή που επαληθεύει τις διαφορικές εξισώσεις και επιτρέπει να κατανοηθεί και να προβλεφθεί πλήρως η εξέλιξη του φαινομένου. Δυστυχώς όμως, μόνο οι απλούστερες διαφορικές εξισώσεις επιδέχονται λύσεις που μπορούν να διατυπωθούν με ρητό τρόπο. Στις περιπτώσεις που αυτό δεν είναι δυνατό, μπορούν να βρεθούν πολλές ιδιότητες των λύσεων μιας δεδομένης διαφορικής εξίσωσης, δίχως να βρεθεί και να καθοριστεί η ακριβής μορφή τους. Εάν ένας ανεξάρτητος τύπος για τη λύση των διαφορικών εξισώσεων δεν είναι διαθέσιμος, η λύση μπορεί να προσεγγιστεί αριθμητικά χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Η θεωρία των δυναμικών συστημάτων δίνει έμφαση στην ποιοτική ανάλυση των συστημάτων που περιγράφονται από τις διαφορικές εξισώσεις, ενώ πολλές αριθμητικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για να καθορίσουν τις λύσεις με έναν δεδομένο βαθμό ακρίβειας.

Για τα συστήματα γραμμικών διαφορικών εξισώσεων έχει αναπτυχθεί ολόκληρη θεωρία και επιτεύχθηκε η πλήρης επίλυσή τους. Τα συστήματα γραμμικών διαφορικών εξισώσεων είναι εκείνα που στο δεύτερο μέλος των εξισώσεων (1) και (2) δεν υπάρχει πολλαπλασιασμός των τιμών δύο μεταβλητών. Δυστυχώς, ακόμη και σήμερα δεν υπάρχει καμιά γενική θεωρία, αντίστοιχη με εκείνη των γραμμικών, που να μας επιτρέπει να λύνουμε αναλυτικά συστήματα μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων. Η διερεύνηση της συμπεριφοράς των μη γραμμικών συστημάτων έχει τοπικό χαρακτήρα,

επειδή τις περισσότερες φορές η εύρεση γενικής λύσης του συστήματος είναι αδύνατη. Το ενδιαφέρον μιας τέτοιας διερεύνησης, εστιάζεται στη μελέτη των σημείων ισορροπίας, στην περιοχή των οποίων διενεργείται γραμμικοποίηση του συστήματος.

Μολονότι και τα μη γραμμικά συστήματα διαφορικών εξισώσεων έχουν λύση, έχει αποδειχθεί δηλαδή ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων υπάρχει λύση και είναι μοναδική, αν ικανοποιείται μια κατάλληλη συνθήκη κάθε φορά για τη συνάρτηση f και με δεδομένη μια αρχική τιμή για τη μεταβλητή x , δεν υπάρχει τρόπος η λύση αυτή να βρεθεί και να γραφεί αναλυτικά με το συνήθη μαθηματικό συμβολισμό. Έχει όμως αναπτυχθεί μέθοδος με την οποία μπορεί να βρεθεί η λύση του συστήματος. Για τον καθορισμό της κατάστασης του συστήματος στο απώτερο μέλλον απαιτείται η διαδοχική επανάληψη του υπολογισμού που προκύπτει από τις σχέσεις του συστήματος πολλές φορές, όπου κάθε φορά δίνεται ένας χρόνος προώθησης, ένα μικρό βήμα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *αριθμητική επίλυση του συστήματος (numerical solution)* και απαιτεί πάρα πολλούς υπολογισμούς, με τη χρήση όμως των ηλεκτρονικών υπολογιστών απέδωσε εξαιρετικά αποτελέσματα. Λαμβάνοντας υπόψη ένα αρχικό σημείο είναι δυνατό με τη μέθοδο αυτή να καθοριστούν όλα τα μελλοντικά σημεία του, δηλαδή η *τροχιά (orbit)* του σημείου. Το πιο σημαντικό ίσως ερώτημα στα δυναμικά συστήματα είναι ποια είναι η συμπεριφορά των λύσεών τους καθώς ο χρόνος t τείνει στο άπειρο ($t \rightarrow \infty$), πού καταλήγουν δηλαδή οι τροχιές, από οποιοδήποτε σημείο αφετηρίας. Ανάλογα με την αρχική συνθήκη, οι τροχιές έλκονται από ένα σημείο ή σύνολο σημείων ή διαφεύγουν στο άπειρο. Το σύνολο των σημείων που έλκει έναν αριθμό τροχιών ονομάζεται *ελκυστής*.

Ο *ελκυστής (attractor)* ορίζεται με αυστηρά μαθηματικό τρόπο ως ένα υποσύνολο του χώρου των φάσεων με τις εξής ιδιότητες: α) οποιαδήποτε τροχιά εισέλθει σε αυτό δεν ξεφεύγει, β) υπάρχει ένα ευρύτερο σύνολο από τον ελκυστή, που ονομάζεται *ελκόμενο σύνολο (basin of attraction)*, όπου οποιαδήποτε τροχιά έχει αφετηρία το σύνολο αυτό τελικά εισέρχεται στον ελκυστή και γ) δεν υπάρχει ευρύτερο υποσύνολο του χώρου των φάσεων με τις προηγούμενες δύο ιδιότητες. Ο ελκυστής μπορεί να είναι μόνο ένα σημείο ή και περισσότερα, που στην περίπτωση αυτή ονομάζονται σημεία ισορροπίας. Τα σημεία ισορροπίας ταξινομούνται με κριτήριο τη συμπεριφορά της τροχιάς τυχαίας λύσης του συστήματος, όταν αυτή τα προσεγγίζει. Τα σημεία ισορροπίας διακρίνονται σε: α) *σημεία συσσώρευσης (attraction points)*, στα οποία συγκλίνουν οι τροχιές που εκκινούν από ένα συγκεκριμένο σύνολο αρχικών συνθηκών, το ελκόμενο σύνολο. Μια απλή, φυσική αναπαράσταση ενός τέτοιου σημείου δίνεται από το κατώτερο σημείο μιας

κοίλης επιφάνειας. β) *Σημεία απώθησης (repulsion points)*, που απωθούν τις τροχιές, οι οποίες εκκινούν από ένα σύνολο αρχικών συνθηκών που αποκαλείται *απωθούμενο σύνολο (basin of repulsion)*. Μια φυσική αναπαράσταση ενός τέτοιου σημείου δίνεται από την κορυφή ενός λόφου και γ) *σαγματικά σημεία (saddle points)* όπου η συμπεριφορά του συστήματος εξαρτάται από τη διεύθυνση προσέγγισης της τροχιάς, η οποία είναι συνάρτηση των αρχικών συνθηκών και είτε συγκλίνει προς το σημείο είτε απωθείται από αυτό. Μια απλή αναπαράσταση της περιοχής γύρω από ένα σαγματικό σημείο είναι το σαμάρι (σάγμα), του οποίου η επιφάνεια είναι ταυτόχρονα κοιλάδα και κορυφογραμμή.

Άλλο είδος ελκυστή που εμφανίζεται στα μη γραμμικά συστήματα διαφορικών εξισώσεων είναι ο οριακός κύκλος. Ο *οριακός κύκλος (limit cycle)* είναι μια κλειστή τροχιά στο χώρο των φάσεων με την ιδιότητα να έλκει ή να απωθεί τουλάχιστον μια τροχιά ακόμη. Σε περίπτωση που έλκει όλες τις γειτονικές τροχιές ονομάζεται *ευσταθής οριακός κύκλος (stable or attractive limit-cycle)*, ενώ αν τις απωθεί ονομάζεται *ασταθής οριακός κύκλος (unstable ή non-attractive limit-cycle)*. Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις δεν είναι ούτε ευσταθής ούτε ασταθής. Οι ευσταθείς οριακοί κύκλοι αποτελούν και ταλαντώσεις για το σύστημα, μιας και οποιαδήποτε μετακίνηση από την τροχιά της ταλάντωσης εξαναγκάζεται από το σύστημα να επανέλθει σε αυτή και άρα όλες οι τροχιές με αφετηρία που ανήκει στο ελκόμενο σύνολο καταλήγουν να ταλαντώνονται πάνω στον οριακό κύκλο.

Για τα σύστημα των διαφορικών εξισώσεων που έχουν περισσότερες από δύο διαστάσεις υπάρχει και ένα άλλο είδος ελκυστή, οι *ευσταθείς περιοδικές τροχιές (stable periodic orbits)* ή *ν-διάστατοι τόροι (n-torus)*. Σε κάθε ελκυστή αυτού του τύπου συνυπάρχουν περισσότερες από μια συχνότητες, ο λόγος των οποίων είναι άρρητος αριθμός (incommensurate frequencies). Στην περίπτωση αυτή η τροχιάς δε θα είναι πλέον κλειστής, ο οριακός κύκλος μετατρέπεται σε *οριακό τόρο (limit torus)* και ο ελκυστής τέμνει κάθε επίπεδο του συστήματος σε ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων.

Όσον αφορά στα συστήματα εξισώσεων διαφορών, είναι πολύ πιο εύκολο να επιλυθούν αριθμητικά, με χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, από τα συστήματα των διαφορικών εξισώσεων, αλλά η μαθηματική τους ανάλυση παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες, λόγω της ανεξάρτητης μεταβλητής που παίρνει μόνο ακέραιες τιμές. Η διακριτότητα δηλαδή του χρόνου υποδηλώνει την ύπαρξη μιας εξωτερικής διαταραχής, που δρα στιγμιαία κάθε φορά στο σύστημα και το επηρεάζει με τρόπο που είναι πολύ δύσκολο να μελετηθεί με τις γνωστές αναλυτικές μεθόδους των μαθηματικών. Η

ταξινόμηση των σημείων ισορροπίας και των τύπων των ελκυστών, για τα συστήματα των εξισώσεων διαφορών, δε διαφέρει ουσιαστικά από την αντίστοιχη των συστημάτων διαφορικών εξισώσεων και δε θα αναφερθούμε εκ νέου σ' αυτή.

Μέχρι τη δεκαετία του 1960, οι ελκυστές θεωρούνταν ότι ήταν υποσύνολα του χώρου των φάσεων που είχαν τη μορφή απλών γεωμετρικών σχημάτων, όπως σημεία, γραμμές, επιφάνειες ή σχήματα στον τρισδιάστατο χώρο. Όλα τα είδη των ελκυστών που προαναφέραμε, δηλαδή τα σημεία ισορροπίας, οι οριακοί κύκλοι και οι ευσταθείς περιοδικές τροχιές αποτελούν τους κανονικούς ελκυστές των δυναμικών συστημάτων και αντιδιαστέλλονται με τους χαοτικούς ή παράξενους ελκυστές, στους οποίους θα γίνει αναφορά στη συνέχεια.

Φαινόμενα που εξελίσσονται αιτιοκρατικά στο χρόνο και μοντελοποιούνται από συστήματα των διαφορικών εξισώσεων ή εξισώσεων διαφορών ανήκουν σε όλους τους τομείς του επιστητού, όπως καιρικά φαινόμενα, οι κινήσεις των πλανητών, η εξέλιξη του πληθυσμού, η καρδιακή λειτουργία, η αλληλεπίδραση χημικών ουσιών και πολλά άλλα. Οι διαφορικές εξισώσεις διαδραματίζουν εξέχοντα ρόλο στη φυσική, τη χημεία, τη βιολογία, τα οικονομικά και σε πολλούς άλλους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας. Εμφανίζονται όποτε υπάρχει μια αιτιοκρατική σχέση που συσχετίζει μερικές συνεχώς μεταβαλλόμενες ποσότητες, που αναπαριστώνται από συναρτήσεις, και το ρυθμό μεταβολής τους, που εκφράζεται από την παράγωγο των συναρτήσεων αυτών.

Μέσα στον ενθουσιασμό και την ευφορία που προκάλεσαν οι εντυπωσιακές ανακαλύψεις και εφαρμογές των πανίσχυρων αυτών μαθηματικών εργαλείων, μια μικρή ανησυχητική λεπτομέρεια φαίνεται ότι πέρασε στο περιθώριο: οι περισσότερες διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν ρεαλιστικά τα ως άνω φυσικά φαινόμενα είναι *μη γραμμικές* και επομένως πολύ δύσκολο, έως αδύνατο, να επιλυθούν αναλυτικά, εκτός από ελάχιστες εξαιρετικές περιπτώσεις. Για το λόγο αυτό, οι επιστήμονες αναγκάζονταν να καταφύγουν σε γραμμικοποιήσεις και σημαντικές απλουστεύσεις των προβλημάτων, οι οποίες μπορούσαν να δώσουν ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Η αναγκαιότητα της αντιμετώπισης *μη επιλύσιμων εξισώσεων* δεν είχε προκύψει ακόμα. Δεν πρέπει να μας εκπλήσσει το γεγονός ότι οι μαθηματικοί και οι υπόλοιποι επιστήμονες δεν κατόρθωσαν, για τρεις αιώνες σχεδόν, να κάνουν σημαντική πρόοδο στην αντιμετώπιση των δύσκολων αυτών προβλημάτων. Η αδυναμία τους να τα μελετήσουν αναλυτικά τους ανάγκασε να ασχολούνται κυρίως με γραμμικά φαινόμενα που τα μαθηματικά ήταν σε θέση να επιλύσουν. Όμως, *η δυνατότητα επίλυσης, με τη χρήση γνωστών μαθηματικών συναρτήσεων, αποκάλυπτε μόνο κανονική και ομαλή συμπεριφορά και η πίστη του*

ανθρώπου στην αιτιοκρατία και την προβλεψιμότητα εδραιωνόταν όλο και περισσότερο (Μπούντης, 1995).

Αυτή η μέθοδος περιγραφής της συμπεριφοράς φυσικών μεγεθών με διαφορικές εξισώσεις είχε έναν περιορισμό. Για τις εξισώσεις αυτές υπάρχει λύση (η ύπαρξη λύσης για τις περισσότερες περιπτώσεις είχε αποδειχθεί αρκετά νωρίς), μα συχνά ήταν δύσκολο ή και αδύνατο να βρεθεί και να γραφεί η λύση αυτή, καθώς και να προσδιοριστεί η συμπεριφορά των φυσικών μεγεθών. Όσες φορές βρισκόταν η λύση, αυτή περιέγραφε συνηθισμένες κινήσεις ή μεταβολές. Αν οι λύσεις έμεναν σε μια φραγμένη περιοχή του χώρου, οι κινήσεις κατέληγαν είτε σε μια σταθερή κατάσταση, συνήθως έπειτα από απώλεια ενέργειας εξαιτίας της τριβής, είτε σε μια ταλάντωση, περιοδική ή ημιπεριοδική (quasiperiodic). Μόλις το 1975, έπειτα από τρεις αιώνες μελέτης, οι επιστήμονες έμαθαν ότι υπάρχει μια τρίτου τύπου κίνηση, που τώρα ονομάζουμε χάος (ή χαοτική κίνηση), η οποία προκύπτει και αυτή σαν λύση διαφορικών εξισώσεων αλλά δεν είχε παρατηρηθεί προηγουμένως. Η κίνηση αυτή παραμένει σε έναν περιορισμένο χώρο, ο οποίος λίγο αργότερα ονομάστηκε παράξενος ελκυστής (strange attractor) και είναι μορφοκλασματικό σύνολο (fractal), είναι ντετερμινιστική, μιας και προκύπτει από διαφορικές εξισώσεις, και μη προβλέψιμη, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια. Δεν οφείλεται απαραίτητα στην κίνηση μεγάλου αριθμού αλληλοεπιδρώντων σωμάτων αλλά είναι πιθανόν να προκύψει από πολύ απλές εξισώσεις ή συστήματα.

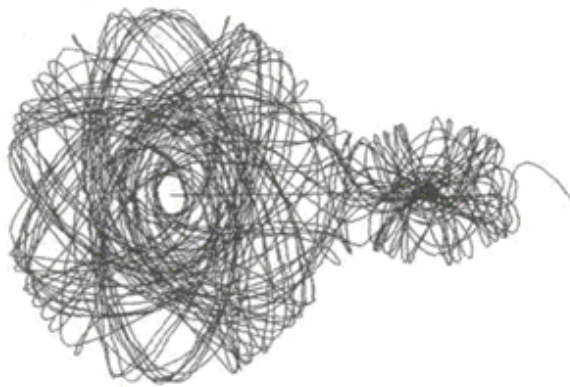
Νέα όμως μαθηματικά θεωρήματα και κυρίως η εξέλιξη και διάδοση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, έκαναν τους επιστήμονες να στραφούν και πάλι προς τα σημαντικά αυτά ζητήματα και να τα εξετάσουν εκ νέου. Έτσι οι ανακαλύψεις που ήρθαν στο φως τα τελευταία χρόνια μας φέρνουν στο κατώφλι μιας νέας επιστήμης, η οποία έχει ως κύριο αντικείμενό της την ενιαία αντιμετώπιση μη γραμμικών φαινομένων, που εμφανίζονται σε πολλούς κλάδους των θετικών και κοινωνικών επιστημών (Gleick, 1987)

5.5. Η Πρώτη Ένδειξη για της Ύπαρξη Χάους από τον Henri Poincare

Μέχρι τα τέλη του 19ου αιώνα η εύρεση της τροχιάς κάθε ουράνιου σώματος γινόταν προσεγγιστικά, με τη βοήθεια των νόμων του Νεύτωνα και του Κέπλερ, αφού δεν υπήρχαν ηλεκτρονικοί υπολογιστές για μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι κινήσεις των πλανητών και των άλλων ουρανίων σωμάτων θεωρούνταν περιοδικές και κανονικές, όπως η κίνηση ενός τέλει εκκρεμούς. Στα τέλη όμως του 19ου αιώνα, ο Γάλλος μαθηματικός και αστρονόμος Henri Poincare (1854-1912), έκανε μια ανακάλυψη που έμελλε να αλλάξει τα θεμέλια της Νευτώνειας μηχανικής, και να συντελέσει στη γέννηση ενός νέου επιστημονικού κλάδου, της επιστήμης των δυναμικών συστημάτων και του χάους. Σε αυτόν αποδίδεται η αρχική σύλληψη της έννοιας του *αιτιοκρατικού χάους* (*deterministic chaos*) όπως το εννοούμε σήμερα και θα αναλυθεί στη συνέχεια της διατριβής, μολονότι η έννοια αυτή δεν έγινε πλήρως κατανοητή παρά περίπου ένα αιώνα αργότερα.

Η ανακάλυψη αυτή έγινε με αφορμή ένα διαγωνισμό, που προκήρυξε το 1889 ο βασιλιάς της Σουηδίας και της Νορβηγίας Όσκαρ ο Δεύτερος, για την καλύτερη εργασία που αφορούσε στη σταθερότητα του ηλιακού μας συστήματος και το πρόβλημα των τριών σωμάτων. Νικητής αναδείχθηκε ο Henri Poincare, καθηγητής στο Πανεπιστήμιο του Παρισιού, υποβάλλοντας μια εργασία γεμάτη πρωτοποριακές ιδέες. Ο Poincare εργάστηκε στα πλαίσια του μαθηματικού φορμαλισμού των συστημάτων των διαφορικών εξισώσεων, που είχε επικρατήσει από την εποχή του Νεύτωνα με τόσο σημαντικά αποτελέσματα.

Για να αντιμετωπίσει τη μεγάλη δυσκολία του προβλήματος υπέθεσε ότι υπάρχουν μόνο 3 σώματα, τα οποία κινούνται στο ίδιο επίπεδο (και όχι στον τρισδιάστατο χώρο). Τα δύο έχουν μεγάλη μάζα και το τρίτο έχει απειροελάχιστα μικρή μάζα, αμελητέα σε σχέση με τα άλλα δύο, όπως για παράδειγμα δύο αστέρια και ένας αστεροειδής. Ο Poincare υπέθεσε ακόμη ότι οι αρχικές συνθήκες, οι θέσεις δηλαδή και οι ταχύτητες των δύο άστρων ήταν τέτοιες, ώστε αυτά να κινούνται με σταθερή ταχύτητα σε ελλείψεις γύρω από το κέντρο της μάζας τους. Η εικόνα του συστήματος των τριών σωμάτων παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1.



Εικόνα 5.1: Η τροχιά του αστεροειδούς με τα δύο άστρα ακίνητα (Alligood et al, 2000/1996).

Στην εικόνα αυτή υποθέτουμε ότι κοιτάμε τα δύο άστρα από ψηλά, πάνω από το επίπεδο που κινούνται, περιστρεφόμενοι και εμείς μαζί τους έτσι ώστε να εμφανίζονται σταθερά. Στο αριστερό άκρο της ευθείας γραμμής βρίσκεται το σώμα με τη μεγαλύτερη μάζα και στο δεξί άκρο το δεύτερο μεγάλο σώμα, με μάζα όμως μικρότερη από την πρώτη. Στη συγκεκριμένη τροχιά, το μικροσκοπικό σώμα κινείται ακανόνιστα, ανάμεσα στα δύο μεγαλύτερα σώματα, για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, αποκτά μεγάλη ταχύτητα και τελικά ξεφεύγει προς τα δεξιά, δίχως επιστροφή. Αν χρησιμοποιήσουμε μια διαφορετική αρχική θέση του αστεροειδούς, αυτός παραμένει, για πάντα, άλλες φορές κοντά στο μεγάλο άστρο και άλλες κοντά στο μεσαίο. Μια απειροελάχιστη αλλαγή στην αρχική θέση ή ταχύτητα του αστεροειδούς μας δίνει σαν αποτέλεσμα μια εντελώς διαφορετική τροχιά. Ως συνέπεια είναι αδύνατο να προβλεφθεί η τροχιά του αστεροειδούς, παρότι το φαινόμενο είναι πλήρως ντετερμινιστικό και οι νόμοι που το διέπουν έχουν πλήρως διατυπωθεί και μάλιστα με μαθηματικό τρόπο. Ο Poincare, στη μαθηματική ανάλυση που έκανε, απέδειξε ότι δεν μπορεί να προβλεφθεί η τροχιά οποιουδήποτε ουράνιου σώματος που δέχεται την επίδραση δύο ή περισσότερων άλλων σωμάτων (Peterson, 1993), μολονότι αυτή είναι ντετερμινιστικά προκαθορισμένη και περιγράφεται πλήρως από μαθηματικές εξισώσεις. Το πρόβλημα των τριών σωμάτων, η πρόβλεψη της τροχιάς τους δηλαδή, ήταν και παραμένει άλυτο. Ο Poincare αποκάλυψε το χάος στο Ηλιακό σύστημα και μαζί ανακάλυψε τη θεμελιωδώς μη

προβλέψιμη εξέλιξη που μπορεί να προκύψει από ένα μη γραμμικό σύστημα¹³. Είχε κατανοήσει πως πολύ μικρές επιδράσεις μπορούν να μεγεθυνθούν μέσω της ανάδρασης. Γι' αυτό και διατύπωσε την άποψη ότι μια ελάχιστη αιτία που διαφεύγει της προσοχής μπορεί να προκαλέσει ένα σημαντικό αποτέλεσμα. Το σύστημα αυτό, κατά συνέπεια, διαθέτει την ιδιότητα που πολύ αργότερα ονομάστηκε ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες, ιδιότητα που πρώτος ο Poincare συνέλαβε και μάλιστα χωρίς τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, οι οποίοι δεν είχαν ανακαλυφθεί την εποχή εκείνη. Χρειάστηκε όμως να περάσουν περίπου 80 χρόνια για να γίνει κατανοητή πλήρως από την επιστημονική κοινότητα η σπουδαιότητα αυτής της ανακάλυψης. Η καθυστέρηση στην κατανόηση και αξιοποίηση από την επιστημονική κοινότητα της ανακάλυψης, ευτυχώς μόνο για μια δεκαετία αυτή τη φορά, επαναλήφθηκε και στον επόμενο μεγάλο σταθμό της ανάπτυξης της επιστήμης του χάους, την ανακάλυψη του πρώτου χαοτικού ελκυστή και της χαοτικής κίνησης από το μετεωρολόγο Edward Lorenz, τη δεκαετία του 1960 στο MIT.

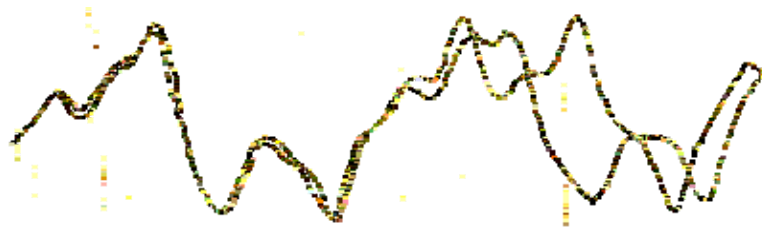
5.6. Η Ανακάλυψη Αιτιοκρατικού Χάους από τον Edward Lorenz

Πρώτος ανακάλυψε την αδυναμία για μακροπρόθεσμη πρόβλεψη στα ντετερμινιστικά συστήματα διαφορικών εξισώσεων που μοντελοποιούσαν την εξέλιξη του καιρού, ο μετεωρολόγος Edward Lorenz. Το 1963, δημοσιεύτηκε ένα άρθρο του με τίτλο «Ντετερμινιστική, μη Περιοδική Ροή» (Deterministic, non Periodic Flow), σε ένα όχι τόσο σημαντικό μετεωρολογικό περιοδικό, το Journal of Atmospheric Sciences. Το περιοδικό αυτό δε διαβαζόταν από μαθηματικούς ή φυσικούς και έτσι η έρευνα στην επιστήμη του χάους καθυστέρησε περισσότερο από μια δεκαετία, ώσπου να γίνουν κατανοητές πλήρως οι συνέπειες της ανακάλυψης του άρθρου αυτού (Peitgen et al, 1992).

¹³ Πως είναι δυνατή η ύπαρξη χάους στο ηλιακό σύστημα, στο οποίο, παρόλα αυτά, η Νευτώνεια φυσική επιτρέπει τόσο ακριβείς προβλέψεις; Η απάντηση είναι ότι ο χαρακτηριστικός χρόνος του χαοτικού αυτού συστήματος, ο χρόνος δηλαδή που μπορούμε να πραγματοποιούμε «βραχυπρόθεσμες» προβλέψεις με κάποια ελεγχόμενη ακρίβεια είναι περίπου 20 εκατομμύρια χρόνια, χρόνος μικρός όσον αφορά στην ηλικία του σύμπαντος αλλά μεγάλος όσον αφορά τα ανθρώπινα δεδομένα. Αρα παρότι το σύστημα είναι χαοτικό είναι ασφαλείς οι προβλέψεις για τα επόμενα 20 εκατομμύρια χρόνια, είναι όμως αδύνατες για χρονικά διαστήματα μεγαλύτερα. Η έννοια του χαρακτηριστικού χρόνου θα αναλυθεί στο 9ο κεφάλαιο της διατριβής, όπου και θα πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός του για το Μοντέλο MER και για συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων του.

Ο Lorenz είχε δημιουργήσει ένα μοντέλο για να προσομοιώσει την εξέλιξη του καιρού, σε ένα πρωτόγονο ηλεκτρονικό υπολογιστή εκείνης της εποχής. Μετά από αρκετές δοκιμές είχε καταλήξει σε ένα σύστημα 12 διαφορικών εξισώσεων που εξέφραζαν τις σχέσεις ανάμεσα στις μεταβλητές από τις οποίες εξαρτάται η εξέλιξη του καιρού, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η ταχύτητα του ανέμου κ.α. Χρησιμοποιώντας την αριθμητική μέθοδο επίλυσης του συστήματος, κάθε ένα λεπτό εργασίας ο υπολογιστής τύπωνε μια σειρά αριθμούς, οι οποίοι αντιστοιχούσαν στην εξέλιξη του καιρού μιας ολόκληρης ημέρας. Η εξέλιξη του καιρού, με τον τρόπο αυτό, ήταν ντετερμινιστικά προδιαγεγραμμένη από τις διαφορικές εξισώσεις και την αρχική συνθήκη. Όποιος μπορούσε να καταλάβει τις σελίδες εκείνες θα μπορούσε να δει, για παράδειγμα, ένα (ψηφιακό) δυτικό άνεμο να στρέφεται από το νότο προς το βορρά ή ένα (ψηφιακό) κυκλώνα να περιστρέφεται αργά γύρω από μια ιδεατή υδρόγειο (Gleick,1987). Η πρόγνωση του καιρού περίμενε δύο αιώνες για να δημιουργηθεί μια μηχανή που θα μπορούσε να επαναλαμβάνει συνεχώς εκατομμύρια υπολογισμούς και να τους ολοκληρώνει σε εύλογο χρονικό διάστημα.

Κάποια μέρα ο Lorenz, θέλοντας να εκτυπώσει μια ακολουθία της εξέλιξης του καιρού που να έχει μεγαλύτερο μήκος, αντί να αρχίσει από την αρχή άρχισε από τη μέση των υπολογισμών της προηγούμενης μέρας. Πληκτρολόγησε τους αριθμούς κατευθείαν από την προηγούμενη τυπωμένη σελίδα και πήγε να πει έναν καφέ, ώσπου να τελειώσει ο υπολογιστής τις εκτυπώσεις του. Όταν γύρισε, μια ώρα αργότερα, είδε κάτι απρόσμενο, κάτι που έριχνε το σπόρο μιας νέας επιστήμης (Gleick,1987). Η καινούργια εκτέλεση, που κανονικά έπρεπε να είναι ίδια με την παλιά, διέφερε από κάποιο σημείο και μετά εντελώς, ώστε ο (ψηφιακός) καιρός έπειτα από λίγους μήνες είχε χάσει κάθε ομοιότητα με αυτόν που είχε υπολογίσει ο υπολογιστής την προηγούμενη μέρα (εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2: Στην εικόνα φαίνεται μια εκτύπωση που πήρε ο Lorenz το 1961. Από το ίδιο σχεδόν σημείο εκκίνησης ο Lorenz είδε τον καιρό που έδινε ο υπολογιστής να δημιουργεί σχήματα που εξελίσσονταν όλο και πιο διαφορετικά μέχρι που κάθε ομοιότητα εξαφανίστηκε (Gleick,1987).

Η απόκλιση των αποτελεσμάτων οφειλόταν στο γεγονός ότι τα νούμερα που ξανα-εισήγαγε "με το χέρι" ο Lorenz είχαν μικρότερη ακρίβεια (λιγότερα δεκαδικά ψηφία) από εκείνα που εσωτερικά αποθήκευε ο υπολογιστής. Για την ιστορία, αναφέρουμε πως αντί να βάλει τον αριθμό 0.506127 με έξι δεκαδικά ψηφία, τον οποίο είχε στη μνήμη ο υπολογιστής την προηγούμενη μέρα, αυτός πληκτρολόγησε τον αριθμό 0.506. Ο Lorenz είχε πληκτρολογήσει τον αριθμό στρογγυλεμένο, υποθέτοντας ότι η διαφορά του ενός χιλιοστού δε θα είχε συνέπειες. Το συμπέρασμα ήταν ότι, στο συγκεκριμένο μοντέλο, και η ελάχιστη ακόμη έλλειψη ακρίβειας είναι καθοριστική, κάτι που αργότερα αποκαλύφθηκε ότι είναι γενικό χαρακτηριστικό μιας ολόκληρης κλάσης συστημάτων, των λεγόμενων χαοτικών.

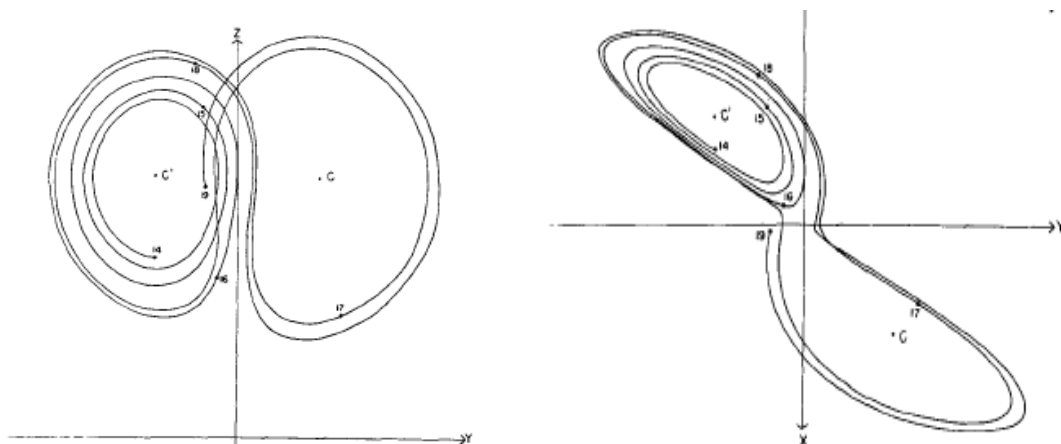
Στη συνέχεια ο Lorenz απλοποίησε το μοντέλο του, κατασκευάζοντας ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων που να ανήκει στο χώρο των τριών διαστάσεων και όχι των δώδεκα. Μολονότι τρισδιάστατο διατηρεί την πολύπλοκη συμπεριφορά του αρχικού με τις δώδεκα εξισώσεις, γεγονός που οφείλεται στη μη γραμμικότητά του. Το κλασικό μοντέλο, που συνήθως αποκαλείται σύστημα των εξισώσεων του Lorenz και αναλύεται στο άρθρο του 1963, είναι το εξής:

$$dx/dt=10(y-x)$$

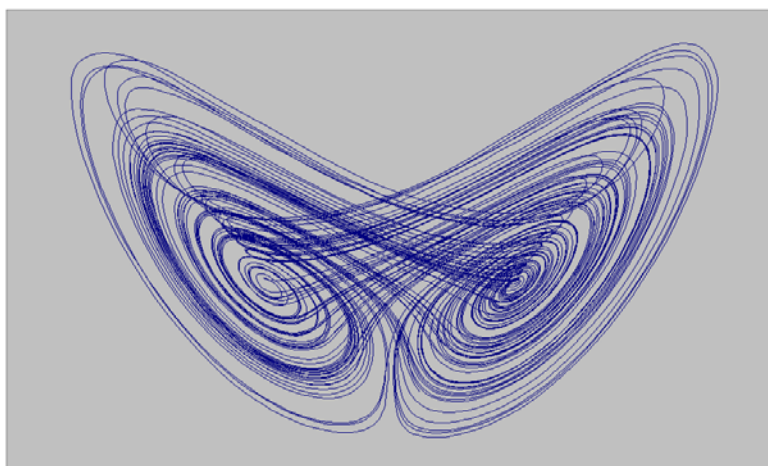
$$dy/dt=xz+28x-y$$

$$dz/dt=xy-(8/3)z$$

Παρατηρούμε ότι αποτελείται από τρεις διαφορικές εξισώσεις που περιέχουν δύο μη γραμμικούς όρους (τους xz και xy) και μοντελοποιούσαν ρεύματα μεταφοράς θερμότητας μέσα σε ένα ρευστό. Στην εικόνα 5.3 παρουσιάζεται ένα μέρος της λύσης του συστήματος αυτού για μια δεδομένη αρχική συνθήκη, όπως δημοσιεύτηκε στο άρθρο του 1963 και στην εικόνα 5.4 παρουσιάζεται ένα μέρος της τροχιάς της λύσης, που σήμερα ονομάζεται Ελκυστής του Lorenz.



Εικόνα 5.3: Προβολή στο επίπεδο yz και στο επίπεδο xy του ελκυστή του Lorenz, όπως εμφανίστηκαν στο ιστορικό πλέον άρθρο “Deterministic, non periodic flow” το 1963!



Εικόνα 5.4: Ο Ελκυστής του Lorenz. Κάθε τροχιά, παρότι κινείται μέσα σε μια φραγμένη περιοχή του χώρου, συνεχίζει την κίνησή της επ’ άπειρον (δεν τερματίζει ποτέ!) δημιουργώντας βρόγχους και δεν τέμνει ποτέ τον εαυτό της, άρα κανένα τμήμα της δεν επαναλαμβάνεται. Εμφανίζει δηλαδή ένα είδος άπειρης πολυπλοκότητας.

Η παραπάνω εικόνα αυτή έγινε το σύμβολο της επιστήμης του χάους. Αποκαλύπτει τη δομή που ήταν κρυμμένη μέσα σε μια άτακτη ροή δεδομένων. Η τροχιά αυτή προσδιορίζεται με τη μέθοδο της αριθμητικής επίλυσης και αποτελεί μέρος του ελκυστή του Lorenz. Είναι η απεικόνιση μιας λύσης του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων με τις τρεις μεταβλητές, για μια δεδομένη αρχική συνθήκη. Κάθε στιγμή οι τρεις μεταβλητές προσδιορίζουν τη θέση ενός σημείου στον τρισδιάστατο χώρο. Καθώς το σύστημα μεταβάλλεται, η κίνηση του σημείου παριστάνει την εξέλιξη του

συστήματος στο χρόνο. Η τροχιά του σημείου έχει σχεδιαστεί για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα και μοιάζει με πεταλούδα ή ως ένα είδος διπλής έλικας. Ολόκληρος ο ελκυστής είναι αδύνατο να σχεδιαστεί μιας και οποιαδήποτε τροχιά είναι άπειρη, δηλαδή δεν τερματίζει κάπου, σε ένα σημείο ή σε μια περιοδική κίνηση. Παρότι οι τροχιές κινούνται επ' άπειρον στο χώρο των τριών διαστάσεων, παραμένουν παγιδευμένες σε μια πεπερασμένη περιοχή και "κουλουριάζονται" χωρίς ποτέ να τέμνουν η μία την άλλη ή να κλείνουν, να επαναλαμβάνονται δηλαδή περιοδικά. Η κίνηση αυτή συνεχίζει να δημιουργεί βρόγχους επ' άπειρον μέσα σε μια φραγμένη περιοχή του χώρου αλλά κανένα τμήμα της δεν επαναλαμβάνεται και δεν τέμνει ποτέ τον εαυτό της, εμφανίζει δηλαδή ένα είδος άπειρης πολυπλοκότητας. Για παράδειγμα περιστρέφεται δύο φορές αριστερά, μετά τρεις δεξιά, μετά δέκα αριστερά, μία δεξιά κλπ. Η ακολουθία των αριθμών αυτών που παράγονται από κάθε τροχιά δεν επαναλαμβάνεται ποτέ, πρόκειται για καθαρή αταξία αλλά ταυτόχρονα αποτελεί και ένα νέο είδος τάξης. Όλες οι τροχιές, μετά από αρκετό χρόνο, συγκεντρώνονται τελικά σε μια περιοχή που αποτελεί τον ελκυστή του συστήματος. Δεν πρόκειται όμως για κανονικό ελκυστή, ο οποίος να ανήκει σε οποιοδήποτε είδος από αυτά που περιγράφηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Το γεωμετρικό αυτό σύνολο δεν έχει καμιά από τις συνήθεις ιδιότητες και αργότερα το είδος αυτού του ελκυστή ονομάστηκε από τους David Ruelle και Floris Takens *παράξενος ελκυστής (strange attractor)* και είναι μορφοκλασματικό σύνολο ή αλλιώς *σύνολο φράκταλ*.

Ο όρος φράκταλ προτάθηκε από τον Benoît Mandelbrot το 1975 και προέρχεται από τη λατινική λέξη fractus, που σημαίνει "σπασμένος", "κατακερματισμένος". Με τον όρο φράκταλ ονομάζεται ένα γεωμετρικό σχήμα που επαναλαμβάνεται αυτούσιο σε άπειρο βαθμό μεγέθυνσης και συχνά αναφέρεται ως απείρως πολύπλοκο. Το φράκταλ παρουσιάζεται ως "μαγική εικόνα", που όσες φορές και να μεγεθυνθεί οποιοδήποτε τμήμα του θα συνεχίζει να παρουσιάζει ένα εξίσου περίπλοκο σχέδιο, με μερική ή ολική επανάληψη του αρχικού. Χαρακτηριστικό επομένως των φράκταλ είναι η λεγόμενη *αυτο-ομοιότητα (self-similarity)* σε κάποιες δομές τους, η οποία εμφανίζεται σε διαφορετικά επίπεδα μεγέθυνσης.

Η πιο χαρακτηριστική ιδιότητα των φράκταλ είναι η πολυπλοκότητα της μορφής τους, δηλαδή η εμφάνιση ανωμαλιών σε σχέση με τα συμβατικά γεωμετρικά σχήματα, κατά συνέπεια δεν είναι αντικείμενα τα οποία μπορούν να οριστούν με τη βοήθεια της ευκλείδειας γεωμετρίας. Αν μεγεθύνουμε κάποιο αντικείμενο το οποίο μπορεί να οριστεί με την ευκλείδεια γεωμετρία, παραδείγματος χάριν την περιφέρεια

ενός κύκλου, αυτή μετά από αλληπάλληλες μεγεθύνσεις θα εμφανίζεται ως ευθύγραμμο τμήμα. Αντίθετα, σε ένα σχήμα φράκταλ, θα εμφανίζονται κατόπιν μεγεθύνσεων λεπτομέρειες που δεν ήταν ορατές σε μικρότερη κλίμακα μεγέθυνσης και η πολυπλοκότητα θα παρέμενε η ίδια. Φράκταλ απαντώνται και στη φύση, όπως για παράδειγμα οι νιφάδες του χιονιού, τα φύλλα των φυτών, οι διακλαδώσεις των αιμοφόρων αγγείων, τα σύννεφα κ.α., χωρίς όμως να υπάρχει άπειρη λεπτομέρεια στη μεγέθυνση, όπως συμβαίνει με τα φράκταλ που προκύπτουν από μαθηματικές σχέσεις. Κατ' αναλογία δεν απαντώνται ακριβώς στη φύση και τα γεωμετρικά στερεά όπως ο κύβος, η σφαίρα κλπ.

Εκτός από την απείρως πολύπλοκη αυτή γεωμετρική δομή όμως, ο ελκυστής του Lorenz επιδεικνύει και την ιδιότητα της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες ή αλλιώς το φαινόμενο της πεταλούδας.

5.7. Το Φαινόμενο της Πεταλούδας

Αν χρησιμοποιήσουμε την ίδια «σχεδόν» αρχική συνθήκη, αν για παράδειγμα μετακινήσουμε το αρχικό σημείο της τροχιάς της λύσης του διαφορικού συστήματος του Lorenz κατά ένα εκατομμυριοστό, τότε η καινούργια τροχιά που θα προκύψει, μετά από ένα αρχικό χρονικό όριο που θα ακολουθεί την παλιά, θα εξελιχθεί εντελώς διαφορετικά από την προηγούμενη. Η τροχιά αυτή αναπαριστά την εξέλιξη του καιρού, κατά συνέπεια η παραμικρή απόκλιση, της τάξης του εκατομμυριοστού ή και μικρότερη, αφαιρεί τη δυνατότητα πρόβλεψης, παρότι το σύστημα είναι απολύτως ντετερμινιστικό. Στο φαινόμενο αυτό δόθηκε η ονομασία *φαινόμενο της πεταλούδας (butterfly effect)*¹⁴ και αργότερα ο πιο τεχνικός όρος *ευαισθητή εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες (sensitivity to initial conditions)*. Σύμφωνα με μια από τις διατυπώσεις, λέγεται ότι "αν μια πεταλούδα κινήσει τα φτερά της στον Αμαζόνιο, μπορεί να φέρει βροχή στην Κίνα". Διαφορετικές παραλλαγές εκφράζουν ουσιαστικά την ίδια ιδέα: μια απειροελάχιστη μεταβολή στη ροή των γεγονότων οδηγεί, μετά από την πάροδο αρκετού χρόνου, σε μια

¹⁴ Ο Lorenz αρχικά χρησιμοποίησε την εικόνα ενός γλάρου. Το μόνιμο όνομα φαίνεται πως προήλθε από τον τίτλο του άρθρου του Lorenz «Predictability: Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set Off a Tornado in Texas?», που στάλθηκε στο ετήσιο συνέδριο της Αμερικανικής Ένωσης για την Πρόοδο της Επιστήμης στην Ουάσιγκτον, στις 29 Δεκεμβρίου 1979 (Gleick, 1987).

εξέλιξη της ιστορίας του συστήματος δραματικά διαφορετική από εκείνη που θα λάμβανε χώρα αν δεν είχε συμβεί η μεταβολή αυτή.

Το φαινόμενο της πεταλούδας δεν ήταν εντελώς καινούρια έννοια, αλλά είχε τη θέση της στη λαϊκή παράδοση:

Για ένα καρφί, χάθηκε το πέταλο

Για ένα πέταλο, χάθηκε το άλογο

Για ένα άλογο, χάθηκε ο καβαλάρης

Για έναν καβαλάρη, χάθηκε η μάχη

Για μια μάχη, χάθηκε η αυτοκρατορία! (Gleick, 1987)

Μερικές φορές, το φαινόμενο της πεταλούδας παρερμηνεύεται στην κοινή αντίληψη. Για παράδειγμα, η ιδέα ότι κάτι τόσο ασήμαντο όσο μια πεταλούδα μπορεί να "προκαλέσει" έναν τυφώνα ή να τον αποτρέψει, έχει θεωρηθεί από κάποιους ως επιχείρημα υπέρ της άποψης ότι ένα "ασήμαντο" άτομο, μια "περιθωριακή" ιδέα ή ένα φαινομενικά άσχετο γεγονός μπορούν να παίξουν έναν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη της Ιστορίας. Ωστόσο, η ουσία της συμπεριφοράς ενός χαοτικού συστήματος είναι ότι, στην πράξη το σύστημα είναι απρόβλεπτο σε "βάθος χρόνου". Συνεπώς, ενώ πράγματι ένα ασήμαντο γεγονός μπορεί να αλλάξει άρδην την πορεία της ιστορίας, δεν είμαστε σε θέση να ξέρουμε ποια θα ήταν η εξέλιξη του συστήματος χωρίς το γεγονός και άρα δεν μπορούμε να σχεδιάσουμε τις ενέργειές μας ώστε να πετύχουμε ένα επιθυμητό σημαντικό αποτέλεσμα μακροπρόθεσμα. Μπορούμε να προγραμματίζουμε αποτελεσματικά μόνο μέσα στα όρια ενός χρονικού ορίζοντα προβλεψιμότητας, που για τα χαοτικά συστήματα μπορεί να προσδιοριστεί με βάση το χαρακτηριστικό του χρόνου του συστήματος, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια της διατριβής.

5.8. Χάος: Μια Νέα Επιστήμη

Η Επιστήμη των Δυναμικών Συστημάτων και του Χάους μελετά τη συμπεριφορά ορισμένων μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων, τα οποία κάτω από ορισμένες συνθήκες παρουσιάζουν ευαίσθητη εξάρτηση στις αρχικές συνθήκες. Η ευαισθησία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την φαινομενική τυχαιότητα της παρατηρούμενης συμπεριφοράς των συστημάτων, παρόλο που τα συστήματα αυτά είναι αιτιοκρατικά (ντετερμινιστικά), με την έννοια ότι είναι καλώς ορισμένοι οι νόμοι εξέλιξής τους και δεν περιέχουν τυχαίες παραμέτρους, ενώ είναι μη προβλέψιμα. Στα συστήματα αυτού του είδους περιλαμβάνονται η ατμόσφαιρα, το ηλιακό σύστημα, οι τεκτονικές πλάκες, τα

οικονομικά συστήματα, η εξέλιξη (μεταβολή) των πληθυσμών κ.α. Παραδείγματα τέτοιων φαινομένων απαντώνται πολλά ακόμη και στην καθημερινή ζωή. Ο καπνός του τσιγάρου που στροβιλίζεται σε πολύπλοκες και απρόβλεπτες δίνες, τα κύματα που σκάζουν πάνω σε μια ακτή, το μελάνι που διαχέεται μέσα σε ένα ποτήρι νερού, η εξέλιξη των τιμών των μετοχών στο χρηματιστήριο, ο χρόνος ανάμεσα στους διαδοχικούς χτύπους της καρδιάς, η ροή του νερού μέσα στους σωλήνες του αίματος ή στα αγγεία είναι κάποια ενδεικτικά παραδείγματα στα οποία εμφανίζεται το χάος. (Μπούντης, 1995). Παρόμοιες εκδηλώσεις χαοτικής συμπεριφοράς εμφανίζονται στο σύνολο των επιστημονικών κλάδων, αρκεί να υπάρχει ένας μη γραμμικός όρος στις εξισώσεις που μοντελοποιούν το φαινόμενο.

Με την επιστήμη του χάους ο ντετερμινισμός επεκτάθηκε και κατάφερε να μοντελοποιήσει φαινόμενα που προηγούμενα θεωρούνταν τυχαία ή ακανόνιστα. Αποδείχθηκε ότι σε φαινόμενα που προγενέστερα η επιστήμη θεωρούσε ότι υπάρχει χάος, δηλαδή έλλειψη τάξης, απουσία νόμων και μη προβλεψιμότητα, στην πραγματικότητα υπάρχει (ντετερμινιστικό) χάος, δηλαδή απόλυτη αιτιοκρατία και υπακοή σε νόμους αλλά ταυτόχρονα ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες και άρα μη προβλεψιμότητα. *Ακόμη κι αν σε ολόκληρο το σύμπαν κυριαρχεί ένας απόλυτος ντετερμινισμός, θα μπορούσε, σύμφωνα με τη Θεωρία του Χάους, αυτό να είναι μη προβλέψιμο* (Κουλούρης, 2007).

Όπως αναλύθηκε και προηγούμενα, η έλλειψη προβλεψιμότητας δεν οφείλεται σε ανεπάρκεια της μαθηματικής περιγραφής των φαινομένων ή σε ελλιπή γνώση των φυσικών νόμων που τα διέπουν αλλά απορρέει κατά κύριο λόγο από το γεγονός ότι τα περισσότερα φυσικά φαινόμενα περιγράφονται από εξισώσεις που είναι μη γραμμικές και περιέχουν πολλές μεταβλητές που εξαρτώνται η μία από την άλλη με ιδιαίτερα περίπλοκο τρόπο. Τέτοια μη γραμμικά συστήματα διαθέτουν, για πολλές τιμές των παραμέτρων τους, μεγάλες περιοχές στις οποίες η κίνηση εξαρτάται εξαιρετικά ευαίσθητα από την επιλογή των αρχικών συνθηκών. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται χαοτικά και μολονότι υπάρχει αδυναμία μακροπρόθεσμης πρόβλεψής της εξέλιξης των φαινομένων αυτών στο χρόνο, έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια μια σειρά από ερευνητικά εργαλεία για τη μελέτη τους, όπως οι εκθέτες Lyapunov, η εντροπία, ο λευκός και έγχρωμος θόρυβος κ.α., τα οποία επιτρέπουν τον προσδιορισμό του είδους της χαοτικής συμπεριφοράς, την ποσοτικοποίηση της ιδιότητας της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες καθώς και την πραγματοποίηση βραχυπρόθεσμων προβλέψεων, με

προσδιορισμό του μεγέθους του ορίζοντα προβλεψιμότητας και του ελέγχου του μεγέθους τους λάθους που εμπεριέχει αυτή η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη.

Εκτός από τη μοντελοποίηση φυσικών ή κοινωνικών φαινομένων, με τα εργαλεία της επιστήμης του χάους είναι δυνατό να μελετηθεί οποιαδήποτε χρονοσειρά από εμπειρικά δεδομένα, όπως ο δείκτης τιμών ενός χρηματιστηρίου είτε το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο χτύπων της καρδιάς και με μεθόδους της θεωρίας να διερευνήσει αν αυτή η χρονοσειρά προκύπτει από μια στοχαστική διαδικασία ή από μια ντετερμινιστική διαδικασία, συνήθως από ένα χαμηλοδιάστατο χάος που έχει και ένα ποσοστό θορύβου, το οποίο με κατάλληλες τεχνικές μπορεί να αφαιρεθεί και στη συνέχεια να πραγματοποιηθούν βραχυπρόθεσμες προβλέψεις. Η επιστήμη αυτή αποτελεί ένα νέο κλάδο των μαθηματικών με εφαρμογές σε όλες τις άλλες επιστήμες, κάπως όμως ιδιόμορφο, διότι στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν έχουν δοθεί μαθηματικές αποδείξεις.

Το μοντέλο MER είναι κι αυτό ένα σύστημα εξισώσεων διαφορών, όμως παρουσιάζει δύο χαρακτηριστικές ιδιότητες που δυσκολεύουν εξαιρετικά τη μελέτη του και τη χρήση των εργαλείων που έχουν αναπτυχθεί για τα συστήματα αυτά. Το πρώτο είναι η μεγάλη διάσταση του χώρου των φάσεων. Για εκατό πράκτορες ο χώρος αυτός είναι 200 διαστάσεων. Το δεύτερο είναι η πολυπλοκότητα του αλγόριθμου, ο οποίος περιλαμβάνει τον υπολογισμό του μέσου όρου κάποιων τιμών της μεταβλητής της προηγούμενης επανάληψης. Το ποιες όμως τιμές θα συμπεριληφθούν στον υπολογισμό εξαρτάται κάθε φορά από την επανάληψη (iteration) και το συγκεκριμένο πράκτορα. Η επιλογή γίνεται με βάση δύο ή περισσότερα κριτήρια, ανάλογα με τις παραμέτρους και τις υποθέσεις του μοντέλου. Στη συνέχεια, σύμφωνα με τον αλγόριθμο του μοντέλου γίνεται η διόρθωση της μιας γνώμης για όλους τους πράκτορες, ανάλογα με τις νέες τιμές των μεταβλητών (των γνωμών) που έχουν προκύψει. Είναι φανερό ότι η πολυπλοκότητα του υπολογισμού είναι πολύ μεγαλύτερη από για παράδειγμα των δύο εξισώσεων διαφορών που παράγουν τον ελκυστή του Henon.

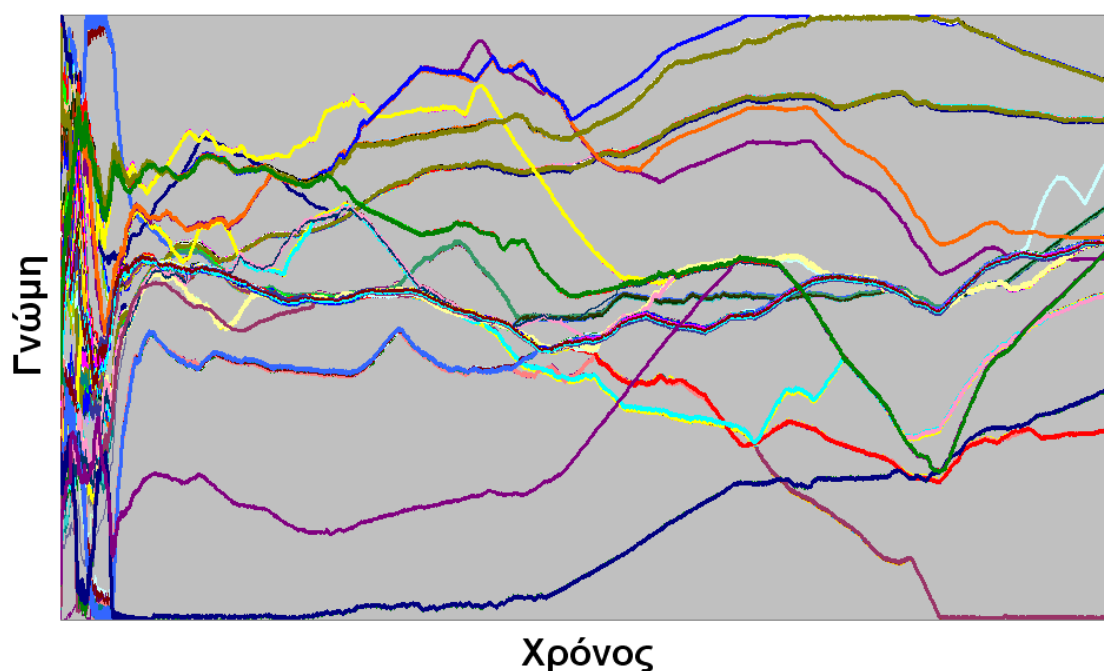
Κατά τη μελέτη του μοντέλου MER με την υπόθεση ότι τα άτομα είναι δύο ή τρία ενδεχομένως να καθιστά εφικτό τον προσδιορισμό του ελκυστή, ο οποίος θα ανήκει στις τέσσερις ή τις έξι διαστάσεις αντίστοιχα, καθώς και της κλασματικής διάστασής του και των γεωμετρικών του ιδιοτήτων, ίσως τον υπολογισμό του ελκόμενου συνόλου και στη συνέχεια τη συσχέτιση των μαθηματικών αυτών ιδιοτήτων με τη συμπεριφορά των γνωμών των πρακτόρων. Μια τέτοια μαθηματική ανάλυση ξεπερνάει τους στόχους της

παρούσας διατριβής μιας και οι απαιτήσεις της είναι τέτοιες, που ενδεχομένως να αποτελέσει αποκλειστικό αντικείμενο κάποιας άλλης διατριβής.

Η σύντομη αυτή εισαγωγή στην επιστήμη του χάους απέχει πολύ από το να είναι πλήρης, ακόμη και να κάνει μια απλή αναφορά στην έκταση και το βάθος των φαινομένων που εμπλέκονται. Αποσκοπεί να δώσει απλώς μια γεύση στον μη μυημένο για την έκταση των φαινομένων που έχει βρει εφαρμογή και που μπορεί ακόμη να υποβοηθήσει την έρευνα.

ΜΕΡΟΣ Β΄
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΟ
ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΩΝ
ΙΣΟΡΡΟΠΙΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6
ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΩΝ
ΙΣΟΡΡΟΠΙΩΝ (MULTIPLE EQUILIBRIA REGULATION
MODEL-MER MODEL)



Δυναμική εξέλιξη των γνώμων των ατόμων μιας τεχνητής κοινωνίας σύμφωνα με το Μοντέλο Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών. Η εξέλιξη αυτή είναι χαοτική, δηλαδή ντετερμινιστική και μη προβλέψιμη.

6.1. Σύντομη Παρουσίαση του Μοντέλου Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών

Μετά την παρουσίαση των σημαντικότερων δραστοστροφών μοντέλων προσομοίωσης δυναμικής εξέλιξης των γνωμών, στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μια αρχική παρουσίαση του **Μοντέλου Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών (Multiple Equilibria Regulation Model ή απλώς MER Model)**, για το οποίο η μελέτη του ρόλου της τοπολογίας της επικοινωνίας των πρακτόρων αποτελεί και το κυρίως αντικείμενο της παρούσας διατριβής. Το μοντέλο αυτό κατασκευάστηκε από τους Ιωάννη Κατερέλο και Ανδρέα Κουλούρη (Katerelos & Koulouris, 2004a, 2004b, 2004c). Αντικείμενο μελέτης του αποτελεί η δυναμική εξέλιξη των γνωμών των ατόμων μιας κοινωνίας. Είναι γνωστό ότι στην κοινωνική πραγματικότητα ο σχηματισμός και η εξέλιξη των γνωμών των ατόμων είναι εξαιρετικά δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να προβλεφθεί. Το μοντέλο MER επιχειρεί να καταδείξει ότι με ένα μίνιμουμ από αρχές, που έχουν επιβεβαιωθεί από την εμπειρική κοινωνιοψυχολογική έρευνα, η εξέλιξη των γνωμών των ατόμων μιας κοινωνίας μπορεί να είναι χαοτική (ντετερμινιστική και μη προβλέψιμη).

Το μοντέλο υποθέτει την ύπαρξη ενός αριθμού πρακτόρων, καθένας από τους οποίους έχει δύο γνώμες, που αφορούν στο ίδιο κοινωνικό αντικείμενο και επιπλέον μια δομή μεταξύ των δύο γνωμών. Ανάμεσα στους πράκτορες λαμβάνει χώρα μια διαδικασία μετασχηματισμού των γνωμών τους. Η βασική υπόθεση του μοντέλου είναι ότι κάθε πράκτορας τείνει να διατηρήσει μια ισορροπία με το κοινωνικό του περιβάλλον καθώς επίσης και να διατηρήσει την εσωτερική του ισορροπία. Πρόκειται για δυο αρχές που έχουν επικυρωθεί από την εμπειρική κοινωνιοψυχολογική έρευνα και που και οι δύο τείνουν στην διατήρηση της ισορροπίας, είτε ατομικής είτε κοινωνικής. Όσον αφορά την κοινωνική ισορροπία, κάθε πράκτορας υιοθετεί τον μέσο όρο των γνωμών των γειτονικών του πρακτόρων, όσων βρίσκονται μέσα στο όριο εμπιστοσύνης, το μέγεθος του οποίου προσδιορίζει το *φράγμα εμπιστοσύνης* ϵ . Κάθε πράκτορας όμως προσπαθεί να ισορροπήσει και ατομικά, έτσι, σύμφωνα με τη δομή των δύο γνωμών οι οποίες θεωρούνται αντίθετες, αν και οι δύο αυξηθούν προς την ίδια κατεύθυνση τότε ο πράκτορας αντιστρέφει τη γνώμη με τη μικρότερη μεταβολή και τη διορθώνει, πολλαπλασιάζοντας με τον *συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας* ψ .

Οι υποθέσεις αυτές του μοντέλου στο μικρό επίπεδο, για όλες σχεδόν τις τιμές των παραμέτρων ψ και ϵ και τις τοπολογίες επικοινωνίας, έχουν ως συνέπεια, στο μεγάλο επίπεδο, το σχηματισμό ομάδων, παράγουν δηλαδή ένα κοινωνικό φαινόμενο που έχει

παρατηρηθεί σε όλες τις κοινωνίες αλλά και έχει παραχθεί και από τα υπόλοιπα δραστοστρεφή μοντέλα δυναμικής εξέλιξης των γνώμων. Για τις τιμές των παραμέτρων όμως που εξισώνουν, ως προς το μέγεθός τους, τις δύο τάσεις προς ισορροπία και με τοπολογία επικοινωνίας που επιτρέπει μόνο τοπικές αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων, το αποτέλεσμα στο μακρό επίπεδο δεν έχει παρατηρηθεί ως τώρα σε κανένα άλλο μοντέλο προσομοίωσης είτε σε έρευνα που διενεργήθηκε με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο, και είναι η αέναη κίνηση του συστήματος με ένα χαοτικό τρόπο. Κάθε φορά που οι πράκτορες τροποποιούν τη γνώμη τους για να ισορροπήσουν κοινωνικά αποσταθεροποιούν την εσωτερική τους ισορροπία και αντίθετα κάθε φορά που ισορροπούν ατομικά διαταράσσουν την κοινωνική ισορροπία. Έτσι το σύστημα δεν κατασταλάζει σε μια τελική σταθερή κατάσταση αλλά βρίσκεται σε αέναη κίνηση και επιπλέον διαθέτει την ιδιότητα της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες, είναι δηλαδή μη προβλέψιμο. Η ιδιότητα της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες είναι ένα χαρακτηριστικό του συστήματος και όχι αποτέλεσμα του εργαλείου μέτρησης.

Κατά συνέπεια η τάση για ισορροπία προς δύο κατευθύνσεις, ατομική και κοινωνική και η δυνατότητα επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης μόνο σε τοπικό επίπεδο, κάνει αδύνατη την μακροπρόθεσμη πρόβλεψη της εξέλιξης των γνώμων οποιουδήποτε μεμονωμένου πράκτορα αλλά και ολόκληρου του συστήματος. Κατά συνέπεια φωτογραφικές στατιστικές μετρήσεις των γνώμων των πρακτόρων μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι άνευ νοήματος, καθώς δεν μπορούν να συλλάβουν τη δυναμική του συστήματος. Ο χαοτικός χαρακτήρας του συστήματος μπορεί να μετρηθεί με τον υπολογισμό του εκθέτη Lyapunov, ο οποίος για τις τιμές των παραμέτρων $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$ και την τοπολογία επικοινωνίας του κυψελοειδούς αυτομάτου είναι ίσος με 0.126. Αυτό σημαίνει ότι οποιοδήποτε απειροελάχιστο λάθος στις αρχικές συνθήκες θα αυξηθεί κατά $e^{0.126}=1.13$ φορές σε κάθε επανάληψη. Στη συνέχεια για τις ίδιες τιμές των παραμέτρων και τις ίδιες συνθήκες ο χαρακτηριστικός χρόνος του συστήματος, δηλαδή ο χρόνος που οποιοδήποτε λάθος δεκαπλασιάζεται σε μέγεθος ισούται με 18 επαναλήψεις. Αυτός είναι και ο ορίζοντας προβλεψιμότητας του συστήματος. Αν δηλαδή έχουμε μια μέτρηση των γνώμων των πρακτόρων μια συγκεκριμένη στιγμή, μπορούμε, αφού διεξάγουμε την προσομοίωση, να προβλέψουμε τη γνώμη τους έπειτα από 18 επαναλήψεις, γνωρίζοντας ότι οποιοδήποτε λάθος στην μέτρηση των αρχικών συνθηκών θα έχει γίνει «μόνο» 10 φορές μεγαλύτερο.

Αυτές είναι συνοπτικά οι υποθέσεις και τα αποτελέσματα της διερεύνησης του Μοντέλου Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών, για τα οποία θα γίνει αναλυτική παρουσίαση στο παρόν και στα επόμενα κεφάλαια της διατριβής. Στην επόμενη ενότητα θα γίνει παρουσίαση της βασικής υπόθεσης του μοντέλου, δηλαδή της τάσης των ατόμων να ισορροπήσουν, ατομικά και κοινωνικά, με βάση την κοινωνιοψυχολογική θεωρία.

6.2. Τάση προς Ισορροπία και Κοινωνική Θεωρία

Η βασική υπόθεση του μοντέλου είναι ότι κάθε πράκτορας τείνει να διατηρήσει μια ισορροπία με το κοινωνικό του περιβάλλον αλλά ταυτόχρονα να διατηρήσει και την εσωτερική του ισορροπία. Πρόκειται για ένα αξίωμα με δύο σκέλη, την *τάση διατήρησης της ισορροπίας, ατομικής και κοινωνικής*, το οποίο έχει επικυρωθεί από την εμπειρική κοινωνιοψυχολογική έρευνα.

Είναι γενικά αποδεκτό ότι τα κοινωνικά συστήματα τείνουν να αναζητούν την ισορροπία. Ακολουθώντας τον Sorokin (1927), ο Walter Buckley (1967) προσδιορίζει την απαρχή της «κοινωνικής φυσικής» (το 17^ο αιώνα) θεωρώντας ότι ένα άτομο ή μια κοινωνία λειτουργεί σα μια πολύπλοκη μηχανή (Katerelos & Koulouris, 2004a). Ο Vilfredo Pareto (1916/1935) συμπλήρωσε αυτό το μηχανικό μοντέλο με την έννοια της ισορροπίας. Αντιλαμβανόταν την ισορροπία έτσι, ώστε «η παραμικρή αλλαγή σε κάποιο στοιχείο ή σε κάποια σχέση μεταξύ των στοιχείων του συστήματος, η οποία απομάκρυνε το σύστημα από τη θέση της ισορροπίας, ακολουθούνταν από αντίθετες αλλαγές που έτειναν να επαναφέρουν το σύστημα στη θέση της ισορροπίας». Η ιδέα της κοινωνικής ισορροπίας και της διατήρησής της βρίσκεται στην καρδιά της θεωρητικής σκέψης και του Durkheim, ο οποίος θεωρείται πατέρας του λειτουργισμού και από μεθοδολογική άποψη, αλλά και από την άποψη της ιδεολογικής υποστήριξης της κοινωνικής ισορροπίας. Στη συνέχεια, η έννοια αυτή της ισορροπίας έγινε αποδεκτή και χρησιμοποιήθηκε από πολλούς κοινωνιολόγους και ιδιαίτερα από τον Talcott Parsons (Buckley 1967, Parsons 1977).

Ο Parsons, που υπήρξε εισηγητής του δομολειτουργισμού, κληρονόμησε από τον Durkheim τη θεωρία της κοινωνικής ισορροπίας, με όλη την ιδεολογική της φόρτιση, και ανέπτυξε την έννοια της κοινωνικοποίησης. Ο Parsons (1977) θεώρησε ως αξίωμα ότι η τάση επιδίωξης ισορροπίας αποτελεί ιδιότητα όλων των συστημάτων. Κάθε σύστημα δηλαδή διαθέτει μηχανισμούς που λειτουργούν έτσι ώστε αυτό να διατηρείται

σταθερό σε κάποιο βαθμό και για κάποιο χρονικό διάστημα, μολονότι η φύση και ο βαθμός της ισορροπίας για κάθε συγκεκριμένο σύστημα παραμένουν ζητήματα ανοιχτά στην εμπειρική έρευνα. Σύμφωνα με τον Parsons (1977) η δομή ενός συστήματος περιλαμβάνει τα στοιχεία εκείνα που μπορούν να θεωρηθούν ότι δεν επηρεάζονται από μικρές και σύντομες διαταραχές, τις οποίες επιφέρουν οι σχέσεις του συστήματος με το εξωτερικό του περιβάλλον. Τέσσερα σύνολα στοιχείων ή δομικά υποσύνολα συνθέτουν την κοινωνική δομή και επιτελούν αντίστοιχες βασικές λειτουργίες διασφαλίζοντας την κοινωνική ισορροπία, *οι κοινωνικές ομαδοποιήσεις* (οικογένεια, πολιτικά κόμματα, κλπ.), που επιτελούν τη λειτουργία της σκόπιμης δραστηριότητας, *οι κοινωνικοί ρόλοι* (οι δραστηριότητες των ατόμων μέσα στην κοινωνία: γονιός, επαγγελματίας, δήμαρχος), που επιτελούν τη λειτουργία της προσαρμογής στο σύστημα, *οι κανόνες* επιτελούν τη λειτουργία του συντονισμού των στοιχείων του συστήματος και τέλος *οι αξίες*, οι οποίες επιτελούν τη σταθεροποιητική λειτουργία, την αδράνεια του συστήματος. Με τις τέσσερις αυτές λειτουργίες το κοινωνικό σύστημα αντιμετωπίζει τους αποσταθεροποιητικούς παράγοντες που το απειλούν.

Η τάση προς κοινωνική ισορροπία έχει μοντελοποιηθεί στα πλαίσια των δραστοστρεφών μοντέλων κοινωνικών προσομοιώσεων κυρίως από το μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης (bounded confidence model) των Hegselmann & Krause (2002), που παρουσιάστηκε στο τρίτο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής. Το μοντέλο αυτό εφαρμόζει ξεκάθαρα την *αρχή της κοινωνικής ισορροπίας* υποθέτοντας ότι κάθε πράκτορας υιοθετεί ως δική του γνώμη το μέσο όρο της γνώμης των πρακτόρων που έχουν γνώμη παρόμοια με τη δική της. Σε κοινωνιοψυχολογικούς όρους αυτό σημαίνει ότι αφού κάθε πράκτορας τείνει να συμμορφωθεί υιοθετώντας τη μέση γνώμη των άλλων, ολόκληρο το σύστημα οδηγείται σε μια μορφή ισορροπίας, δηλαδή σε μια σταθερή, λιμνάζουσα τελική κατάσταση. Η ανάλυση του μοντέλου επικεντρώνεται στην κατηγοριοποίηση των τελικών καταστάσεων της κοινωνίας αυτής των πρακτόρων σε σχέση με τον τελικό αριθμό των ομάδων. Αν όλοι τελικά συμφωνήσουν σε μια γνώμη έχουμε *συμφωνία (consensus)*, αν καταλήξουμε σε δύο ομάδες έχουμε *πόλωση (polarization)* και αν έχουμε περισσότερες ομάδες έχουμε *κατάτμηση (fragmentation)*. Η σημαντικότερη συνεισφορά του μοντέλου περιορισμένης εμπιστοσύνης είναι η ανάδειξη του μηχανισμού με τον οποίο μια τεχνητή κοινωνία μπορεί να καταλήξει στην πόλωση ή κατάτμηση των γνώμων των πρακτόρων της, παρά το γεγονός ότι όλοι τείνουν να υιοθετήσουν τη γνώμη των άλλων και να ισορροπήσουν κοινωνικά, έχοντας

περιορισμένη εμπιστοσύνη στους υπόλοιπους πράκτορες (αγνοούν όσους πράκτορες έχουν γνώμη «αρκετά» διαφορετική από τη δική τους).

Μια βασική υπόθεση του μοντέλου περιορισμένης εμπιστοσύνης είναι ότι κάθε στάση (attitude) που αφορά ένα κοινωνικό ζήτημα που διακυβεύεται περιλαμβάνεται και εκφράζεται με μία και μοναδική γνώμη. Οι περισσότεροι κοινωνικοί ψυχολόγοι όμως θεωρούν ότι αντίθετα με την επιστημονική σκέψη που ακολουθεί λογικούς κανόνες, η κοινωνική σκέψη μπορεί να είναι διφορούμενη: αντίθετες απόψεις σχετικά με ένα ζήτημα μπορούν να σχηματισθούν και η αντίφασή τους να μη γίνεται αισθητή από το κοινωνικό υποκείμενο (Perelman 1979; Billig 1991). Δηλαδή μια γνώμη και η αντίθετή της μπορούν και οι δύο να φαίνονται λογικές και ισοδύναμα ελκυστικές σε ένα άτομο. Άλλωστε οι *σχέσεις μεταξύ γνωστικών στοιχείων (cognitive elements)* μπορεί να είναι τριών ειδών, *σύμφωνη (consonant)*, *ασύμφωνη (dissonant)* και *άσχετη (irrelevant)* (Festinger, 1957). Σε γνωστικό επίπεδο ένα άτομο κατανοεί μια πρόταση καθώς και την αντίθετή της, αλλά ένας εσωτερικός μηχανισμός αυτορύθμισης, σύμφωνα με κάποια εσωτερική δομή, είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση αυτής της αντίφασης¹⁵. Κατά συνέπεια ένα άτομο μπορεί να υιοθετεί δύο γνώμες οι οποίες να αντιφάσκουν και μάλιστα αυτές είναι δυνατό, σύμφωνα με τη θεωρία πεδίου (Lewin, 1936), να αφορούν το ίδιο κοινωνικό αντικείμενο, να αποτελούν δηλαδή συνιστώσες του ίδιου συνόλου (αν υποθεθεί ότι αυτό είναι πεπερασμένο) που βρίσκονται σε μια συνεχή αλληλεπίδραση και ρυθμίζονται σύμφωνα με την εσωτερική δομή του ατόμου.

Στο γνωστικό σύστημα του ατόμου, λοιπόν, υπάρχει μια συνεχής μάχη για συνέπεια, μια ώθηση προς σύμφωνες, αρμονικές, ταιριαστές σχέσεις ανάμεσα σε γνωστικά στοιχεία ή σε σκέψεις, γνώμες και ενέργειες που συναποτελούν μια δομή από γνωσήματα (cognitions), σχετικά με κάποιο κοινωνικό αντικείμενο ή γεγονός. Συνεπώς, μόλις γίνει αισθητή κάποια ασυνέπεια από το υποκείμενο, κάποια ψυχολογική ένταση κινητοποιεί τις σκέψεις του ή την συμπεριφορά του έτσι ώστε να αρθεί αυτή η ασυνέπεια και να επανέλθει η ισορροπία. Η εσωτερική γνωστική διαδικασία συνεχώς λειτουργεί προς την κατεύθυνση της γνωστικής ισορροπίας. Μολονότι είναι γενικά αποδεκτό ότι το άτομο λειτουργεί γνωστικά έτσι ώστε να έχει μια εσωτερική συνέπεια, κανείς δε θα μπορούσε να ισχυριστεί ότι σε κάποιο ατομικό γνωστικό σύστημα επιτυγχάνεται η απόλυτη συνέπεια (Katerelos & Koulouris, 2004a).

¹⁵ Η σύγκρουση αυτή ορίζεται ως ψυχολογική έννοια και όχι σε μια καθαρά λογική βάση.

Σύμφωνα με το μοντέλο MER λοιπόν, μπορούμε εύλογα να υποθέσουμε ότι κάθε φορά που ένα κοινωνικό ζήτημα διακυβεύεται, μια τουλάχιστον διπλή διαπραγμάτευση λαμβάνει χώρα: όταν ένα άτομο συζητά με τους άλλους γι' αυτό το ζήτημα αυτόματα και αναπόδραστα συζητά και για τις δύο γνώμες που το αφορούν. Αν και οι δύο αυτές γνώμες ενισχυθούν, λόγω της εσωτερικής δομής τους, δημιουργείται γνωστική ασυμφωνία, την οποία το άτομο τείνει να μειώσει (Festinger, 1957). Με άλλα λόγια, όλοι επιδιώκουν κάποιου είδους εσωτερικής ισορροπίας. Μια δομή, κοινή για όλα τα άτομα της κοινωνίας, ρυθμίζει τις διάφορες γνώμες που αφορούν το ίδιο κοινωνικό αντικείμενο. Η ισορροπία, αντίθετα, δεν επιτυγχάνεται, μέχρις ότου όλες οι σχετικές με το κοινωνικό αντικείμενο γνώμες υπακούσουν δυναμικά σε ένα περιγραφικό/δεοντολογικό τρόπο εσωτερικής συνύπαρξης.

Η παραδοχή αυτή εναρμονίζεται με τις θεωρίες της γνωστικής συνεκτικότητας (cognitive consistency) που αναπτύχθηκαν στις ΗΠΑ κατά τη δεκαετία του 1950, όπως τη θεωρία της ισορροπίας του Heider (1946, 1958), τη θεωρία της γνωστικής ασυμφωνίας του Festinger (1954) καθώς και η θεωρία της σύμπτωσης των Osgood και Tannenbaum (1955) και η οποία, όπως απέδειξε ο Zanonc (1960), αποτελεί μέρος της γενικότερης θεωρίας της ισορροπίας (Παπαστάμου, 2001). Όλες αυτές οι θεωρίες πριμοδοτούν την άποψη ότι κάθε άτομο έχει την τάση να μεγιστοποιεί τη συνοχή του γνωστικού του κόσμου και κοινός τους παρονομαστής είναι η εξέχουσα θέση την οποία καταλαμβάνουν τόσο η έννοια της «ισορροπίας» όσο και το αξίωμα ότι μια από τις πρωταρχικές ανάγκες του συλλογικού ανθρώπου είναι η εξασφάλιση, μέσω δηλαδή της οικοδόμησης, διατήρησης ή ανεύρεσης μιας κατάστασης κοινωνικής, γνωστικής και ψυχολογικής ισορροπίας. Η έμφαση στην έννοια της ισορροπίας οφείλεται στο πνεύμα της θεωρίας της Gestalt, με την έννοια ότι το άτομο προτιμά τις καλές ολοκληρωμένες μορφές, όπως είναι η κατάσταση της ισορροπίας (Παπαστάμου, 2001).

Παρόλο που, τόσο ο Heider όσο και ο Festinger, θεωρούν πως κάθε διατάραξη της ισορροπίας ενεργοποιεί δυνάμεις ανάκτησής της, για τον μεν δεύτερο η έστω και παροδική ανισορροπία αποτελεί μια δυσάρεστη, ακόμη και αγχογενή κατάσταση, ενώ για τον πρώτο η έλλειψη ισορροπίας δεν συνοδεύεται κατ' ανάγκη από αρνητικά φορτισμένα φαινόμενα. Με άλλα λόγια, η διαφορά ανάμεσα στις δύο θεωρίες εντοπίζεται στο επίπεδο του προσανατολισμού τους: για τη θεωρία του Heider η αναζήτηση της ισορροπίας προκύπτει από την τάση ανεύρεσης μιας κατάστασης αρμονίας, ενώ για τη θεωρία της γνωστικής ασυμφωνίας από την τάση αποφυγής μιας δυσάρεστης και ενοχλητικής κατάστασης (Παπαστάμου, 2001). Η διαφοροποίηση αυτή βέβαια δεν

κάποια έχει επίδραση στις υποθέσεις του μοντέλου MER, μιας και το μοντέλο θέτει ως αξίωμα την ύπαρξη της τάσης για ισορροπία, χωρίς να εξετάζει από πού αυτή προέρχεται και στη συνέχεια μελετά τα αποτελέσματα αυτής της τάσης στο μακρο επίπεδο.

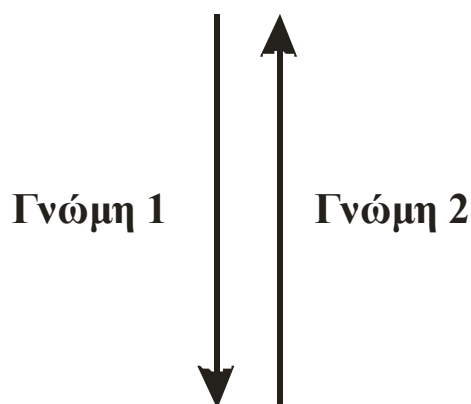
Με βάση την ανωτέρων κοινωνιοψυχολογική ανάλυση λοιπόν υιοθετείται από το μοντέλο MER ένα επιπλέον αξίωμα, σε σχέση με το μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης, το οποίο θα παίζει καταλυτικό ρόλο στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όπως θα φανεί στη συνέχεια. Εκτός λοιπόν της τάσης προς επίτευξη κοινωνικής ισορροπίας, για την οποία χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος του μοντέλου περιορισμένης εμπιστοσύνης, εισάγεται επιπροσθέτως μια δεύτερη γνώμη προς διαπραγμάτευση και μια εσωτερική δομή στο κάθε άτομο που αφορά δύο γνώμες σχετικές με το ίδιο κοινωνικό ζήτημα, όπου η μια αντιτίθεται στην άλλη. Επίσης εισάγεται και η υπόθεση πως κάθε άτομο έχει μια τάση για να ισορροπήσει εσωτερικά έτσι ώστε η μεταβολές των δύο γνωμών του να μην έρχονται σε αντίφαση. Η αναλυτική παρουσίαση αυτής της προϋπόθεσης καθώς και ολόκληρου του αλγορίθμου του μοντέλου θα γίνει στην επόμενη ενότητα.

6.3. Περιγραφή του Αλγορίθμου του Μοντέλου Πολλαπλών

Κανονιστικών Ισορροπιών

Στην παρούσα ενότητα θα προχωρήσουμε στην αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου του μοντέλου MER καθώς και των ιδιοτήτων των πρακτόρων. Μολονότι η βασική ιδιότητα των πρακτόρων, δηλαδή η τάση προς κοινωνική και ενδοατομική ισορροπία είναι εξαιρετικά απλή, θα βοηθούσε πολύ την ευκολότερη κατανόηση όλων των υπολοίπων κεφαλαίων της διατριβής αν ο αναγνώστης αφιέρωνε αρκετό χρόνο στη μελέτη αυτής της ενότητας. Η προσεκτική εξέταση, ειδικά των δύο παραδειγμάτων του αλγορίθμου μαζί με όλες τις τεχνικές τους λεπτομέρειες, κρίνεται αναγκαία, δεδομένου ότι και η παραμικρή αλλαγή μπορεί να μεταβάλλει ριζικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Υποθέτουμε λοιπόν ότι έχουμε 100 πράκτορες (agents) και ένα κοινωνικό ζήτημα που διακυβεύεται. Για λόγους απλότητας, ανάμεσα στους πράκτορες λαμβάνει χώρα μια διαδικασία μετασχηματισμού δύο γνωμών που αφορούν το ίδιο κοινωνικό αντικείμενο. Κάθε πράκτορας λοιπόν έχει δύο γνώμες και επιπλέον μια δομή που τις αφορά. Σε αυτή την απλοποιημένη δομή των δύο γνωμών 1 και 2, η γνώμη 1

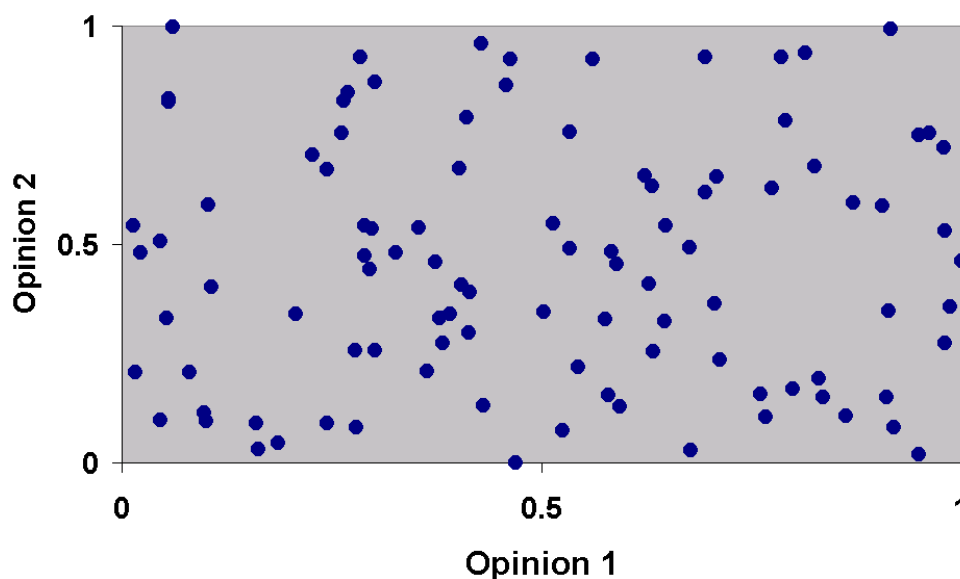
πηγαίνει αντίθετα από τη 2 (δεν πάνε μαζί, Flament, 1981), όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Δομή των δύο γνωμών όπου κάθε μια πάει αντίθετα από την άλλη

Σαν παράδειγμα, ένα άτομο μπορεί να έχει μια γνώμη 1 για το αν ο Κωνσταντίνος Καραμανλής είναι κατάλληλος για πρωθυπουργός της Ελλάδος και γνώμη 2 για το αν ο Γεώργιος Παπανδρέου είναι κατάλληλος. Θα μπορούσε η γνώμη 1 να αφορά το αν το καταλληλότερο κόμμα στις ΗΠΑ είναι το ρεπουμπλικανικό και η γνώμη 2 να αφορά αντίστοιχα την καταλληλότητα ή μη του Δημοκρατικού κόμματος, η γνώμη 1 αν στο χρηματιστήριο πρέπει να αγοράσει κανείς μετοχές υψηλού ρίσκου και η γνώμη 2 σίγουρες μετοχές, με χαμηλότερη όμως απόδοση, αν θα επιλέξει το Α ή το Β δάνειο κλπ. Οποιοδήποτε ζεύγος αντιθέτων γνωμών θα μπορούσε να αποτελέσει κατάλληλο παράδειγμα, το οποίο να τίθεται υπό διαπραγμάτευση από ένα σύνολο ατόμων. Καθένα λοιπόν από τα εκατό άτομα εφοδιάζεται με δύο γνώμες, δηλαδή δύο αριθμούς, που για λόγους απλότητας ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$. Οι αρχικοί αυτοί 200 αριθμοί (100 πράκτορες από δύο γνώμες ο καθένας) είναι τυχαίοι και παράγονται από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Εκτός από αυτή την παραγωγή του αρχικού τυχαίου προφίλ γνωμών, στο μοντέλο MER δεν υπάρχει άλλη στοχαστική¹⁶ διαδικασία. Ένα τυχαίο αρχικό τυχαίο προφίλ παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα και είναι αυτό που θα χρησιμοποιηθεί για τις περισσότερες προσομοιώσεις που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια της διατριβής, εκτός κι αν αναφέρεται διαφορετικά.

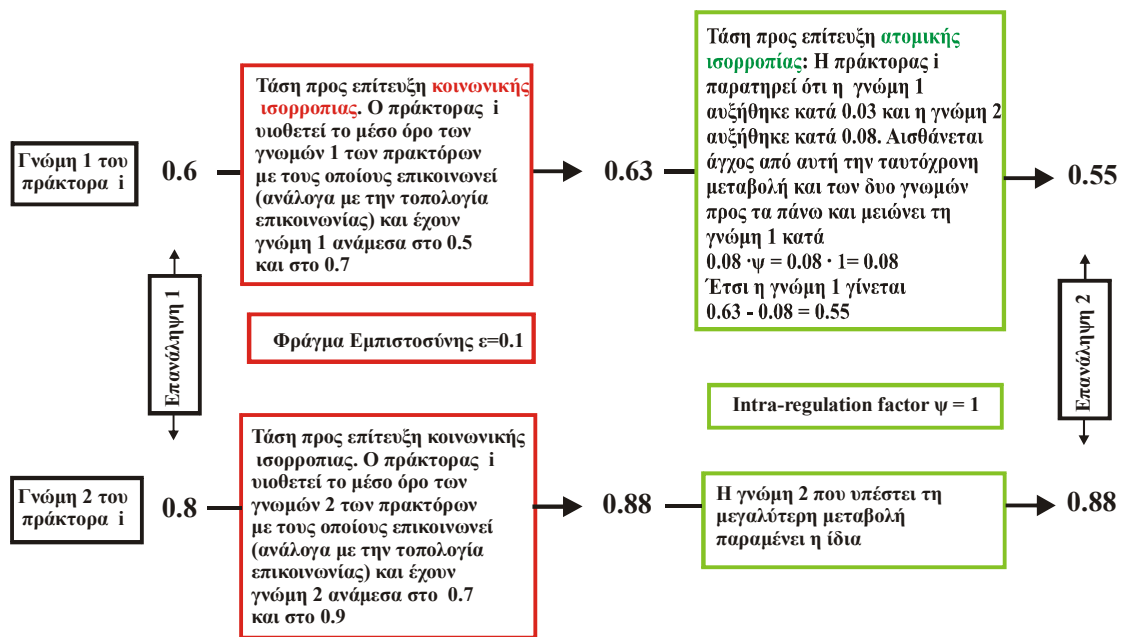
¹⁶ τυχαία



Σχήμα 6.2: Αρχικό Προφίλ Γνωμών (επανάληψη 0). Κάθε τελεία αντιστοιχεί σε ένα πράκτορα και οι συντεταγμένες της αντιστοιχούν στις γνώμες 1 και 2 του συγκεκριμένου πράκτορα. Το ίδιο αρχικό προφίλ θα χρησιμοποιηθεί σε όλες τις προσομοιώσεις στην παρούσα διατριβή, εκτός αν δηλώνεται ρητά ότι χρησιμοποιήθηκε κάποιο άλλο.

Οι δύο βασικές παράμετροι του μοντέλου είναι το *φράγμα εμπιστοσύνης ε (bound of confidence)*, το οποίο το μοντέλο MER κληρονόμησε από το μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης των Hegselmann και Krause, και ο *συντελεστής ενδοατομικής ισορροπίας ψ (intra-regulation factor)*. Η πρώτη από τις δύο παραμέτρους καθορίζει την ισχύ της τάσης του ατόμου για κοινωνική ισορροπία και η δεύτερη την αντίστοιχη ισχύ της τάσης για ενδοατομική ισορροπία. Ο ακριβής ορισμός των παραμέτρων θα δοθεί στη συνέχεια κατά την παρουσίαση του παραδειγμάτων.

Για να γίνει ευκολότερα κατανοητός ο αλγόριθμος θα δοθούν δύο συγκεκριμένα παραδείγματα εφαρμογής του.



Σχήμα 6.3: Παρουσίαση του Αλγορίθμου του Μοντέλου MER για $\epsilon=0.1$ και $\psi=1$. Η πράκτορας i έχει γνώμη 1 ίση με 0.6 και γνώμη 2 ίση με 0.8. Μετά την ολοκλήρωση του αλγορίθμου, στην επόμενη επανάληψη, η γνώμη 1 της πράκτορας i ισούται με 0.55 και η γνώμη 2 με 0.88. Μέσα σε κόκκινο πλαίσιο βρίσκονται τα τμήματα του αλγορίθμου όπου η πράκτορας προσπαθεί να ισορροπήσει κοινωνικά ενώ μέσα σε πράσινο πλαίσιο τα τμήματα του αλγορίθμου όπου η πράκτορας προσπαθεί να ισορροπήσει ατομικά.

Στο πρώτο παράδειγμα, που παρουσιάζεται περιληπτικά στο σχήμα 6.3, υποθέτουμε ότι οι τιμές των παραμέτρων είναι $\epsilon = 0.1$ και $\psi = 1$ για όλες τις πράκτορες¹⁷. Υποθέτουμε ακόμη ότι η γνώμη 1 κάποιας πράκτορας i έχει τιμή ίση με 0.6 και η γνώμη 2 τιμή ίση με 0.8. Η πράκτορας αυτή λοιπόν πιστεύει ότι ο Κωνσταντίνος Καραμανλής είναι κατάλληλος για πρωθυπουργός (γνώμη 1 = 0.6) αλλά ταυτόχρονα παραδέχεται ότι ο Γιώργος Παπανδρέου είναι καταλληλότερος (γνώμη 2 = 0.8). Προφανώς γνώμη ίση με 0 δηλώνει πλήρη ακαταλληλότητα και αντίθετα γνώμη ίση με 1 δηλώνει μέγιστη καταλληλότητα. Η αντίφαση αυτή αρχικά δε γίνεται αισθητή από το άτομο, όταν οι γνώμες αυτές δεν τίθενται υπό διαπραγμάτευση.

¹⁷ Οι πράκτορες-δράστες-άτομα των δραστοστρεφών μοντέλων προσομοίωσης δεν έχουν γένος.

Το άτομο (η πράκτορας) διαπραγματεύεται, συζητεί και τις δύο γνώμες ταυτόχρονα με τα άλλα άτομα. Όπως και στο μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης, κάθε πράκτορας επιδεικνύει *περιορισμένη εμπιστοσύνη* ως προς τις άλλες πράκτορες, δηλαδή επηρεάζεται από τις γνώμες των άλλων πρακτόρων, αν αυτές διαφέρουν από τη δική της λιγότερο από την τιμή του φράγματος εμπιστοσύνης ε . Μετά τη συζήτηση υιοθετεί το μέσο όρο των γνωμών των πρακτόρων με τις οποίες επικοινωνεί και οι οποίες έχουν γνώμες παρόμοιες με τη δική της, συμμορφώνεται δηλαδή με τις γνώμες των γύρω της προσπαθώντας να ισορροπήσει κοινωνικά ως εξής: σύμφωνα με την τιμή του φράγματος εμπιστοσύνης $\varepsilon = 0.1$ και την τιμή της γνώμης $1 = 0.6$ η πράκτορας επηρεάζεται μόνο από τις πράκτορες που έχουν γνώμη 1 παρόμοια με τη δική της, δηλαδή οι γνώμες τους βρίσκονται μέσα στο διάστημα εμπιστοσύνης $[0.6 - \varepsilon, 0.6 + \varepsilon]$, δηλαδή $[0.6 - 0.1, 0.6 + 0.1]$ ή $[0.5, 0.7]$. Η πράκτορας i αγνοεί τη γνώμη 1 όσων πρακτόρων έχουν γνώμη 1 μικρότερη από 0.5 και μεγαλύτερη από 0.7. Επηρεάζεται από τις πράκτορες που έχουν γνώμη 1 ανάμεσα στους αριθμούς 0.5 και 0.7, βρίσκει το μέσο όρο των γνωμών αυτών των πρακτόρων και τον υιοθετεί προσωρινά σε τη δική της γνώμη 1. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τη γνώμη 2, δηλαδή η πράκτορας υπολογίζει το μέσο όρο των γνωμών 2 των άλλων πρακτόρων που βρίσκονται μέσα στο διάστημα εμπιστοσύνης της $[0.8 - \varepsilon, 0.8 + \varepsilon]$, δηλαδή $[0.7, 0.9]$. Αυτό το τμήμα του αλγορίθμου του μοντέλου MER είναι ακριβώς ίδιο με τον αλγόριθμο του μοντέλου περιορισμένης εμπιστοσύνης, μόνο που εφαρμόζεται για δύο γνώμες και όχι για μία.

Ας υποθέσουμε ότι η γνώμη 1 έχει πλέον την τιμή 0.63 ενώ η γνώμη 2 την τιμή 0.88 (το μέσο όρο των γνωμών των άλλων πρακτόρων, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως). Ενώ και πριν την αλλαγή των δύο γνωμών υπήρχε μια αντίφαση μέσα στο άτομο, αυτό δε φαινόταν να το ενοχλεί. Μετά όμως τη μεταβολή των δύο γνωμών προς την ίδια κατεύθυνση, το άτομο εξετάζει εσωτερικά το γνωστικό του κόσμο και διαπιστώνει ότι αυτή η ταυτόχρονη μεταβολή προς τα πάνω των δύο γνωμών διαταράσσει την εσωτερική του ισορροπία. Δε μπορεί να μεταβάλλει ταυτόχρονα τις δύο γνώμες αυξάνοντάς τις και να αποδέχεται, έπειτα από την επίδραση των άλλων ατόμων ότι ο Καραμανλής είναι καταλληλότερος ως πρωθυπουργός αλλά και ότι και ο Παπανδρέου είναι επίσης καταλληλότερος απ' ότι πίστευε προηγουμένως. Αισθάνεται ενόχληση από τη γνωστική αυτή αντίφαση, η οποία γίνεται αισθητή μόνο μετά την αλλαγή των δύο γνωμών.

Λόγω αυτής της ενόχλησης το άτομο (η πράκτορας i) προσπαθεί να ισορροπήσει κοινωνικά. Το τμήμα του αλγορίθμου που εξασφαλίζει μια εσωτερική

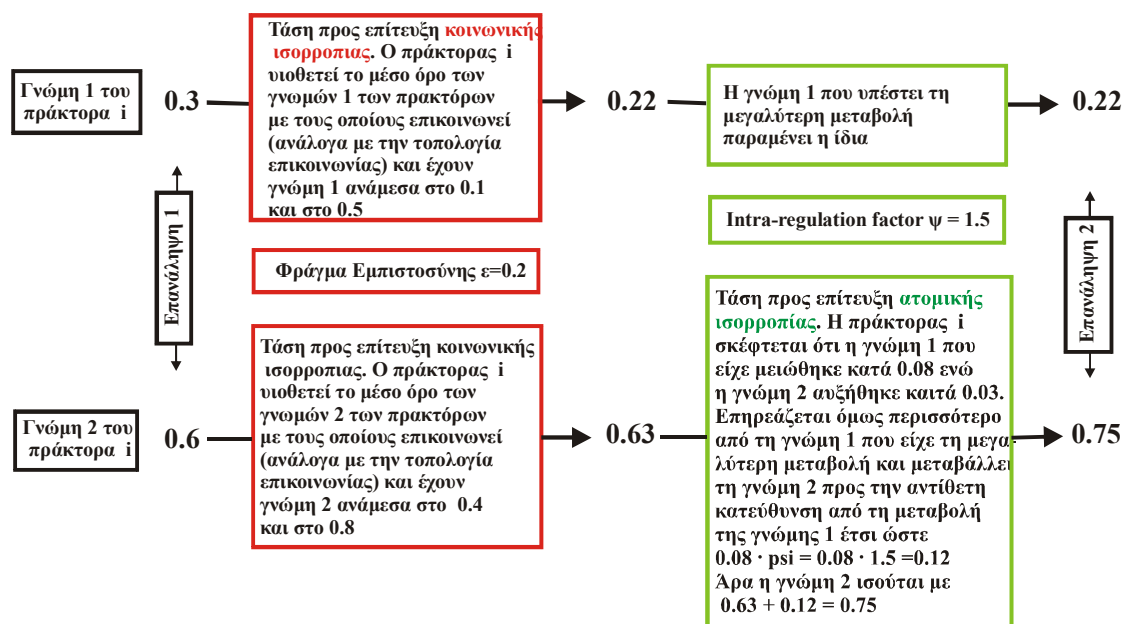
ρύθμιση στις δύο γνώμες που αντιφάσκουν έχει ως εξής: υποθέτουμε ότι το άτομο εξετάζει το μέγεθος της αλλαγής των δύο γνωμών και επικεντρώνεται και αποδέχεται τη γνώμη που είχε τη μεγαλύτερη μεταβολή. Στο παράδειγμά μας υποθέτουμε ότι η γνώμη 1 αυξήθηκε από 0.6 σε 0.63, άρα κατά 0.03 ενώ η γνώμη 2 από 0.8 σε 0.88 άρα κατά 0.08. Η γνώμη 2 λοιπόν γίνεται αποδεκτή και δεν τροποποιείται περεταίρω για τη συγκεκριμένη επανάληψη (iteration) ενώ η γνώμη 1 μειώνεται κατά $0.8 \cdot \psi = 0.8 \cdot 1 = 0.8$, δηλαδή η γνώμη 1 που είχε υποστεί τη μικρότερη μεταβολή από την κοινωνική επίδραση διορθώνεται. Αυτό συμβαίνει στην προσπάθεια του ατόμου να ισορροπήσει ατομικά. Το μέγεθος τη αλλαγής ισούται με το μέγεθος που μεταβλήθηκε η γνώμη 2, πολλαπλασιαζόμενο με τον συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ , ο οποίος στο συγκεκριμένο παράδειγμα υποθέσαμε ότι ισούται με 1. Η τελική γνώμη 1 γίνεται ίση με $0.63 - 0.08 = 0.55$. Στο σχήμα 6.3 μπορούμε να παρατηρήσουμε ολόκληρη τη διαδικασία της αλλαγής αυτής.

Η θετική μεταβολή της γνώμης 2, ότι δηλαδή η ο Γεώργιος Παπανδρέου είναι καταλληλότερος για πρωθυπουργός, αφού ήταν μεγαλύτερη από τη μεταβολή της γνώμης 1, επιδρά στο άτομο έτσι ώστε να πιστέψει ότι τελικά ο Κωνσταντίνος Καραμανλής δεν είναι τόσο κατάλληλος για πρωθυπουργός, όσο πίστευαν οι πράκτορες που τον επηρέαζαν, κι αυτό συμβαίνει στην προσπάθεια του ατόμου να ισορροπήσει εσωτερικά κι όχι μόνο κοινωνικά. Φυσικά η αναζήτηση ατομικής και κοινωνικής ισορροπίας είναι καθαρά θεωρητική και κατά συνέπεια η προσπάθεια του ατόμου να ισορροπήσει είναι μια δυναμική κατάσταση, πρόκειται δηλαδή για συνεχή τάση παρά για μια τελική ισορροπημένη κατάσταση, μιας και απόλυτη κοινωνική είτε ατομική ισορροπία δεν επιτυγχάνεται ποτέ. Προφανώς το σύστημα ορίζεται δυναμικά, μιας και βρίσκεται συνεχώς σε κίνηση, και το άτομο εξετάζει τη μεταβολή των γνωμών του μόνο μετά την κοινωνική επαφή. Υποθέτουμε ότι η οπτική του ατόμου είναι παρόμοια με του ρινόκερου, ο οποίος δε μπορεί να δει στατικές εικόνες παρά διακρίνει μόνο κινήσεις. Έτσι και το άτομο διαισθάνεται την εσωτερική αντίφαση μόνο όταν λαμβάνει χώρα κάποια αλλαγή των γνωμών του.

Το μέγεθος της διόρθωσης στη γνώμη του ατόμου που είχε τη μικρότερη μεταβολή, με στόχο την επίτευξη εσωτερικής ισορροπίας, ρυθμίζεται από το *συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ (intra-regulation factor)*. Προσθέτουμε δηλαδή ή αφαιρούμε στην τιμή της γνώμης με τη μικρότερη μεταβολή, το μέγεθος της μεταβολής της άλλης γνώμης πολλαπλασιασμένη με το ψ . Προφανώς ο συντελεστής ενδοατομικής ισορροπίας

ψ μπορεί να πάρει τιμές ανάμεσα στο 0 (καμιά εσωτερική ρύθμιση των γνώμων για το άτομο, η τάση για εσωτερική ισορροπία απουσιάζει) και το άπειρο. Παρόλα αυτά, οι τιμές του ψ που είναι πάνω από το 2 θεωρούνται ως μη ρεαλιστικές. Για $\psi=2$ διορθώνουμε την γνώμη με τη μικρότερη αλλαγή προσθέτοντας (ή αφαιρώντας) το διπλάσιο της μεγαλύτερης αλλαγής. Ήδη αυτό θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σαν υπερβολική αντίδραση. Για $\psi=1$ διορθώνουμε τη γνώμη προσθέτοντας (ή αφαιρώντας) ακριβώς με το μέγεθος της μεγαλύτερης αλλαγής και για $\psi=0.5$ με το μισό του μεγέθους της μεγαλύτερης αλλαγής.

Στη συνέχεια, στο σχήμα 6.4 δίνουμε άλλο ένα παράδειγμα, όπου οι τιμές των παραμέτρων είναι $\varepsilon=0.2$ και $\psi=1.5$ και η γνώμη 2 είναι αυτή που δέχεται τη μεγαλύτερη μεταβολή.



Σχήμα 6.4: Παρουσίαση ενός δεύτερου παραδείγματος του Αλγορίθμου του Μοντέλου MER για $\varepsilon=0.2$ και $\psi=1.5$

Στο παράδειγμα αυτό, η γνώμη 1 της πράκτορα i ισούται με 0.3 ενώ η γνώμη 2 με 0.6. Το φράγμα εμπιστοσύνης ε είναι ίσο με 0.2. Αυτό σημαίνει ότι μετά από συζήτηση με τις άλλες πράκτορες, η πράκτορας i επηρεάζεται μόνο από τις γνώμες 1 που είναι ανάμεσα στο $0.3 - \varepsilon = 0.1$ και στο $0.3 + \varepsilon = 0.5$. Από αυτές τις γνώμες 1 βγάζει το μέσο όρο και τον υιοθετεί σαν δική της γνώμη 1. Η κοινωνική συμμόρφωση λαμβάνει χώρα και για τη γνώμη 2, η πράκτορας i δηλαδή υιοθετεί το μέσο όρο των γνώμων 2 των πρακτόρων που επικοινωνούν με την πράκτορα i και έχουν γνώμη 2 ανάμεσα στους

αριθμούς $0.6 - \varepsilon = 0.4$ και $0.6 + \varepsilon = 0.8$. Υποθέτουμε ότι η «προσωρινή» γνώμη 1 της πράκτορας i ισούται με 0.22 και η «προσωρινή» γνώμη 2 ισούται με 0.63. Η γνώμη 1 λοιπόν μεταβλήθηκε κατά 0.08 προς τα κάτω ενώ η γνώμη 2 μεταβλήθηκε κατά 0.03 προς τα πάνω. Η πράκτορας στη συνέχεια επικεντρώνει την σκέψη της πάνω στη γνώμη που μεταβλήθηκε περισσότερο, τη γνώμη 1. Υιοθετεί λοιπόν τον αριθμό 0.22 σαν τελική γνώμη 1 για την επόμενη επανάληψη. Λόγω της ύπαρξης της αντιθετικής δομής των δύο γνωμών, κατόπιν σκέψης της ίδιας της πράκτορα, επειδή η γνώμη 1 που είχε τη μεγαλύτερη μεταβολή μειώθηκε κατά 0.08, αυξάνει τη γνώμη 2 (η οποία είχε ήδη αυξηθεί από τη τάση προς επίτευξη της κοινωνικής ισορροπίας) κατά 0.08 επί τον συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ που είναι ίσος με 1.5. Άρα η αύξηση ισούται με $0.08 \cdot \psi = 0.08 \cdot 1.5 = 0.12$ και η τελική γνώμη 2 (για την επόμενη επανάληψη) είναι ίση με $0.63 + 0.12 = 0.75$.

Όσο κουραστική κι αν είναι η μελέτη των δύο αυτών παραδειγμάτων με όλες τις τεχνικές λεπτομέρειες, άλλο τόσο είναι απαραίτητη για την κατανόηση του συνόλου των αποτελεσμάτων που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Μπορεί ο αλγόριθμος να έχει αρκετές λεπτομέρειες, που πρέπει να προσεχθούν ιδιαίτερα για την πλήρη κατανόησή του, στην πραγματικότητα όμως βασίζεται σε δύο απλές παραδοχές που λαμβάνουν χώρα σε κάθε κοινωνική αλληλεπίδραση, την τάση προς επίτευξη κοινωνικής ισορροπίας και στη συνέχεια το στοχασμό και την εσωτερική διόρθωση ώστε να επιτευχθεί και ατομική ισορροπία, μιας και οι κοινωνικές αλληλεπιδράσεις οδηγούν συχνά σε εσωτερικές αντιφάσεις.

Υπάρχει όμως περίπτωση, σύμφωνα με τον αλγόριθμο που μόλις παρουσιάστηκε, η γνώμη κάποιων πρακτόρων μετά από κάποια επανάληψη να μην ανήκει πλέον στο διάστημα $[0,1]$, η τιμή της δηλαδή να γίνει μικρότερη του μηδενός ή μεγαλύτερη του 1. Για την άρση αυτής της ανακολουθίας στις υποθέσεις του μοντέλου εφαρμόζουμε τη διαδικασία ανακλιμάκωσης.

6.4. Περιορίζοντας τις Γνώμες στο Διάστημα [0,1]: Διαδικασία Ανακλιμάκωσης

Ας υποθέσουμε ότι ο συντελεστής ενδοατομικής ισορροπίας ψ ισούται με 0.5 και η γνώμη 1 ενός πράκτορα είναι ίση με 0.98. Αν η μεταβολή της γνώμης 2 ισούται με 0.08 και η γνώμη 1 θα πρέπει να αυξηθεί, για λόγους διατήρησης της εσωτερικής ισορροπίας, το μέγεθος της αύξησης, σύμφωνα με τον αλγόριθμο του μοντέλου, ισούται με $0.08 \cdot \psi = 0.08 \cdot 0.5 = 0.04$. Άρα η γνώμη 1 θα γίνει ίση με $0.98 + 0.04 = 1.02$. Η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη του 1 και σε κάποιες περιπτώσεις, έπειτα από μερικές χιλιάδες επαναλήψεις, μπορεί να παρουσιαστούν πράκτορες με γνώμες ίσες με 10 ή μετά από εκατομμύρια επαναλήψεις ίσες με 100 κ.λπ. Μίας και έχουμε υποθέσει ότι οι γνώμες των πρακτόρων ανήκουν στο διάστημα [0,1], για να διευκολύνουμε την απεικόνιση και μελέτη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, εφαρμόζουμε μια διαδικασία που ονομάζουμε **ανακλιμάκωση (rescale)**, η οποία δεν τροποποιεί σε καμία περίπτωση τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Είναι σα να φωτοτυπούμε τις γνώμες χρησιμοποιώντας σμίκρυνση, π.χ. 95%. Το μέγεθος της ανακλιμάκωσης εξαρτάται από το πόσο έχουν διαφύγει οι τιμές των γνώμων από το διάστημα [0,1]. Η ανακλιμάκωση είναι τόσο, έτσι ώστε αν υπάρχουν γνώμες με μέγεθος μεγαλύτερο του 1, η μεγαλύτερη αυτές να γίνει ίση με 1 και αντίστοιχα αν υπάρχουν γνώμες με τιμή μικρότερη του 0, η μικρότερη από αυτές να γίνει ίση με το 0. Έχει ελεγχθεί για ένα μεγάλο αριθμό τιμών των παραμέτρων ότι όλα τα χαρακτηριστικά που θα μελετήσουμε (σχηματισμός ομάδων, ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες, προβλεψιμότητα κ.λπ.) καθώς και γενικότερα η δυναμική του μοντέλου δε μεταβάλλεται από τη διαδικασία αυτή.

Εν συντομία η διαδικασία ανακλιμάκωσης έχει ως εξής. Αν υπάρχει μία ή περισσότερες γνώμες που είναι μικρότερες του μηδενός βρίσκουμε την ελάχιστη και προσθέτουμε την απόλυτη τιμή της σε όλες τις άλλες γνώμες. Για παράδειγμα, αν η γνώμη με τη μικρότερη αρνητική τιμή ισούται με -0.05 προσθέτουμε σε όλες τις γνώμες την τιμή 0.05. Με τον τρόπο αυτό όλες οι γνώμες έχουν πλέον θετική τιμή ή μηδέν. Στη συνέχεια βρίσκουμε τη γνώμη με τη μεγαλύτερη τιμή και διαιρούμε όλες τις γνώμες με την τιμή αυτή, την οποία ονομάζουμε **παράγοντα ανακλιμάκωσης (scaling factor)**. Αν π.χ. η μεγαλύτερη γνώμη είναι ίση με 1.2, διαιρούμε όλες τις γνώμες με την τιμή 1.2. Μετά τις δύο αυτές διαιρέσεις η γνώμη με τη μεγαλύτερη τιμή, αν ήταν μεγαλύτερη του 1, είναι πλέον ίση με 1, η γνώμη με την μικρότερη τιμή, αν ήταν αρνητική, είναι ίση με 0

και όλες οι υπόλοιπες γνώμες ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$, δίχως να έχει αλλάξει ο συσχετισμός των τιμών τους και η δυναμική του συστήματος.

Η υλοποίηση της διαδικασίας αυτής στον αλγόριθμο του προγράμματος έχει ως εξής: υπολογίζουμε τη μέγιστη $= \max$ και την ελάχιστη $= \min$ γνώμη από τις γνώμες 1 και 2 όλων των πρακτόρων. Αν η $\min$ είναι αρνητική, μεγαλώνουμε όλες τις γνώμες κατά $-\min$. Η $\min$ είναι αρνητικός αριθμός, άρα προσθέτοντας το $-\min$ προσθέτουμε έναν θετικό αριθμό και όλες οι γνώμες 1 και 2 όλων των πρακτόρων γίνονται θετικές ή μηδέν. Κατόπιν υπολογίζουμε τον παράγοντα ανακλιμάκωσης, ο οποίος ισούται με το εύρος των γνωμών, και διαιρούμε όλες τις γνώμες των πρακτόρων με αυτό τον παράγοντα. Ο παράγοντας ανακλιμάκωσης για όλες οι περιπτώσεις που οι γνώμες δεν ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$ παρουσιάζεται στον πίνακα 5.1.

Εύρος των Γνωμών (Value's Range)	Παράγοντας Ανακλιμάκωσης (Scaling Factor)
$\max \geq 1$ και $\min < 0$	$\max - \min$
$\max > 1$ και $\min \geq 0$	$\max$
$\max \leq 1$ και $\min < 0$	$1 - \min$
$\max \leq 1$ και $\min \geq 0$	1

Πίνακας 6.1: Διαδικασία Ανακλιμάκωσης. Δίνεται ο παράγοντας ανακλιμάκωσης ανάλογα με το εύρος των τιμών των γνωμών 1 και 2 όλων των πρακτόρων.

Με τη διαδικασία ανακλιμάκωσης ολοκληρώθηκε η αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου του μοντέλου MER. Για την αποφυγή οποιασδήποτε παρερμηνείας που μπορεί να εμφανιστεί από την προηγούμενη περιγραφή του αλγορίθμου σε φυσική γλώσσα, στο παράρτημα 1 της παρούσας διατριβής παρουσιάζεται ο αλγόριθμος γραμμένος σε αυστηρά μαθηματική γλώσσα και στο παράρτημα 2 παρουσιάζεται ο ψευδοκώδικας του αλγορίθμου, ο οποίος περιλαμβάνει και τη διαδικασία ανακλιμάκωσης.

6.5. Ανάλυση των Παραμέτρων του Μοντέλου MER

Στη συνέχεια θα αναλυθεί ο ρόλος των δύο βασικών παραμέτρων του Μοντέλου MER, του φράγματος εμπιστοσύνης ε (bound of confidence) και του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ (intra-regulation factor) και θα παρουσιαστεί το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.

6.5.1. Ο Ρόλος του Φράγματος Εμπιστοσύνης ε

Όπως εξηγήθηκε και κατά την παρουσίαση του αλγορίθμου κάθε πράκτορας επιδεικνύει *περιορισμένη εμπιστοσύνη* ως προς τις άλλες πράκτορες, δηλαδή επηρεάζεται από τις γνώμες τους, αν αυτές διαφέρουν από τη δική της λιγότερο από την τιμή του φράγματος εμπιστοσύνης ε . Η μελέτη του μοντέλου περιορισμένης εμπιστοσύνης των Hegselmann και Krause (2002) έδωσε μια τυπολογία από διαμορφώσεις των τελικών καταστάσεων των προσομοιώσεων, όσον αφορά τον αριθμό των ομάδων των γνωμών των πρακτόρων, ο οποίος εξαρτάται από το μέγεθος του φράγματος εμπιστοσύνης ε . Οι τελική κατάσταση της προσομοίωσης μπορεί να είναι *συμφωνία* (*consensus*), *πόλωση* (*polarization*) ή *κατάτμηση* (*fragmentation*). Συμφωνία έχουμε όταν όλοι οι πράκτορες καταλήγουν να έχουν την ίδια γνώμη: αυτό συμβαίνει όταν το φράγμα εμπιστοσύνης ε είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το 0.3 περίπου. Πόλωση έχουμε όταν οι πράκτορες καταλήγουν να χωριστούν σε δύο ομάδες, όπου όλοι οι πράκτορες που ανήκουν στην ίδια ομάδα έχουν την ίδια γνώμη. Αυτό συμβαίνει για τιμές του ε περίπου ανάμεσα στους αριθμούς 0.1 και 0.3. Τέλος κατάτμηση έχουμε για τιμές μικρότερες του 0.1 και οι πράκτορες καταλήγουν σε μια κατάσταση όπου έχουν σχηματισθεί περισσότερες από δύο ομάδες.

Κατά την ανάλυση της επίδρασης των διαφόρων τοπολογιών στο μοντέλο πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών, στα προσεχή κεφάλαια της διατριβής, για τη διερεύνηση της επίδρασης του μεγέθους του φράγματος εμπιστοσύνης στις ιδιότητες του μοντέλου, κατ' αντιστοιχία με τα αποτελέσματα για το μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης, επιλέγουμε την διεξαγωγή των προσομοιώσεων και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων για $\varepsilon = 0.5, 1$ και 1.5 . Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, η επίδραση του μεγέθους του φράγματος εμπιστοσύνης ε στο Μοντέλο MER αφορά μόνο στον αριθμό των ομάδων των πρακτόρων που σχηματίζονται, και μάλιστα όχι για όλες τις τοπολογίες που θα διερευνηθούν, και δεν επηρεάζει σε καμία περίπτωση τη δυνατότητα ή αδυναμία πρόβλεψης και το χαοτικό χαρακτήρα του συστήματος.

6.5.2. Ο Ρόλος του Συντελεστή Ενδοατομικής Ισορροπίας ψ

Η δεύτερη παράμετρος του μοντέλου, ο *συντελεστής ενδοατομικής ισορροπίας (intra-regulation factor) ψ* , ποσοτικοποιεί τον παράγοντα διόρθωσης και συνεπώς την τάση για εσωτερική ισορροπία του ατόμου. Αναμένουμε διαφορετικά αποτελέσματα για διαφορετικές τιμές του ψ . Επιλέγουμε τρεις τιμές για το ψ : 0.5, 1 και 1.5. Η σημασία του μεγέθους του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ έχει ως εξής:

- **$\psi=0.5$.** Αντιστοιχεί σε πράκτορες που διορθώνουν σε μικρό βαθμό τις γνώμες τους και συνεπώς υποεκτιμούν την σημασία της εσωτερικής τους ισορροπίας.
- **$\psi=1$.** Για αυτή την τιμή του ψ οι πράκτορες διορθώνουν τη μία γνώμη τόσο όσο μεταβλήθηκε και η άλλη τους γνώμη μετά την κοινωνική τους αλληλεπίδραση. Η εσωτερική δομή αυτών των πρακτόρων δηλώνει ότι αποδίδουν ίση σημασία στην τάση για κοινωνική και εσωτερική ισορροπία.
- **$\psi=1.5$.** Οι πράκτορες διορθώνουν περισσότερο τη γνώμη τους, υπερεκτιμούν την σημασία της εσωτερικής τους ισορροπίας και αποδίδουν μικρότερη σημασία στην κοινωνική τους ισορροπία.

Όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, στις περισσότερες περιπτώσεις, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων διαφέρουν για τις τρεις αυτές τιμές του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ .

6.6. Αρχικό Προφίλ Γνωμών και Ακρίβεια των Πραγματοποιούμενων Μετρήσεων

Για όλες τις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε η ίδια αρχική συνθήκη του σχήματος 6.2. Οι διακόσιοι τυχαίοι αριθμοί, που ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$ και αποτελούν τις αρχικές γνώμες των πρακτόρων (αρχικό προφίλ γνωμών), παρήχθησαν από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών, με την εντολή *randomize* της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic. Κάθε ένας έχει επτά δεκαδικά ψηφία. Για παράδειγμα η αρχική γνώμη 1 της πράκτορα 1 ισούται με 0.7055475, η γνώμη 2 με 0.533424, η γνώμη 1 της πράκτορα 2 με 0.5795186 και η γνώμη 2 με 0.2895625. Έχει εξεταστεί επιμελώς ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή είναι ακριβώς ίδια αν για τις αρχικές γνώμες των πρακτόρων χρησιμοποιηθούν τυχαίοι αριθμοί με 1, 2, 100 ή και 1000 δεκαδικά ψηφία.

Προφανώς όμως, αυτό ισχύει μόνο για τις αρχικές γνώμες, μιας και ο αριθμός των δεκαδικών ψηφίων που χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή των πράξεων κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου έχει επίδραση στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επειδή, σύμφωνα με τον αλγόριθμο, διενεργούνται όλων των ειδών οι πράξεις, ακόμη και διαιρέσεις. Στο πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε, η ακρίβεια των διενεργούμενων πράξεων έφτανε μέχρι το εικοστό όγδοο δεκαδικό ψηφίο, άρα κάθε γνώμη που προκύπτει σε οποιαδήποτε επανάληψη μετά την αρχική φτάνει σε ακρίβεια τα 28 δεκαδικά ψηφία. Αν επιλέξουμε διαφορετική ακρίβεια, π.χ. 100 ή 200 δεκαδικά ψηφία, αυτό έχει κάποια μικρή επίδραση στα αποτελέσματα, κυρίως όμως ποσοτική και όχι ποιοτική. Αν όμως η ακρίβεια των υπολογισμών ισούται με 1, 2, 3 ή 4 δεκαδικά ψηφία, τα αποτελέσματα είναι αρκετά διαφορετικά. Αξιοσημείωτο είναι ότι το χάος εμφανίζεται μετά την ύπαρξη του τέταρτου δεκαδικού ψηφίου. Η συγκεκριμένη διερεύνηση του ρόλου της ακρίβειας στη διεξαγωγή των υπολογισμών υπερβαίνει τα όρια της παρούσας διατριβής και μάλιστα αποτελεί αντικείμενο μιας άλλης διατριβής, με επιβλέποντα καθηγητή τον κ. Κατερέλο.

Για να ελεγχθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων και των ιδιοτήτων του μοντέλου που παρουσιάζονται και να επιβεβαιωθεί ότι δεν έτυχε να εμφανιστούν μόνο σε μια προσομοίωση, χρησιμοποιώντας τη συγκεκριμένη αρχική συνθήκη, διενεργήθηκε μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων για κάθε περίπτωση (για κάθε τιμή των ψ και ε), χρησιμοποιώντας διαφορετικές τυχαίες αρχικές συνθήκες. Σε όλες τις περιπτώσεις τα αποτελέσματα ποιοτικά ήταν ίδια, και ποσοτικά οι διαφορές ήταν μηδενικές ή πολύ μικρές και πάντως σε κάθε περίπτωση αμελητέες. Όσες φορές κρίνεται αναγκαίο γίνεται μνεία για τον αριθμό και το είδος των προσομοιώσεων που έγιναν για να πιστοποιήσουν την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων.

6.7. Παρουσίαση του Προγράμματος που Χρησιμοποιήθηκε για την Παραγωγή των Αποτελεσμάτων

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάσαμε αναλυτικά τον αλγόριθμο του μοντέλου MER. Στη συνέχεια, το πρώτο ερώτημα που τίθεται για τον προγραμματισμό ενός μοντέλου προσομοίωσης, είναι ποια γλώσσα προγραμματισμού να χρησιμοποιηθεί ή ποιά είναι η επιλογή του κατάλληλου προγράμματος για την υλοποίηση του αλγορίθμου. Στο εμπόριο διατίθενται πολλά έτοιμα προγράμματα για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων, όπως η NetLogo, το Anylogic κ.α. Το πλεονέκτημα τους είναι ότι

απαιτούν λίγες γραμμές κώδικα για την υλοποίηση πλήθους τυποποιημένων αλγορίθμων, μιας και περιέχουν πολλές έτοιμες υπορουτίνες. Ωστόσο απαιτούν μεγάλη μνήμη στον υπολογιστή, κάτι που όμως δεν αποτελεί πλέον πρόβλημα με τις σημερινές δυνατότητες των υπολογιστών και επιπροσθέτως, λόγω της ειδικής τους κατασκευής, δεν μπορούν να περιγράψουν όλα τα συστήματα διακριτών γεγονότων. Για το λόγο αυτό στα πακέτα αυτά παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη να αναπτύσσει τις δικές του υπορουτίνες σε κάποια από τις γλώσσες προγραμματισμού γενικής χρήσεως (συνήθως στην FORTRAN).

Όσον αφορά στον προγραμματισμό για την υλοποίηση ενός μοντέλου προσομοίωσης, σύμφωνα με τον Axelrod (1997b), πρέπει να επιτευχθούν τρεις τουλάχιστον στόχοι: *εγκυρότητα (validity)*, *ευχρηστία (usability)* και *δυνατότητα επέκτασης (extendibility)*.

Εγκυρότητα του προγράμματος σημαίνει ότι το πρόγραμμα εκτελεί επακριβώς τις υποθέσεις και τον αλγόριθμο του μοντέλου. Αυτό το είδος εγκυρότητας ονομάζεται *εσωτερική εγκυρότητα (internal validity)*. Εάν το ίδιο το μοντέλο αποτελεί ή όχι μια ακριβή αναπαράσταση του «πραγματικού» κόσμου είναι ένα άλλο είδος εγκυρότητας που δεν εξετάζεται στο σημείο αυτό. Η επίτευξη της εσωτερικής εγκυρότητας είναι δυσκολότερη από ότι φαίνεται με μια πρώτη ματιά, μιας και ένα απροσδόκητο αποτέλεσμα μπορεί να είναι συνέπεια του ίδιου του μοντέλου ή απλώς αντανάκλαση ενός λάθους στον προγραμματισμό. Μερικές φορές μάλιστα η επιβεβαίωση ότι το πρόγραμμα αναπαριστά σωστά τις προϋποθέσεις του μοντέλου μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερη εργασία από την κατασκευή του ίδιου του προγράμματος.

Η *ιδιότητα της ευχρηστίας* αφορά στη δυνατότητα του προγράμματος να επιτρέψει στον κατασκευαστή του μοντέλου, αλλά και στους ερευνητές που ακολουθούν, να τρέξουν το πρόγραμμα, να ερμηνεύσουν τα εξαγόμενά του και να κατανοήσουν πως λειτουργεί. Στα πλαίσια της δραστοστρεφούς μοντελοποίησης, για κάθε μοντέλο παράγεται συνήθως μια σειρά από προγράμματα, όπου κάθε εκδοχή (version) μπορεί να διαφέρει από τις υπόλοιπες σε ένα ή περισσότερα σημεία. Η καταγραφή όλων αυτών των διαφορών των προγραμμάτων για να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον από τον κατασκευαστή του προγράμματος και τους υπολοίπους ερευνητές δεν είναι καθόλου απλή υπόθεση.

Η *δυνατότητα επέκτασης* αφορά στο να είναι εύκολο στο μελλοντικό χρήστη του προγράμματος να προσαρμόσει το πρόγραμμα έτσι, ώστε να διεξάγει νέες προσομοιώσεις τροποποιώντας κάποιες από τις υποθέσεις του μοντέλου.

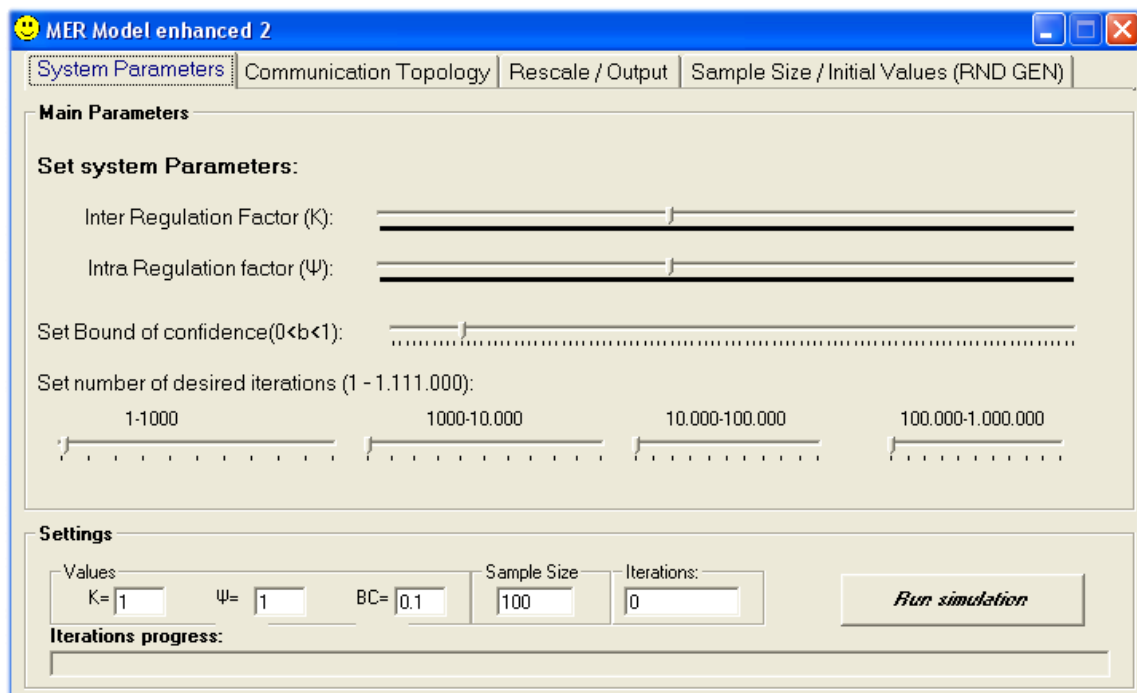
Όσον αφορά στο μοντέλο MER, κανένα από τα έτοιμα προγράμματα δεν προσφερόταν για την ανάπτυξη του αλγορίθμου, λόγω της μεγάλης εξειδίκευσής του και την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου σε ένα κυρίως σημείο. Κατόπιν κοπιώδους εργασίας, από κοινού με τον κ. Κατερέλο κατασκευάσαμε, στη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic, το πρόγραμμα που υλοποίησε τον αλγόριθμο. Το πρόγραμμα αυτό διεξάγει αποκλειστικά τις προσομοιώσεις του μοντέλου MER. Δυστυχώς δε ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί έτοιμη οποιαδήποτε ρουτίνα και αναγκαστικά γράφτηκε πρωτότυπος κώδικας για κάθε τυποποιημένη λεπτομέρεια, όπως για παράδειγμα η τοπολογία του κυψελοειδούς αυτόματου ή και άλλη τοπολογία, που στα συνήθη πακέτα προσομοίωσης αρκεί το πάτημα ενός κουμπιού για την υλοποίησή της. Αυτό είχε όμως και το πλεονέκτημα ότι μπορέσαμε να υλοποιήσουμε όλες τις παραλλαγές του αλγόριθμου που θελήσαμε, όσο εξειδικευμένες κι αν ήταν, ενώ αν είχαμε χρησιμοποιήσει κάποιο τυποποιημένο πακέτο δεν θα είχαμε αυτή τη δυνατότητα. Το πρόγραμμα εξελισσόταν συνεχώς τα τελευταία πέντε χρόνια, στη διάρκεια των οποίων δημιουργήσαμε, είτε από κοινού με τον κ. Κατερέλο είτε ξεχωριστά, μερικές δεκάδες παραλλαγές του, ανάλογα με το κοινωνικό φαινόμενο που επιθυμούσαμε να διερευνήσουμε.

Για τον έλεγχο της εγκυρότητας του προγράμματος πραγματοποιήσαμε πολλαπλούς ελέγχους, κυρίως κατά την κατασκευή των επεκτάσεων του μοντέλου, δηλαδή προσθέταμε μια ιδιότητα των πρακτόρων ή μια προϋπόθεση και τρέχαμε το πρόγραμμα με τις τιμές των παραμέτρων να λαμβάνουν ακραίες τιμές, είτε δηλαδή τις μεγαλύτερες είτε τις μικρότερες δυνατές. Στις ειδικές περιπτώσεις ήταν εύκολο να μαντέψουμε τα αποτελέσματα και πράγματι το πρόγραμμα τα παρήγαγε όπως τα αναμέναμε, εκτός από μία ή δύο φορές που ανακαλύφθηκε από ένα μικρό λάθος στον κώδικα του προγράμματος, που διορθώθηκε στη συνέχεια, το οποίο όμως ήταν επουσιώδες και δεν αφορούσε τα κυρίως αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή.

Δυστυχώς, όσον αφορά στην *ευχρηστία του προγράμματος*, προς το παρόν τουλάχιστον, δεν είναι η καλύτερη δυνατή. Αυτό οφείλεται στο ότι δε χρησιμοποιήθηκε κάποιο έτοιμο πακέτο που να είναι εύκολα κατανοητό σε άλλους ερευνητές, αλλά και στη δυσκολία των τεχνικών λεπτομερειών κάποιων τμημάτων του αλγορίθμου. Για τη διευκόλυνση του αναγνώστη, στο παράρτημα 2 παρουσιάζεται ο ψευδοκώδικας του προγράμματος και στο παράρτημα 3 το πλήρες πρόγραμμα, με όλες τις εντολές, στη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic. Χρειάζεται όμως πάρα πολύ κόπο και υπομονή

για να κατασκευάσει κάποιος άλλος ερευνητής ένα πρόγραμμα και να υλοποιήσει το μοντέλο MER ή απλώς να χρησιμοποιήσει το υπάρχον πρόγραμμα και να κατανοήσει και ερμηνεύσει τα αποτελέσματα που μπορούν να προκύψουν. Το αυτό ισχύει και για τη δυνατότητα επέκτασης του προγράμματος, δηλαδή να συμπεριληφθούν πιθανές νέες υποθέσεις ή να τροποποιηθούν οι ήδη υπάρχουσες.

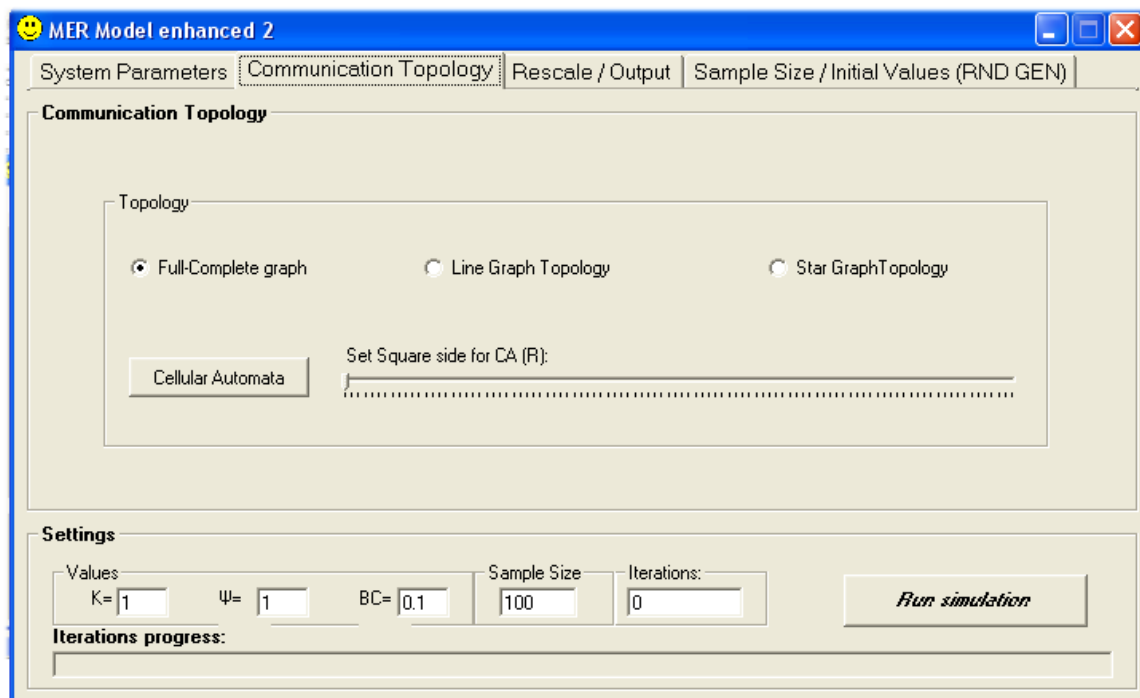
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά μενού του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των αποτελεσμάτων της παρούσας διατριβής. Στην εικόνα 6.1 παρουσιάζεται το μενού Παράμετροι του Συστήματος (System Parameters).



Εικόνα 6.1: Μενού που καθορίζει τις τιμές των παραμέτρων του Μοντέλου MER

Εδώ μπορεί ο χρήστης του προγράμματος να καθορίσει τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου MER, δηλαδή την τιμή του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ (intraregulation factor), του φράγματος εμπιστοσύνης ε (bound of confidence) και του αριθμού των επαναλήψεων (number of desired iterations) που επιθυμεί να πραγματοποιηθούν.

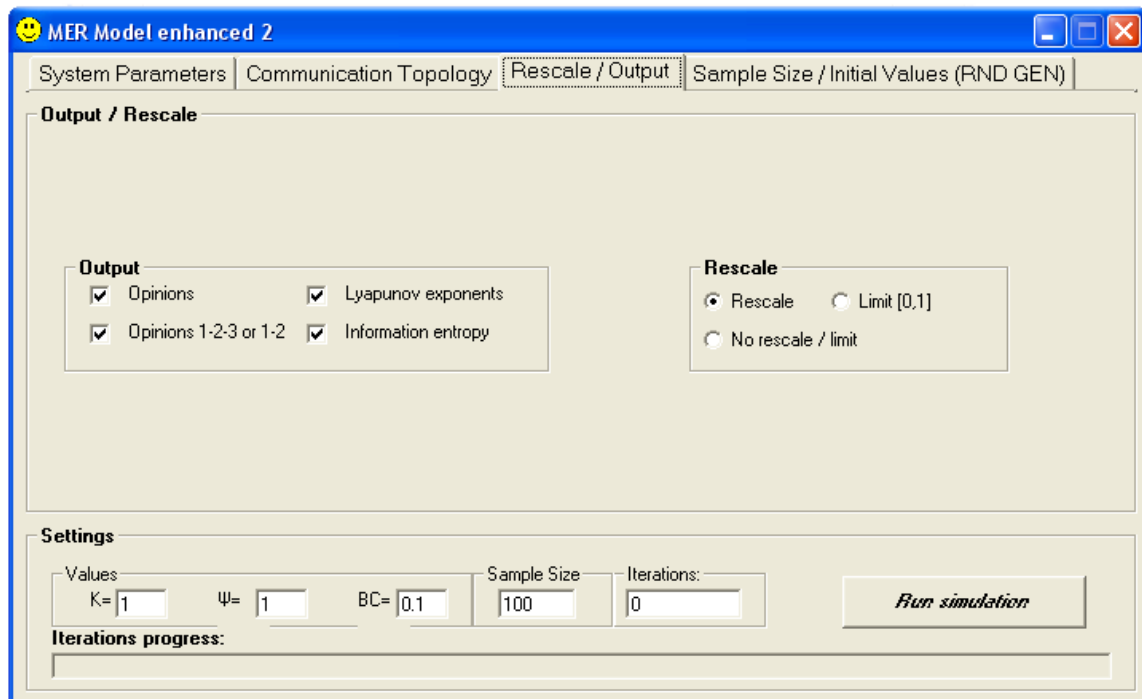
Στην εικόνα 6.2 παρουσιάζεται το μενού των τοπολογιών επικοινωνίας των πρακτόρων.



Εικόνα 6.2: Μενού που καθορίζει τη χρησιμοποιούμενη τοπολογία επικοινωνίας των πρακτόρων.

Μπορεί ο χρήστης του προγράμματος να διαλέξει μεταξύ των τοπολογιών του πλήρους γράφου (complete graph topology), της τοπολογίας γραμμής (line graph topology), της τοπολογίας άστρο (star graph topology) και της τοπολογίας του κυψελοειδούς αυτόματου (cellular automata topology). Υπάρχει η δυνατότητα να ορίσει επίσης το μέγεθος της περιοχής Moore (set square side for CA) πάνω στο κυψελοειδές αυτόματο. Στο πρόγραμμα υπάρχουν ακόμη ένας αριθμός τοπολογιών που μπορούν να εφαρμοστούν στο μοντέλο MER και οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν και να τρέξουν μόνο επεμβαίνοντας απ' ευθείας στον κώδικα του προγράμματος και όχι από το παραπάνω μενού.

Στην εικόνα 6.3 παρουσιάζεται το μενού που μας επιτρέπει να αποφασίσουμε αν το πρόγραμμα θα υπολογίσει και θα μας δώσει όλα τα εξαγόμενα και αν θα εφαρμόσει τη διαδικασία ανακλιμάκωσης (rescale).

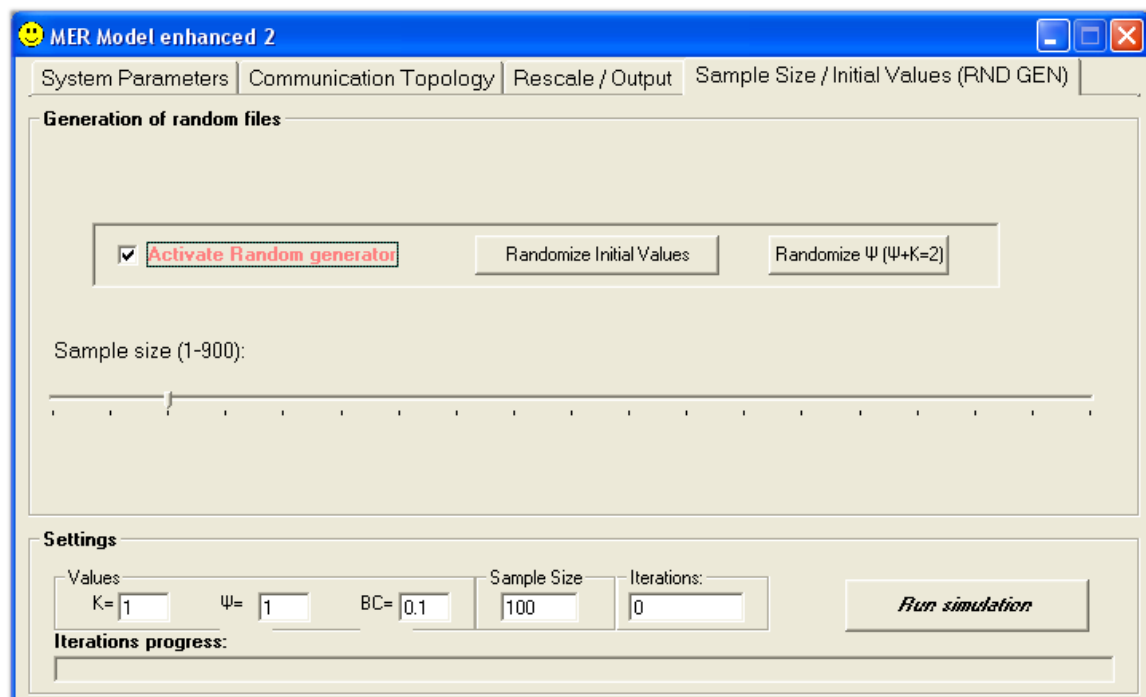


Εικόνα 6.3: Μενού που μας επιτρέπει να αποφασίσουμε αν το πρόγραμμα θα υπολογίσει και θα μας δώσει όλα τα εξαγόμενα και αν θα εφαρμόσει τη διαδικασία ανακλιμάκωσης (rescale).

Συγκεκριμένα, το μενού αυτό μας επιτρέπει να αποφασίσουμε αν θέλουμε το πρόγραμμα να υπολογίσει τις γνώμες (opinions) των πρακτόρων, τον εκθέτη Lyapunov (Lyapunov exponent) ή την εντροπία της πληροφορίας (information entropy). Η επιλογή αυτή επιτρέπει το «τρέξιμο» του προγράμματος για κάποιες συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων, δίχως τον υπολογισμό του συνόλου των εξαγομένων. Για παράδειγμα μπορεί να μην επιθυμεί ο χρήστης του προγράμματος τον υπολογισμό του εκθέτη Lyapunov ή της εντροπίας της πληροφορίας. Με τον τρόπο αυτό ο ηλεκτρονικός υπολογιστής διεξάγει λιγότερους υπολογισμούς και ολοκληρώνει την προσομοίωση σε σημαντικά λιγότερο χρόνο. Επίσης το παρόν μενού επιτρέπει την εφαρμογή της διαδικασίας ανακλιμάκωσης (rescale) ή την επιλογή της διαδικασίας αποκοπής (truncate) των αριθμών που βρίσκονται εκτός του διαστήματος $[0,1]$, έτσι ώστε να μετατραπούν σε 0 (όσοι είναι μικρότεροι του 0) ή 1 (όσοι είναι μεγαλύτεροι του 1) (επιλογή Limit $[0,1]$). Αυτή αποτέλεσε την αρχική επιλογή εμού και του κ. Κατερέλου, πριν την εφαρμογή της διαδικασίας ανακλιμάκωσης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με την επιλογή της αποκοπής των γνωμών που δεν ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$ δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Είναι παρόμοια με αυτά της διαδικασίας ανακλιμάκωσης για τις αρχικές επαναλήψεις, ενώ από κάποια επανάληψη και έπειτα, όλες οι γνώμες γίνονται ξαφνικά

ίσες με 0 ή με 1 και το σύστημα τερματίζει σε μια σταθερή τελική κατάσταση, που όμως δεν αποτελεί την αληθινή δυναμική του. Μπορούμε ακόμη να επιλέξουμε να μη χρησιμοποιήσουμε καμία από τις δύο διαδικασίες και να επιτρέψουμε στις γνώμες να πάρουν τιμές μικρότερες του μηδενός και μεγαλύτερες του 1. Τότε μπορεί οι γνώμες κάποιων πρακτόρων να λάβουν πολύ μεγάλες θετικές τιμές ή πολύ μικρές αρνητικές τιμές. Η επιλογή αυτή επιτρέπει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα που προκύπτουν έπειτα από την εφαρμογή της διαδικασίας ανακλιμάκωσης και τον έλεγχο της μεταβολής ή όχι της δυναμικής του συστήματος.

Στην εικόνα 6.4 παρουσιάζεται το μενού που μας επιτρέπει να παράγουμε τις αρχικές τυχαίες γνώμες.



Εικόνα 6.4: Μενού που μας επιτρέπει να παράγουμε τυχαίες αρχικές γνώμες.

Αν ενεργοποιήσουμε τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών (activate random generator) μπορούμε επιλέγοντας την εντολή παραγωγής τυχαίων αρχικών τιμών των γνωμών (randomize initial values) να παράγουμε τυχαίες αρχικές γνώμες για τους πράκτορες. Μπορούμε ακόμη να παράγουμε τυχαίες τιμές για το συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ (randomize ψ), έτσι ώστε κάθε πράκτορας να έχει διαφορετική τάση για εσωτερική ισορροπία. Τα αποτελέσματα της επιλογής αυτής παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, ξεπερνούν όμως τα όρια της παρούσας διατριβής.

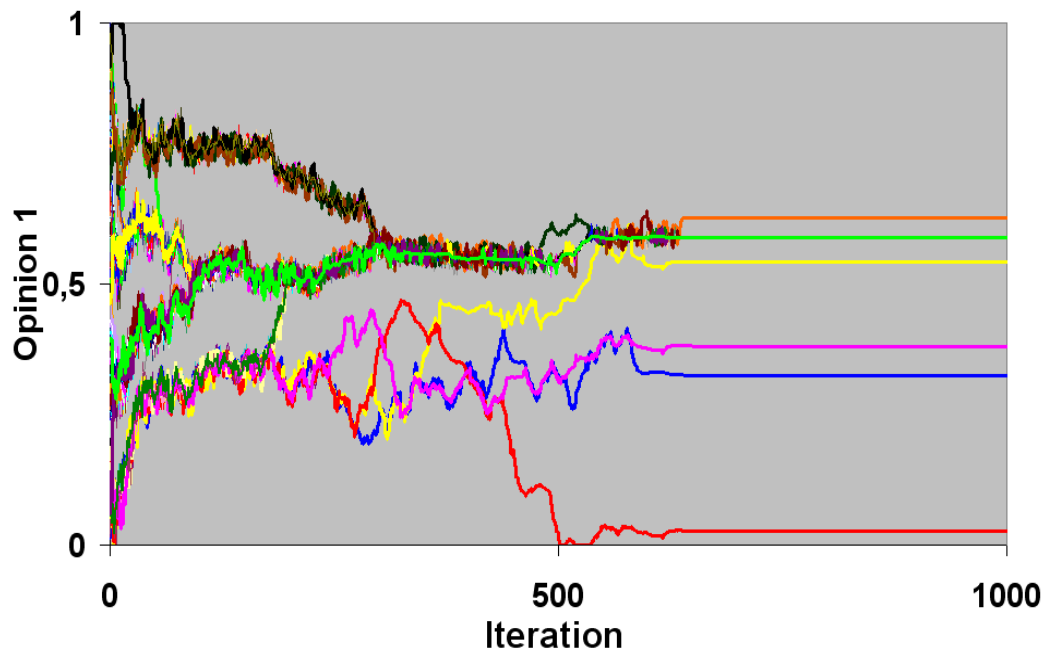
Υπάρχει ακόμη τη δυνατότητα να επιλεγεί το πλήθος των πρακτόρων για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης (sample size). Η επίδραση του αριθμού των πρακτόρων

δεν έχει διερευνηθεί ακόμη, λόγω έλλειψης ικανής υπολογιστικής δύναμης. Κάποιες ενδεικτικές προσομοιώσεις έχουν διενεργηθεί ως τώρα όπου ο αριθμός των πρακτόρων φθάνει τους 250. Με ακόμη περισσότερους πράκτορες το πρόγραμμα γίνεται εξαιρετικά αργό. Θα θέλαμε να διεξάγουμε μια προσομοίωση με 10.000 πράκτορες, για να μελετήσουμε αν ο ελκυστής του συστήματος είναι σύνολο φράκταλ, όπως θα αναλυθεί και στην παράγραφο 9.3.3, αλλά κάτι τέτοιο είναι προς το παρόν αδύνατο, ακόμη και τους ισχυρότερους υπολογιστές που υπάρχουν ως αυτή τη στιγμή.

Όσον αφορά το είδος των αποτελεσμάτων, όπως φαίνεται και στον κώδικα του προγράμματος, που παρουσιάζεται στο παράρτημα 3, οι γνώμες των πρακτόρων που παράγει το πρόγραμμα καθώς και οι χαοτικοί δείκτες, όπως οι εκθέτες Lyapunov και η εντροπία της πληροφορίας, καταγράφονται σε ένα ξεχωριστό αρχείο κειμένου (.txt). Στη συνέχεια, για την απεικόνιση και διερεύνηση των αποτελεσμάτων ανοίγονται τα αρχεία αυτά με το πρόγραμμα Microsoft Excel. Με το τελευταίο πρόγραμμα έχει παραχθεί και το σύνολο των σχημάτων της παρούσας διατριβής. Τα ίδια αποτελέσματα μπορούν να απεικονιστούν στο χώρο των τριών διαστάσεων σε γραφήματα που έχουν παραχθεί με το πρόγραμμα Statistica, δεν είναι εμφανή όμως στο χώρο των δύο διαστάσεων και για το λόγο αυτό δεν έχουν συμπεριληφθεί στην παρούσα διατριβή, ενώ έχουν χρησιμοποιηθεί σε ζωντανές παρουσιάσεις του μοντέλου, όπου υπάρχει η δυνατότητα περιστροφής του σχήματος, έτσι ώστε να μπορέσει αυτό να γίνει αντιληπτό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

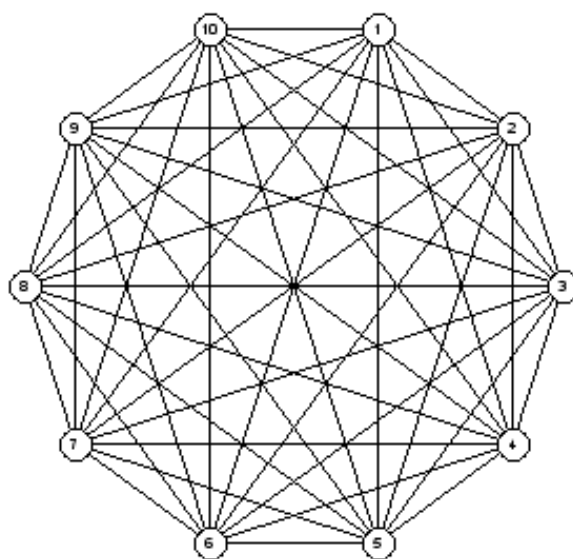
ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MER ΜΕ ΤΗΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΠΛΗΡΟΥΣ ΓΡΑΦΟΥ



Δυναμική εξέλιξη των γνώμων των ατόμων μιας τεχνητής κοινωνίας σύμφωνα με το Μοντέλο Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών, όταν οι πράκτορες έχουν πλήρη επικοινωνία. Η εξέλιξη αυτή είναι εφήμερα χαοτική, δηλαδή ντετερμινιστική και μη προβλέψιμη, τερματίζει όμως σε μια στατική τελική κατάσταση.

7.1. Περιγραφή της Τοπολογίας του Πλήρους Γράφου

Για να διερευνήσουμε τις συνέπειες του μοντέλου και την επίδραση των παραμέτρων σε αυτό, η πρώτη τοπολογία της επικοινωνίας που μελετούμε είναι η «μη ύπαρξη» τοπολογία, δηλαδή η τοπολογία ενός πλήρους γράφου. Κάθε μια πράκτορας επικοινωνεί και έχει τη δυνατότητα να αλληλεπιδράσει με όλες τις άλλες πράκτορες. Στο σχήμα 6.1 παρουσιάζεται ένας πλήρης γράφος με 10 κόμβους. Για λόγους ευκρινείας του σχήματος δεν παρουσιάζουμε ένα πλήρη γράφο με 100 κόμβους, που να αντιστοιχεί στις 100 πράκτορες του Μοντέλου MER).



Εικόνα 7.1. Πλήρης Γράφος με 10 κόμβους

Κάθε κόμβος του γράφου αντιστοιχεί σε μία πράκτορας και κάθε ακμή του γράφου δηλώνει δυνατότητα επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο πρακτόρων/κόμβων. Στον πλήρη γράφο κάθε πράκτορας επικοινωνεί με όλους τους άλλους. Βεβαίως, όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, κατά την παρουσίαση του αλγορίθμου του μοντέλου MER, η ύπαρξη του φράγματος εμπιστοσύνης ε θέτει περιορισμούς στις αλληλεπιδράσεις. Κάθε μια πράκτορας, μολονότι είναι ενήμερη (υπάρχει επικοινωνία) για τις γνώμες όλων των άλλων πρακτόρων, επηρεάζεται μόνο από τις γνώμες εκείνων που έχουν γνώμη «παρόμοια» με την δική της, που διαφέρουν δηλαδή από τη δική της λιγότερο από το φράγμα εμπιστοσύνης ε . Μπορούμε να θεωρήσουμε ως παράδειγμα ότι οι πράκτορες αντιστοιχούν σε ειδικούς πάνω σε κάποιο θέμα, όπως ο πληθωρισμός ή τα επιτόκια. Στην περίπτωση αυτή όλοι όσοι είναι ειδικοί στα συγκεκριμένα θέματα γνωρίζουν τις γνώμες όλων των άλλων. Με αυτή την υπόθεση,

την δυνατότητα επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης όλων των πρακτόρων μεταξύ τους, προχωρούμε στη διερεύνηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

7.2. Παρουσίαση των Αποτελεσμάτων της Προσομοίωσης

Όπως αναλύσαμε στο κεφάλαιο 5, θα μελετήσουμε και θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τρεις τιμές 0.5, 1 και 1.5 του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ , σε συνδυασμό με τρεις τιμές 0.1, 0.2 και 0.3 του φράγματος εμπιστοσύνης ε .

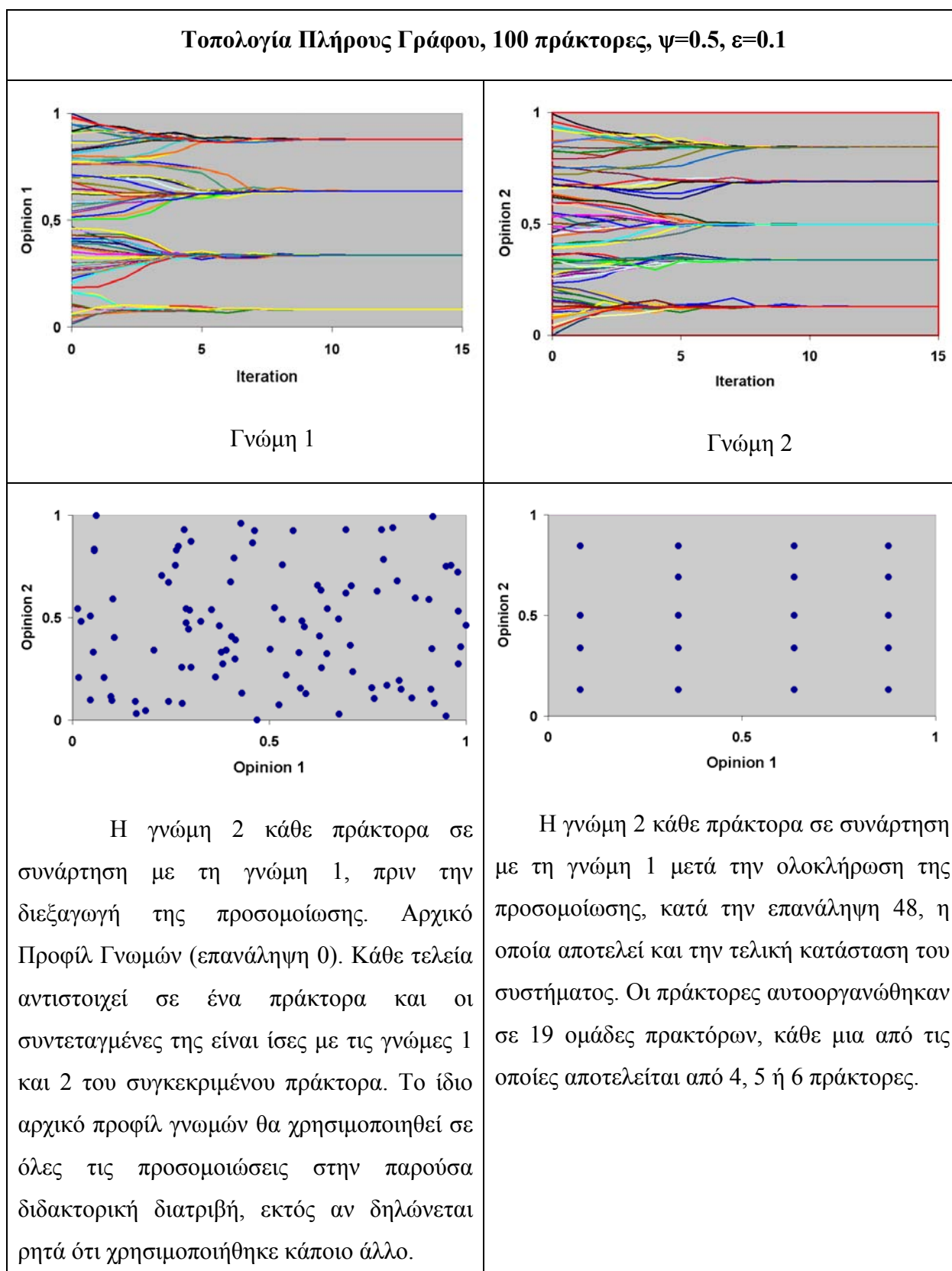
Δυστυχώς, λόγω της ύπαρξης δύο γνώμων για κάθε μια από τις 100 πράκτορες, η ταυτόχρονη απεικόνιση της εξέλιξης και των δύο γνώμων είναι δυνατή μόνο από διαγράμματα που ανήκουν στο χώρο των τριών διαστάσεων, όπου στις δύο διαστάσεις παρουσιάζονται οι δύο γνώμες και την τρίτη διάσταση καταλαμβάνει ο χρόνος, δηλαδή οι επαναλήψεις (iterations). Τέτοια διαγράμματα είναι δυνατό να κατασκευαστούν από κάποια προγράμματα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπως το Statistica, δε είναι όμως δυνατό να παρουσιαστούν στο χώρο των δύο διαστάσεων, χωρίς να χαθούν ουσιώδεις λεπτομέρειές τους. Η παρουσίασή τους είναι δυνατή μόνο από υπολογιστή, ο οποίος θα είναι σε θέση να πραγματοποιεί περιστροφή του σχήματος έτσι, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα παρατήρησης της εξέλιξης του συστήματος. Για τον παραπάνω λόγο στην παρούσα διατριβή, όπου είναι δυνατή μόνο η παράθεση διαγραμμάτων στο χώρο των δύο διαστάσεων, θα παραθέτουμε ξεχωριστά την εξέλιξη της κάθε γνώμης ως προς το χρόνο, δηλαδή ως προς τις επαναλήψεις του αλγόριθμου (iterations) (π.χ. πρώτη γραμμή πίνακα 7.1), καθώς επίσης θα παρουσιάζεται κάθε φορά και ένα διάγραμμα που θα συνδέει τις δύο γνώμες και θα αφορά κάποια συγκεκριμένη επανάληψη, σε μια φωτογραφία του συστήματος μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή (π.χ. δεύτερη γραμμή του πίνακα 7.1). Στο διάγραμμα αυτό συνήθως θα απεικονίζεται η τελική κατάσταση του συστήματος, για τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που υπάρχει τέτοια τελική κατάσταση, ή όταν το σύστημα δε φτάνει σε τελική κατάσταση, κάποια προχωρημένη χρονική στιγμή, αρκετά μετά τις αρχικές επαναλήψεις, στις οποίες λαμβάνει χώρα η αυτοοργάνωση των γνώμων σε ομάδες.

Στις επόμενες τρεις παραγράφους και στους πίνακες 7.1 ως 7.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των συνδυασμών μεταξύ των επιλεγμένων τιμών των ψ και ε . Η παρουσίαση χωρίζεται σε παραγράφους με βάση τις τιμές του συντελεστή ενδοατομικής

ισορροπίας ψ , μιας και η επίδρασή του στο σύστημα είναι καθοριστική όσον αφορά τη δυναμική του και την ιδιότητα της προβλεψιμότητας, ενώ το φράγμα εμπιστοσύνης ε επιδρά, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, κυρίως στον αριθμό των σχηματιζόμενων ομάδων.

7.2.1. Πρώτη περίπτωση, $\psi=0.5$: Οι Διαταραχές Είναι Μικρές

Η πρώτη προσομοίωση που θα εξεταστεί είναι για συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας $\psi=0.5$ και φράγμα εμπιστοσύνης $\varepsilon=0.1$. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα 7.1.



Πίνακας 7.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, Τοπολογία Πλήρους Γράφου, 100 πράκτορες, $\psi=0.5$, $\varepsilon=0.1$.

Στην πρώτη γραμμή του πίνακα 7.1 παρατηρούμε ότι η δυναμική συμπεριφορά και των δύο γνωμών είναι παρόμοια με αυτή του Μοντέλου Περιορισμένης Εμπιστοσύνης των Heggelmann και Krause για φράγμα εμπιστοσύνης $\varepsilon=0.1$ (βλέπε πίνακα 3.5 στην παρούσα διατριβή). Θυμίζουμε ότι για αυτή τη μικρή τιμή του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας $\psi=0.5$, η τάση των πρακτόρων να ισορροπήσουν κοινωνικά είναι πιο ισχυρή από την τάση τους να ισορροπήσουν ατομικά. Παρατηρούμε όμως ότι στο Μοντέλο MER οι γνώμες των πρακτόρων φαίνεται να μετακινούνται αρκετές φορές, άλλοτε προς τα πάνω και άλλοτε προς τα κάτω, πριν καταλήξουν σε μια σταθερή τελική τιμή. Οι τροχιές των γνωμών εμφανίζονται πιο «ταραχώδεις» από αυτές του μοντέλου περιορισμένης εμπιστοσύνης. Αν κι αυτή είναι μια μικρή ποιοτική διαφορά στη δυναμική των δύο συστημάτων, είναι χαρακτηριστικό ότι η ύπαρξη της τάσης για ενδοατομική ισορροπία, ακόμα κι αν η τιμή της μεταβλητής ψ είναι μικρή, τείνει να αποσταθεροποιήσει τις λείες τροχιές των γνωμών των πρακτόρων του μοντέλου περιορισμένης εμπιστοσύνης.

Στα δύο διαγράμματα της πρώτης γραμμής του πίνακα 7.1 διακρίνεται ότι η γνώμη 1 όλων των πρακτόρων λαμβάνει τέσσερις τιμές, όταν το σύστημα τερματίζει, ενώ η γνώμη 2 πέντε τιμές. Λέμε ότι οι πράκτορες έχουν χωριστεί σε τέσσερις ομάδες ως προς τη γνώμη 1 και σε πέντε ομάδες ως προς τη γνώμη 2. Πίσω δηλαδή από κάθε τροχιά, από τις τέσσερις που καταλήγει η γνώμη 1, κρύβεται ένας αριθμός πρακτόρων, οι οποίοι θεωρούμε ότι ανήκουν στην ίδια ομάδα, όσον αφορά στη γνώμη 1. Το αυτό ισχύει και για τις πέντε τροχιές που καταλήγουν όλες οι τροχιές των γνωμών 2. Για να τεκμηριωθεί η χρήση του όρου ομάδα και να αναλυθεί ο μηχανισμός σχηματισμού των ομάδων στο μοντέλο MER, στην επόμενη ενότητα γίνεται μια σύντομη παρουσίαση του προβληματισμού γύρω από τα φαινόμενα που διέπουν τις διομαδικές σχέσεις, στο χώρο της κοινωνικής ψυχολογίας.

7.2.1.1. Σχηματισμός Ομάδων στην Κοινωνική Ψυχολογία και τη Δραστοστρεφή μοντελοποίηση

Όσον αφορά στις προκαθορισμένες «φυσικές» ομάδες, στη στατιστική ανάλυση εμπειρικών ερευνητικών δεδομένων, χρησιμοποιούμε συνήθως τη μέση τιμή ως μέτρο της κεντρικής τάσης και τείνουμε να αντικαταστήσουμε όλες τις απόψεις των ατόμων της ομάδας από τη μέση αυτή τιμή. Έτσι, λέμε ότι κάθε μέλος μιας ομάδας μπορεί να αντιπροσωπευθεί από το μέσο όρο της ομάδας, εάν η τυπική απόκλιση είναι αρκετά χαμηλή. Για παράδειγμα μπορεί οι γυναίκες έχουν μέσο όρο 5,5 σε μια κλίμακα 1-7 για τη συχνότητα που εμφανίζονται προβλήματα στο γάμο, ενώ στην ίδια ερώτηση στους άνδρες ο μέσος όρος μπορεί να είναι ίσος με 2,5. Με τον τρόπο αυτό, μολονότι οι γνώμες των γυναικών και των ανδρών δεν ταυτίζονται με το μέσο όρο τους, μπορούμε να συμπεραίνουμε ότι οι γυναίκες πιστεύουν ότι τα προβλήματα σε ένα γάμο εμφανίζονται συχνότερα απ' ό,τι οι άνδρες. Αυτή η αντικατάσταση της ατομικότητας με το μέσο όρο της φυσικής ομάδας που ανήκει το άτομο αποτελεί ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται διαρκώς στην κοινωνική έρευνα.

Όσον αφορά τις ομάδες που δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως «φυσικές», όπως οι ομάδες που διαμορφώνονται από την ομοιότητα των απόψεων των ατόμων, το αν ένα άτομο είναι μέλος μιας ομάδας ή όχι, αποτελεί ένα ζήτημα για το οποίο δεν έχει δοθεί κοινά αποδεκτή απάντηση από τους ερευνητές στο χώρο της κοινωνικής ψυχολογίας. Σύμφωνα με τον Shaw (1976), δύο ή περισσότερα άτομα που αλληλεπιδρούν με έναν τρόπο που το καθένα επηρεάζει τα άλλα και συγχρόνως επηρεάζεται από αυτά ορίζεται ως μια ομάδα. Όμως, αν και η αλληλεπίδραση μεταξύ των μελών αποτελεί ένα ισχυρό κριτήριο του καθορισμού μιας ομάδας, η ομάδα δεν μπορεί απλώς να καθοριστεί με ενδο-ομαδικούς όρους, δεν αρκεί δηλαδή η ύπαρξη ισχυρών δεσμών μεταξύ των μελών μιας ομάδας αλλά επιπλέον απαιτείται μια αρκετά ισχυρή διαφοροποίηση μεταξύ των μελών της ομάδας και των μελών των άλλων ομάδων (Doise, 1978). Εντούτοις, δεδομένου ότι υπάρχει μια κοινή συμφωνία, θα πρέπει να καθοριστούν επίσης οι κοινοί στόχοι, τα κοινά μέσα για την επίτευξη των στόχων (Sherif, 1966) ή ακόμη και κοινές πεποιθήσεις, απόψεις, κοινή ταυτότητα, ώστε οι άνθρωποι να ενωθούν και να σχηματισθούν ομάδες. Στη συνέχεια, δεδομένου ότι οι άνθρωποι πιστεύουν ότι είναι ομάδα (π. χ. έχουν κοινή μοίρα), αρχίζουν να ενεργούν ως ομάδα. Κατά συνέπεια, μια ομάδα μπορεί να σχηματιστεί μόνο και μόνο για την επίτευξη

ενός κοινού στόχου, και στη συνέχεια να διαλυθεί εξίσου γρήγορα, μόλις ο κοινός στόχος πάψει να υφίσταται.

Ο Sherif, στο περίφημο πείραμα της σπηλιάς των κλεφτών, πειραματίστηκε σε δύο στάδια: κατ' αρχάς, δημιούργησε δύο ομάδες με την εισαγωγή ενός συγκρουσιακού πλαισίου (π.χ. κερδίζοντας έναν αγώνα ποδοσφαίρου) όπου μόνο η μια ομάδα θα κερδίσει, και στη συνέχεια δημιούργησε τις κατάλληλες συνθήκες για την ένωση των δύο ομάδων σε μία. Αυτό επιτεύχθηκε με την τοποθέτηση ενός κοινού στόχου, π.χ. διαμορφώνοντας τη "καλύτερη" ομάδα ποδοσφαίρου για τη νίκη σε ένα πρωτάθλημα με άλλες ομάδες. Έτσι συμπεράνε ότι η εισαγωγή κοινών στόχων μειώνει ή εξαλείφει τις κοινωνιοψυχολογικές συνέπειες της διομαδικής σύγκρουσης. Αν και οι δύο πρώην ομάδες φαίνονται να γίνονται μια, κανένας μπορεί να είναι βέβαιος εάν η νέα ομάδα είναι μια «πραγματική» ομάδα ή αποτελεί απλώς μια συγκατοίκηση μεταξύ των μελών των δύο πρώην ομάδων. Σύμφωνα με τον Παπαστάμου (1999/1990), όσο κι αν μπορεί να αποδέχεται κανείς την επιχειρηματολογία του Sherif, το ερώτημα αυτό παραμένει πάντα αναπάντητο.

Όσον αφορά στη βιβλιογραφία των κοινωνικών προσομοιώσεων ο όρος *ομάδα* (*group*) ορίζεται σαν ένα σύνολο ατόμων όπου μεταξύ τους επικρατεί απόλυτη συμφωνία. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης καθώς και στην τελική κατάσταση δεν υπάρχει καμιά διαφορά ανάμεσα στους πράκτορες που ανήκουν στην ίδια ομάδα. Ένας τέτοιος ορισμός είναι ακατάλληλος για το Μοντέλο MER όπως θα αναλυθεί στις ενότητες που ακολουθούν. Στο μοντέλο αυτό, η τεχνητή κοινωνία των 100 πρακτόρων είναι εξαιρετικά απλή, για το λόγο αυτό οι πράκτορες δε μπορεί να έχουν κοινούς στόχους διότι απλούστατα δεν έχουν κανένα στόχο, εκτός από το να διατηρήσουν την κοινωνική και την ατομική τους ισορροπία. Ομοίως δε μπορούν να έχουν κοινές πεποιθήσεις ή κάποια κοινή ταυτότητα, μιας και τέτοιες ιδιότητες δεν ορίζονται στο μοντέλο MER, τουλάχιστον προς το παρόν. Μοναδικό διαθέσιμο κριτήριο για την ύπαρξη ή όχι κάποιας ομάδας αποτελεί η ομοιότητα της γνώμης των πρακτόρων, μιας και η γνώμη είναι το μόνο χαρακτηριστικό που διαθέτουν οι πράκτορες.

Στην περίπτωση αυτή τίθεται ένα ακόμη ζήτημα. Θα θεωρήσουμε ότι αρκεί η ομοιότητα μόνο ως προς τη γνώμη 1 ή μόνο ως προς τη γνώμη 2 για ένα αριθμό πρακτόρων για να χαρακτηριστούν αυτές ως ομάδα, ή θα απαιτηθεί η ομοιότητα και των δύο γνώμων. Στα υπόλοιπα δραστοστρεφή μοντέλα δυναμικής εξέλιξης των γνώμων δεν τίθεται τέτοιο ζήτημα, μιας και σε αυτά οι πράκτορες έχουν μόνο μια γνώμη.

Στο μοντέλο πολιτισμικής διασποράς του Robert Axelrod ορίζονται περιοχές πολιτισμού (cultural region), όπου όλες οι πράκτορες έχουν ακριβώς τον ίδιο πολιτισμό, τον ίδιο δηλαδή πενταψηφίο ακέραιο. Αν μόνο τρία ή τέσσερα ψηφία είναι όμοια μεταξύ δύο πρακτόρων, τότε υπάρχει δυνατότητα αλληλεπίδρασης, όμως δε θεωρείται ότι οι πράκτορες ανήκουν στην ίδια περιοχή πολιτισμού.

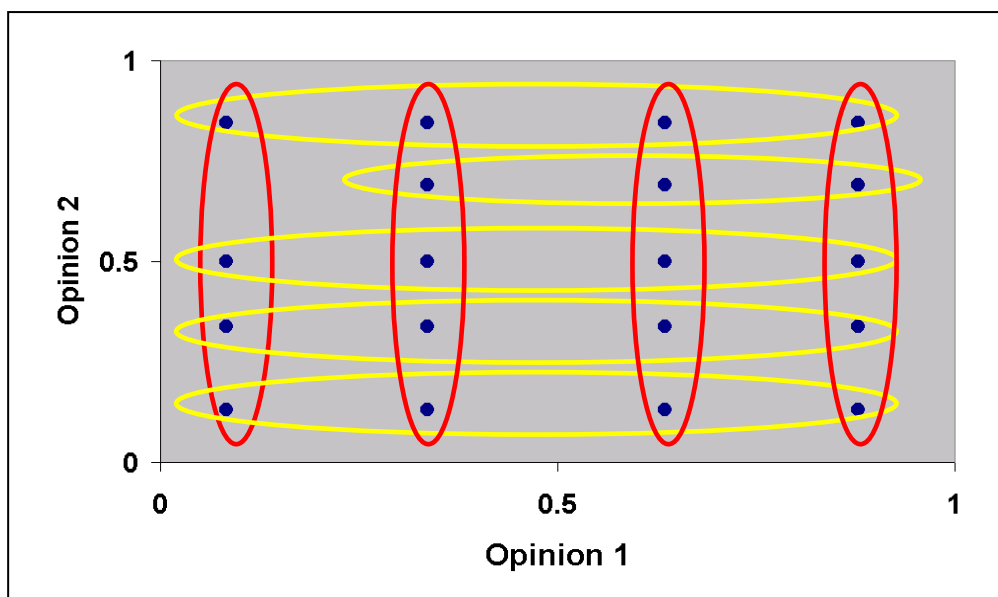
Στο μοντέλο της θεωρίας της δυναμικής απήχησης των Nowak και Latané η γνώμη των πρακτόρων έχει δύο τιμές, κατά συνέπεια οι πράκτορες χωρίζονται αρχικά σε δύο ομάδες, αυτή της πλειοψηφίας και αυτή της μειοψηφίας. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης οι κάποιες πράκτορες αλλάζουν γνώμη και σταδιακά σχηματίζονται συμπαγείς υποομάδες πρακτόρων, όσον αφορά τη γεωγραφική τους κατανομή πάνω στο κυψελοειδές αυτόματο (βλέπε σχήμα 3.3). Η ύπαρξη των υποομάδων αυτών έχει μόνο γεωγραφική έννοια. Το σημαντικότερο αποτέλεσμα της προσομοίωσης, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3, είναι ότι η μειοψηφία επιβιώνει, άρα η ομάδα αυτή των πρακτόρων δεν εξαφανίζεται, δεν απορροφάται από την ομάδα της πλειοψηφίας.

Στο μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης των Hegselmann και Krause, κάθε πράκτορας είναι εφοδιασμένος με μια μόνο γνώμη και έτσι είναι ξεκάθαρο ότι πράκτορες που έχουν την ίδια γνώμη αποτελούν ομάδα. Υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των ομάδων, όμως έπειτα από κάποιο χρονικό σημείο οι αλληλεπιδράσεις σταματούν, η απόσταση μεταξύ των γνωμών των πρακτόρων της κάθε ομάδας γίνονται μεγαλύτερες από το φράγμα εμπιστοσύνης ϵ και το σύστημα τερματίζει σε μια σταθερή τελική κατάσταση.

Όσον αφορά στο μοντέλο MER, η κατάσταση είναι πιο σύνθετη, εξαιτίας της ύπαρξης των δύο γνωμών των πρακτόρων. Έτσι, όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως, κάποιες πράκτορες μπορεί να έχουν παρόμοιες γνώμες 1, ενώ οι γνώμες 2 μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικές, καθώς και αντιστρόφως, κάποιες πράκτορες μπορεί να έχουν παρόμοιες γνώμες 2 και εντελώς διαφορετικές γνώμες 1 ή τέλος μπορεί να έχουν ίδιες γνώμες 1 και 2. Και στις τρεις περιπτώσεις λέμε ότι οι πράκτορες αποτελούν μια ομάδα, στην πρώτη ως προς τη γνώμη 1, στη δεύτερη ως προς τη γνώμη 2 ενώ στην τρίτη περίπτωση λέμε επιπλέον ότι η ομάδα αυτή αποτελεί υποομάδα κάποιων ομάδων της πρώτης ή της δεύτερης περίπτωσης.

Για να διερευνήσουμε περαιτέρω τις ομάδες των γνωμών των πρακτόρων συνεχίζουμε την ανάλυση της προσομοίωσης της προηγούμενης ενότητας. Στη δεύτερη γραμμή του πίνακα 7.1 παρουσιάζεται η γνώμη 2 του κάθε πράκτορα σε συνάρτηση με

τη γνώμη 1 του ίδιου πράκτορα για τις τιμές των παραμέτρων $\psi=0.5$ και $\varepsilon=0.1$ και την τοπολογία του πλήρους γράφου. Στην αριστερή στήλη αυτό γίνεται για το αρχικό τυχαίο ζεύγος γνώμων των πρακτόρων, που στο εξής θα αναφέρεται σαν αρχικό τυχαίο προφίλ γνώμων, πριν την έναρξη της προσομοίωσης, ενώ στη δεξιά στήλη μετά την τελική κατάσταση ισορροπίας που φτάνει το σύστημα, κατά την επανάληψη 48, όπου καμιά μεταβολή στη γνώμη οποιασδήποτε πράκτορα δε λαμβάνει πλέον χώρα. Τα δύο αυτά διαγράμματα παρατίθενται στη δεύτερη γραμμή του πίνακα 7.1, διότι παρουσιάζουν επιπλέον πληροφορίες των διαγραμμάτων της πρώτης γραμμής αλλά και λόγω της δυσκολίας της πλήρους απεικόνισης της εξέλιξης της προσομοίωσης, μιας και απαιτείται διάγραμμα που να ανήκει στο χώρο των τριών διαστάσεων. Στο διάγραμμα που αντιστοιχεί στην αρχική επανάληψη είναι φανερό ότι οι γνώμες έχουν παραχθεί τυχαία, άρα είναι άτακτα κατανομημένες και καταλαμβάνουν όλο το χώρο. Αντίθετα, στην τελική κατάσταση οι πράκτορες σχηματίζουν 19 ομάδες, όσον αφορά τη συμφωνία των πρακτόρων και ως προς τις δύο γνώμες, όσες είναι και οι τελείες που παρουσιάζονται στο αντίστοιχο διάγραμμα. Οι ομάδες αυτές αποτελούν υποομάδες των 4 ομάδων ως προς τη γνώμη 1 και των 5 ομάδων ως προς τη γνώμη 2. Το σύστημα λοιπόν αυτοοργανώνεται σε ομάδες και από την αρχική αταξία επέρχεται τάξη. Παρατηρούμε ότι στην τελική κατάσταση του συστήματος οι πράκτορες έχουν χωριστεί σε 19 ομάδες (όσες και οι μπλε τελείες) στο διάγραμμα 7.1, όπου εμφανίζεται και πάλι η γνώμη 2 κάθε πράκτορα σε συνάρτηση με τη γνώμη 1 μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, στην επανάληψη 48 (που αποτελεί και την τελική κατάσταση του συστήματος). Επιπλέον όμως, στο διάγραμμα αυτό, εκτός από τις μπλε τελείες που αντιστοιχούν οι ομάδες των πρακτόρων (που έχουν κοινή γνώμη 1 και 2) είναι σημειωμένες και οι ομάδες που σχηματίζονται με βάση την ομοιότητα των πρακτόρων όσον αφορά μόνο τη μια γνώμη.



Διάγραμμα 7.1: Η γνώμη 2 κάθε πράκτορα σε συνάρτηση με τη γνώμη 1 μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, στην επανάληψη 48, που αποτελεί και την τελική κατάσταση του συστήματος. Κάθε τελεία αντιστοιχεί σε μια «ομάδα» πρακτόρων (πράκτορες με ίσες γνώμες 1 και 2) ενώ κάθε έλλειψη αντιστοιχεί σε μια ομάδα πρακτόρων μόνο όμως ως προς τη μια γνώμη. Κάθε κόκκινη έλλειψη περιλαμβάνει 4 ή 5 υποομάδες, όπου οι πράκτορες έχουν ίση γνώμη 1 και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μόνο ως προς αυτή τη γνώμη. Αντίστοιχα κάθε κίτρινη έλλειψη περιλαμβάνει 3 ή 4 ομάδες, των οποίων οι πράκτορες έχουν ίση γνώμη 2 και επίσης αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μόνο ως προς αυτή τη γνώμη.

Η τροχιά όλων των πρακτόρων κάθε ομάδας είναι κοινή κατά τις τελευταίες επαναλήψεις πριν το σύστημα τερματίσει, κατά συνέπεια, κάθε ομάδα παρουσιάζεται σε μία τροχιά στα διαγράμματα της πρώτης γραμμής του πίνακα 7.1.

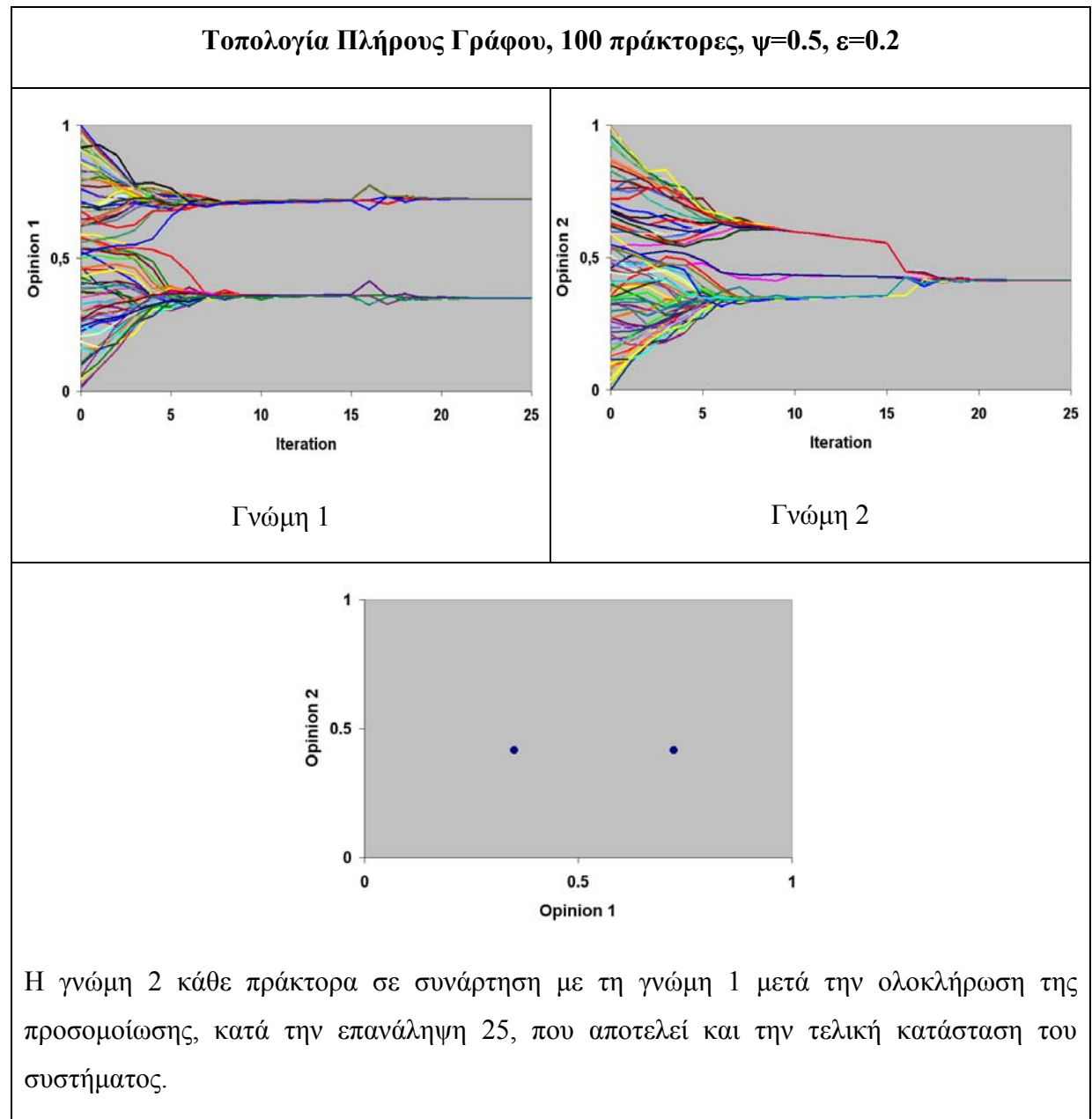
Ο αριθμός των συστάδων που προκύπτει για $\varepsilon=0.1$ συμφωνεί με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του Μοντέλου Περιορισμένης Εμπιστοσύνης για την ίδια τιμή του φράγματος εμπιστοσύνης ε , δηλαδή και εκεί έχουμε αυτοοργάνωση του συστήματος σε 4 ή 5 ομάδες γνώμων. Για τις τιμές αυτές των παραμέτρων ($\psi=0.5$ και του $\varepsilon=0.1$) η προσομοίωση επαναλήφθηκε δέκα φορές, με δέκα διαφορετικά τυχαία αρχικά προφίλ γνώμων και σε όλες τις περιπτώσεις τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια, δηλαδή είχαμε 5 ομάδες πρακτόρων για τη μία γνώμη και 4 για την άλλη, ή 5 ομάδες και για τις δύο γνώμες ή 4 και για τις δύο γνώμες. Σε κάποιες περιπτώσεις δηλαδή υπάρχει διαφοροποίηση στον τελικό αριθμό των συστάδων που σχηματίζονται, πάντοτε όμως

αυτή είναι μικρή και οι ομάδες που σχηματίζονται στη γνώμη 1 είναι το πολύ κατά μία περισσότερες ή κατά μία λιγότερες από τις ομάδες της γνώμης 2.

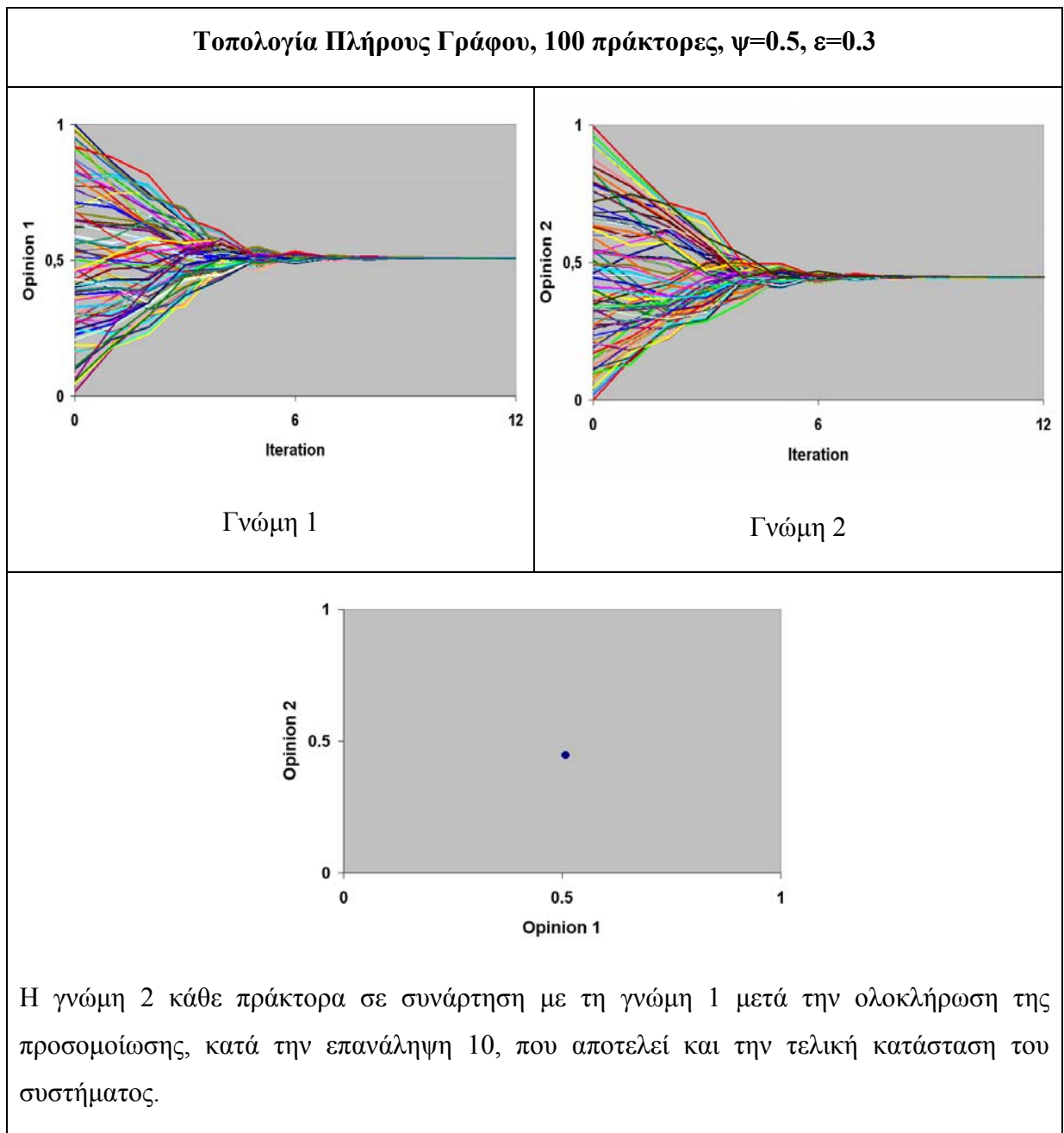
Οι πράκτορες που ανήκουν σε οποιαδήποτε ομάδα (τελεία στο διάγραμμα 7.1) επηρεάζονται και αλληλεπιδρούν ως προς τη γνώμη 1 με όλους τους πράκτορες που βρίσκονται μέσα στην κόκκινη έλλειψη, μιας και η γνώμη 1 αυτών των πρακτόρων διαφέρει λιγότερο από το φράγμα εμπιστοσύνης ε και όσον αφορά στη γνώμη 2 με όλους τους πράκτορες που βρίσκονται μέσα στην κίτρινη έλλειψη. Αξιοσημείωτο είναι ότι **δεν υπάρχει ομάδα ή πράκτορας απομονωμένη από τις άλλες**, δηλαδή που όλες της οι πράκτορες να μην επικοινωνούν ως προς κάποια γνώμη με πράκτορα άλλης ομάδας. Το φαινόμενο αυτό διαφέρει ουσιαστικά από αυτό του μοντέλου πολιτισμικής διασποράς του Robert Axelrod, από το δυναμικό μοντέλο της θεωρίας της κοινωνικής απήχησης των Nowak και Latané αλλά και τα υπόλοιπα δραστοστρεφή μοντέλα δυναμικής εξέλιξης των γνώμων. Σε όλα τα μοντέλα, εκτός του MER, οι ομάδες διαχωρίζονται πλήρως μεταξύ τους και σταματά οποιαδήποτε επικοινωνία και αλληλεπίδραση, έχουμε δηλαδή το σχηματισμό ξεχωριστών κόσμων γνώμων (opinion world) (Hegselmann & Krause 2002, και σχήμα 3.4 στην παρούσα διατριβή), φαινόμενο που αντίστοιχό τους δεν παρατηρείται ποτέ σε μια «πραγματική» κοινωνία. **Το μοντέλο MER είναι το μοναδικό στη βιβλιογραφία που υπάρχει συνεχής αλληλεπίδραση των ομάδων των πρακτόρων μέχρι και την τελική κατάσταση** και δεν σχηματίζονται σύνολα (ομάδες) πρακτόρων που σταματούν κάθε αλληλεπίδραση με όλους τους υπόλοιπους πράκτορες.

Ολοκληρώνουμε την παρουσίαση του μοντέλου για $\psi=0.5$ με μια διευκρίνιση για την τελική ισορροπία του συστήματος και με τη διερεύνηση του ρόλου του φράγματος εμπιστοσύνης ε . Όπως αναφέραμε προηγούμενα, στην επανάληψη 48 το σύστημα έχει ισορροπήσει απόλυτα και καμιά μεταβολή δε λαμβάνει χώρα πλέον. Στην πραγματικότητα τερματίζει για την ακρίβεια (το πλήθος των δεκαδικών ψηφίων) που ρυθμίσαμε τον υπολογιστή μας να διενεργεί τις απαραίτητες αριθμητικές πράξεις. Υπενθυμίζω ότι η ρύθμιση στο πρόγραμμα της Visual Basic, που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των αποτελεσμάτων, ήταν οι πράξεις να διεξάγονται με ακρίβεια 28 δεκαδικών ψηφίων. Με αυτό τον αριθμό των ψηφίων λέμε ότι το σύστημα τερματίζει, δηλαδή οι δύο γνώμες όλων των πρακτόρων είναι ίσες κατά τις επανάληψη 48 και 49. Αν για παράδειγμα η ακρίβεια του υπολογιστεί οριστεί στα 100 δεκαδικά ψηφία, το σύστημα τερματίζει στις 300 επαναλήψεις. Χρησιμοποιώντας μαθηματική ορολογία θα λέγαμε ότι *οι γνώμες συγκλίνουν ασυμπτωτικά σε μια τελική σταθερή τιμή*.

Για τη διερεύνηση του ρόλου του φράγματος εμπιστοσύνης ε στο σχηματισμό των ομάδων και στη δυναμική του συστήματος, παρουσιάζονται στους πίνακες 7.2 και 7.3 οι προσομοιώσεις για $\varepsilon=0.2$ και $\varepsilon=0.3$ αντίστοιχα.



Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, Τοπολογία Πλήρους Γράφου, 100 πράκτορες, $\psi=0.5$, $\varepsilon=0.2$.



Πίνακας 7.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, Τοπολογία Πλήρους Γράφου, 100 πράκτορες, $\psi=0.5$, $\varepsilon=0.3$.

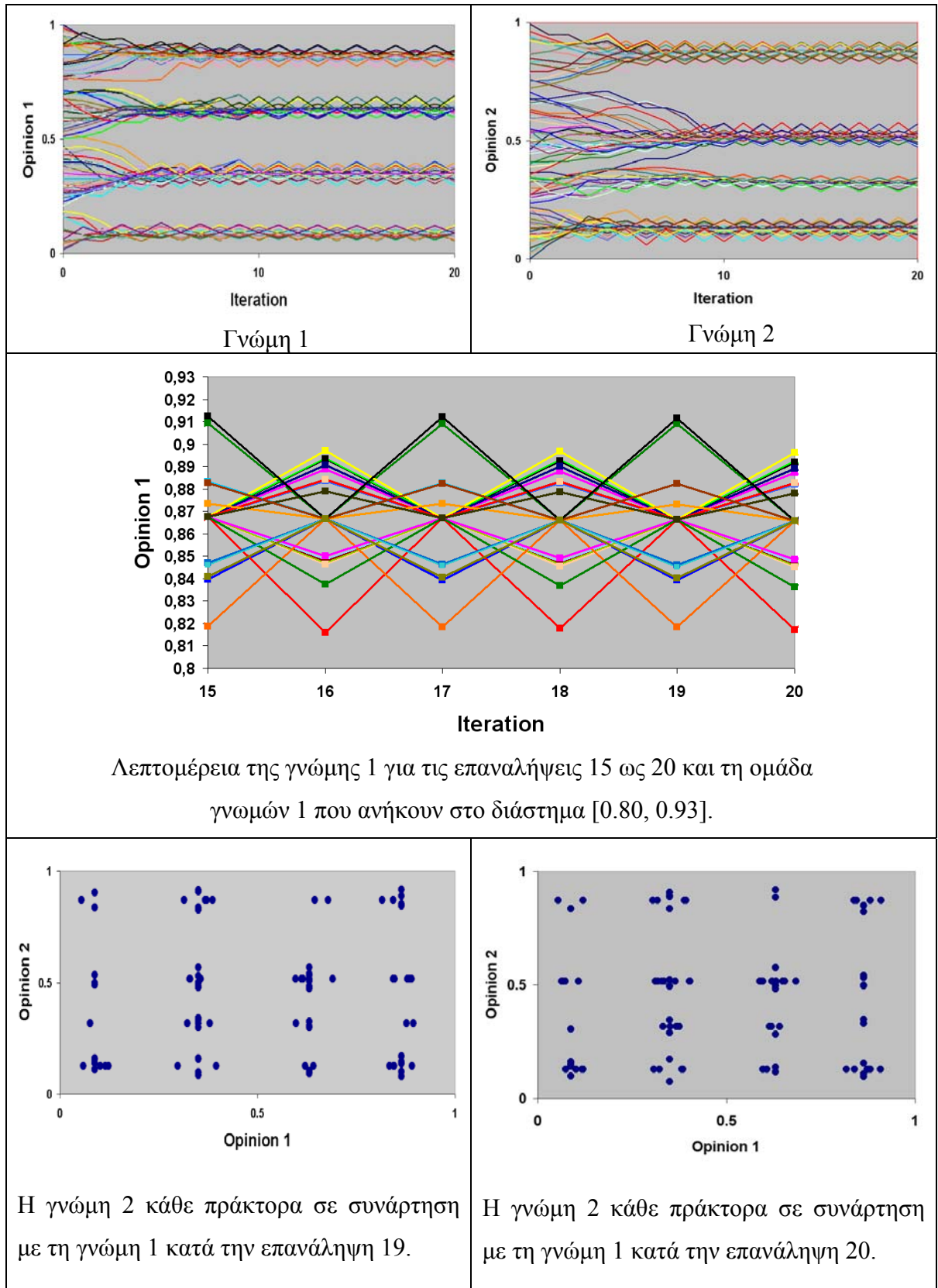
Για $\varepsilon=0.2$ παρατηρούμε ότι σχηματίζονται δύο ομάδες για τη γνώμη 1 και μία για τη γνώμη 2 (πρώτη γραμμή του πίνακα 7.2). Τα γεγονόσ αυτό είναι τυπικό και για άλλα αρχικά τυχαία προφίλ γνώμων. Για κάποια από αυτά σχηματίζονται δύο ομάδες για κάθε γνώμη και σε άλλα μία ομάδα για τη γνώμη 1 και δύο για τη γνώμη 2. Σε κάθε περίπτωση έχουμε το σχηματισμό δύο ή τεσσάρων ομάδων. Για το αρχικό προφίλ που χρησιμοποιούμε έχουμε το σχηματισμό δύο ομάδων, όπως φαίνεται στη δεύτερη γραμμή

του πίνακα 7.2. Για $\varepsilon=0.3$ έχουμε ομοφωνία, δηλαδή όλοι οι πράκτορες καταλήγουν να έχουν γνώμη 1 και 2 ίση με 0.5, όπως συμβαίνει και στο μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης (πίνακας 7.3).

Παρατηρούμε ότι για όλες τις περιπτώσεις που ο συντελεστής ενδοατομικής ισορροπίας ψ παίρνει την τιμή 0.5, και άρα είναι μικρή η τάση των πρακτόρων να σκεφτούν, να ισορροπήσουν εσωτερικά και να είναι συνεπείς στις μεταβολές των δύο τους γνωμών, ώστε αυτές να μην αντιφάσκουν μεταξύ τους, τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε είναι αρκετά όμοια με τα αντίστοιχα που δίνει και το μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης για τις αντίστοιχες κάθε φορά τιμές του φράγματος εμπιστοσύνης ε . Ο αριθμός των σχηματιζόμενων ομάδων σχετίζεται με το μέγεθος της παραμέτρου ε , που είναι κοινή στα δύο μοντέλα και η δυναμική των συστημάτων είναι παρόμοια, με τις τροχιές όμως των γνωμών να έχουν περισσότερες εναλλαγές και διακυμάνσεις στο μοντέλο MER. Στη συνέχεια θα γίνει διερεύνηση του μοντέλου MER για συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας $\psi=1$ όπου, όπως θα φανεί στη συνέχεια, τα αποτελέσματα είναι εντελώς διαφορετικά.

7.2.2. Δεύτερη Περίπτωση, $\psi=1$: Το Σύστημα Γίνεται Περιοδικό

Η τιμή 1 για το συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ σημαίνει ότι η τάση του ατόμου να ισορροπήσει εσωτερικά είναι ίσου μεγέθους με την τάση του να ισορροπήσει κοινωνικά. Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα που θα λάβουμε από τη συγκεκριμένη προσομοίωση αναμένεται να έχουν μεγαλύτερες διαφορές από τα αντίστοιχα για το μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης απ' ότι τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου, όπου το ψ ήταν ίσο με 0.5.



Πίνακας 7.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, Τοπολογία Πλήρους Γράφου, 100 πράκτορες, $\psi=1$, $\varepsilon=0.1$.

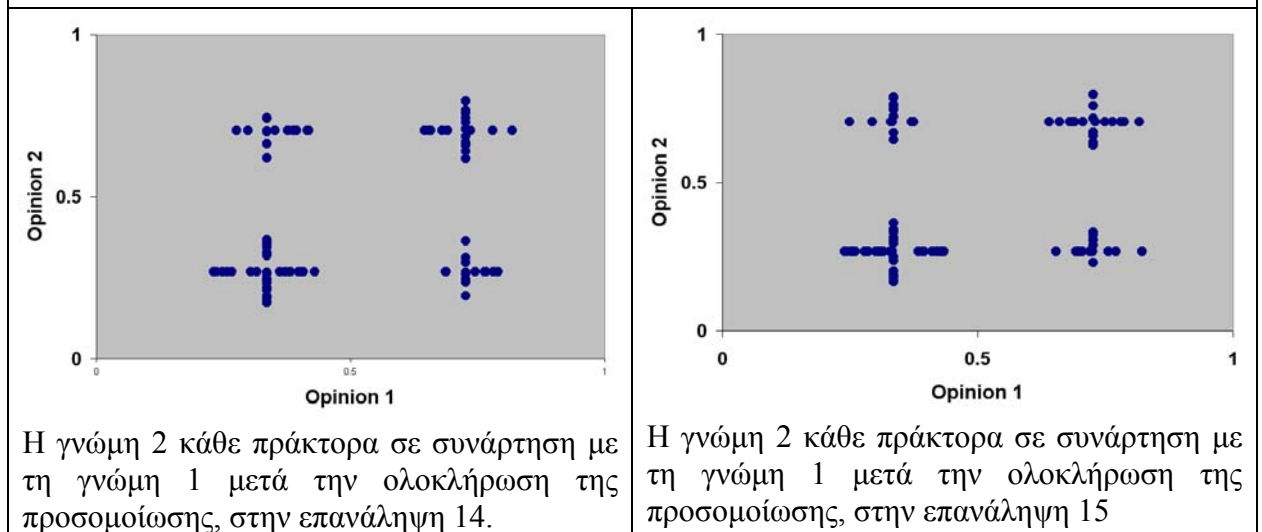
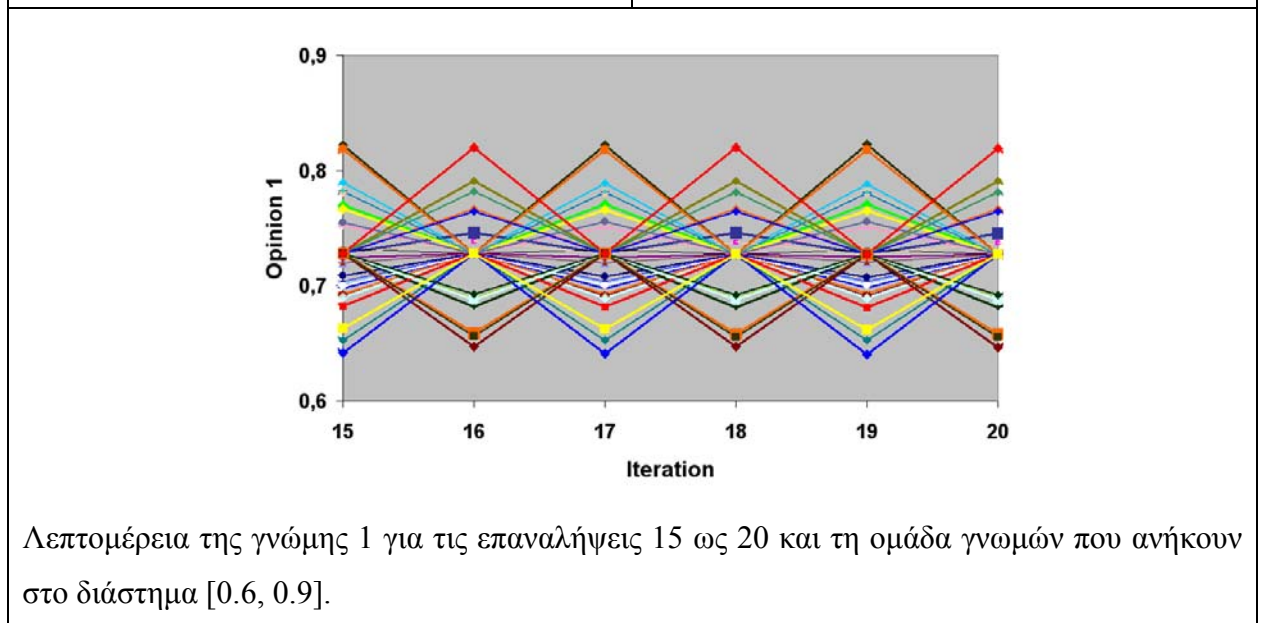
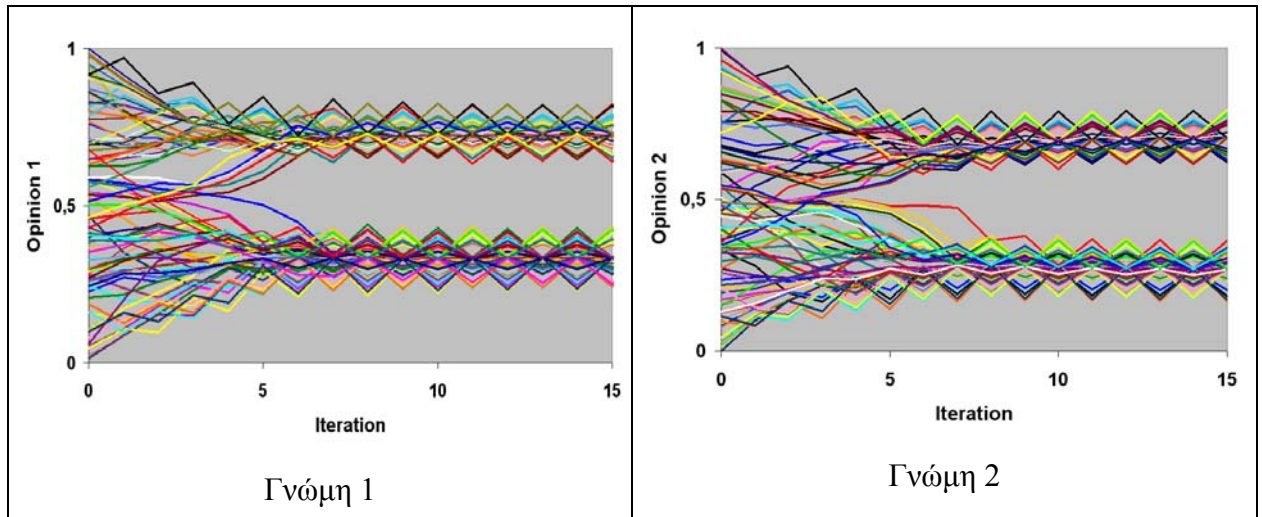
Στον πίνακα 7.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το μοντέλο MER με την τοπολογία του πλήρους γράφου, για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$. Το πιο εντυπωσιακό αποτέλεσμα της προσομοίωσης αυτής είναι ότι το σύστημα καταλήγει σε μια περιοδική κίνηση, φαινόμενο που πρώτη φορά εμφανίζεται σε δραστοστρεφές μοντέλο στην ελληνική και ξενόγλωσση βιβλιογραφία. Όταν λοιπόν οι δύο τάσεις προς κοινωνική και ατομική ισορροπία του ατόμου είναι το ίδιο ισχυρές, το σύστημα καταλήγει να είναι περιοδικό! Κάθε πράκτορας ταλαντώνεται σε μια περιοδική κίνηση για να ταιριάζει τις δύο ασύμφωνες γνώμες 1 και 2 και το σύστημα δεν ισορροπεί παρά μόνο αφού επιτευχθεί πλήρης ταλάντωση για όλους τους πράκτορες. Οι πράκτορες λοιπόν υιοθετούν την πιο «στατική» μορφή κίνησης, αποφεύγοντας μια «ακίνητη», παγιωμένη κατάσταση, καταλήγοντας σε μια επίσης ατελείωτη αλλά αρμονική κίνηση. Στην περίπτωση αυτή οι πράκτορες δεν είναι στατικοί, πράγμα αδύνατο στη εμπειρική πραγματικότητα αλλά δεν είναι και απρόβλεπτοι: αυτή είναι μια μέση κατάσταση ανάμεσα στην τάξη (που παράγεται από την ακινησία στην τελική κατάσταση) και την αταξία, την πλήρη έλλειψη περιοδικότητας.

Στη δεύτερη γραμμή του πίνακα 7.4 παρουσιάζεται μια λεπτομέρεια της γνώμης 1 για τις επαναλήψεις 15 ως 20 και τη ομάδα των γνωμών 1 που ανήκουν στο διάστημα $[0.8, 0.93]$. Πρόκειται για την επάνω ομάδα, στο διάγραμμα της πρώτης γραμμή του ίδιου πίνακα. Μπορούμε εδώ να παρατηρήσουμε το είδος της ταλάντωσης των γνωμών των πρακτόρων. Η γνώμη κάθε πράκτορα ταλαντώνεται σε διαφορετικό πλάτος από όλες τις υπόλοιπες γνώμες. Κάποιες έχουν μικρό πλάτος και άλλες μεγαλύτερο. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η γνώμη με τιμή ίση με 0.87 αποτελεί το κέντρο της ταλάντωσης. Όλες οι πράκτορες αυτής της ομάδας ταλαντώνονται με περίοδο 2 και η μία θέση για την γνώμη τους 1 είναι για όλους μια τιμή λίγο κάτω από την τιμή 0.87, δηλαδή περίπου 0.868. Οι μισοί περίπου πράκτορες ταλαντώνονται σε τιμές μεγαλύτερες από αυτή την τιμή και οι άλλοι μισοί σε τιμές μικρότερες. Την ίδια εικόνα παρουσιάζουν όλες οι ομάδες της γνώμης 1 καθώς και της γνώμης 2. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ισορροπία του συστήματος.

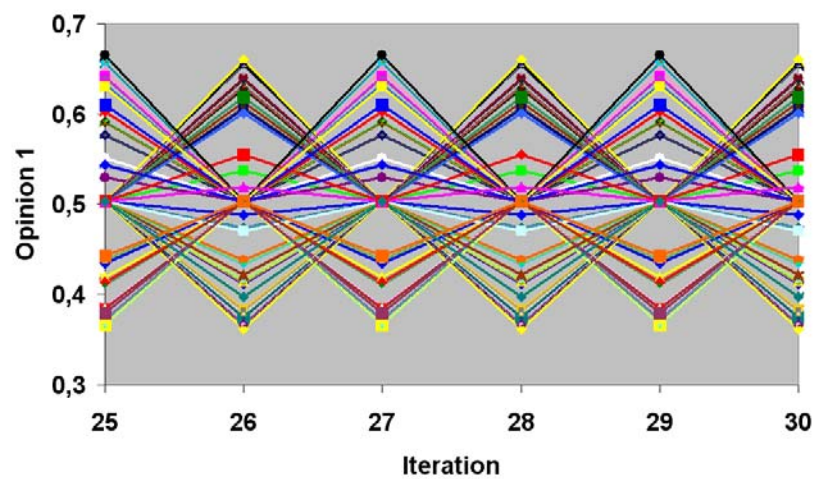
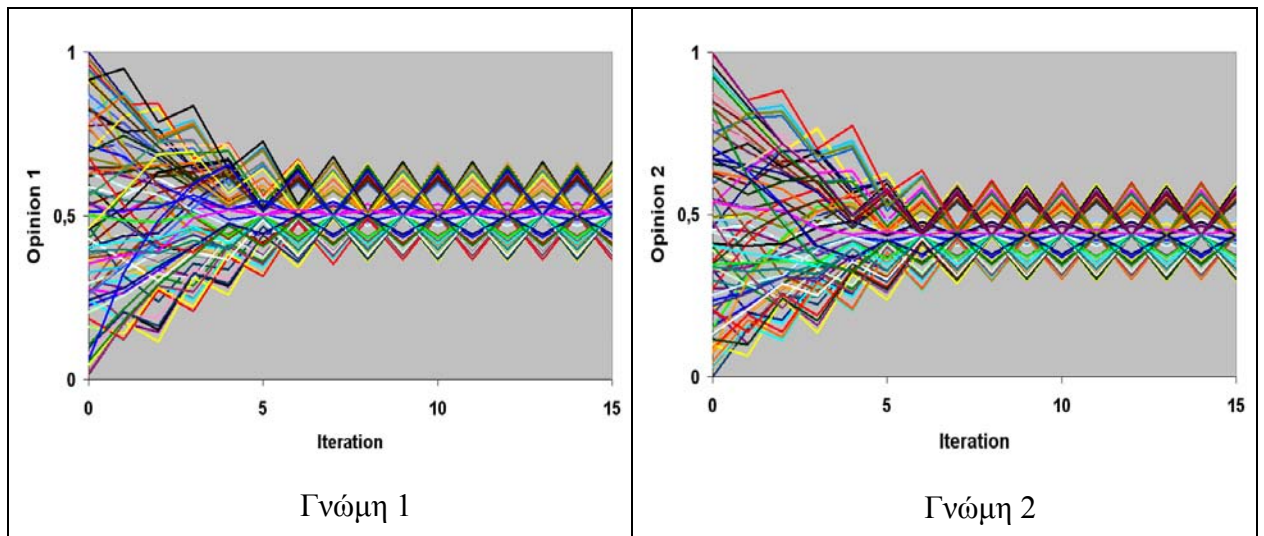
Στη τρίτη γραμμή του πίνακα 7.4 δίνεται η γνώμη 2 σε συνάρτηση με τη γνώμη 1 για τις δύο τελικές καταστάσεις που τερματίζει το σύστημα, μιας και όπως αναφέραμε η τελική κατάσταση είναι μια ταλάντωση με περίοδο 2. Παρατηρούμε ότι σχηματίστηκαν 16 ομάδες, περίπου όσες είχαν σχηματιστεί και στην περίπτωση όπου είχαμε $\psi=0.5$ και $\varepsilon=0.1$. Συμπεραίνουμε έτσι ότι η επίδραση του μεγέθους του φράγματος εμπιστοσύνης ε

είναι αυτή που καθορίζει τον αριθμό των ομάδων των πρακτόρων που σχηματίζονται τελικά. Θεωρούμε ότι οι πράκτορες που είναι κοντά αποτελούν την ίδια ομάδα, μιας και αλληλεπιδρούν ως προς και τις δύο γνώμες. Ακόμη, συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα της δεύτερης γραμμής του πίνακα 7.4, παρατηρούμε ότι οι πράκτορες μετακινούνται από το ένα στο άλλο, με τρόπο που θυμίζει το παιχνίδι της ζωής (game of life) του Conway (Gardner, 1970). Χάρης την ταλάντωση αυτή το σύστημα ισορροπεί απόλυτα, όπως εξηγήθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο.

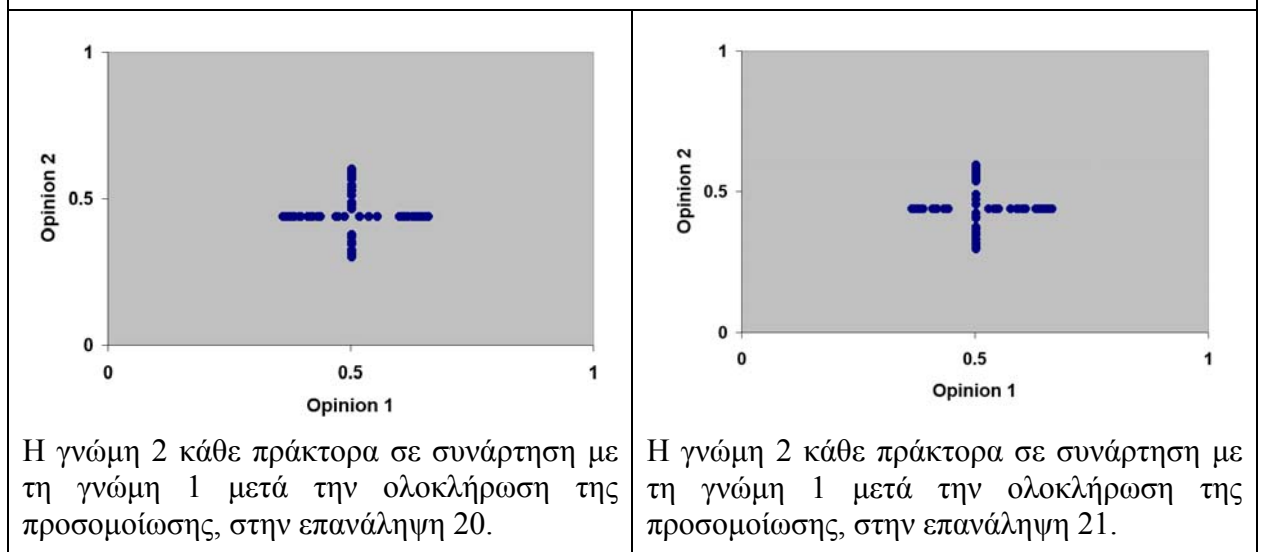
Στη συνέχεια παρουσιάζονται στους πίνακες 7.5 και 7.6 τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για άλλες δυο τιμές του φράγματος εμπιστοσύνης ε , δηλαδή για $\varepsilon=0.2$ και $\varepsilon=0.3$, σε συνδυασμό με συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας $\psi=1$.



Πίνακας 7.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, Τοπολογία Πλήρους Γράφου, 100 πράκτορες, $\psi=1$, $\varepsilon=0.2$.



Λεπτομέρεια της γνώμης 1 για τις επαναλήψεις 15 ως 20 και τη ομάδα γνωμών που ανήκουν στο διάστημα $[0.3, 0.7]$.



Πίνακας 7.6: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, Τοπολογία Πλήρους Γράφου, 100 πράκτορες, $\psi=1$, $\varepsilon=0.3$.

Στους πίνακες 7.5 και 7.6, για $\varepsilon=0.2$ και $\varepsilon=0.3$, παρατηρούμε ότι το σύστημα τερματίζει και πάλι σε μια περιοδική κίνηση, όπως και στη περίπτωση του $\varepsilon=0.1$. Κατά συνέπεια ο συντελεστής ενδοατομικής ισορροπίας $\psi=1$ καθορίζει την περιοδική κίνηση κατά την τελική κατάσταση του συστήματος. Είναι η συγκεκριμένη τιμή του ψ , όπου οι δύο θεμελιώδεις τάσεις του ατόμου, να ισορροπήσει δηλαδή τόσο κοινωνικά όσο και εσωτερικά, έχουν την ίδια ισχύ, η οποία επιδρά στην τεχνητή αυτή κοινωνία έτσι ώστε οι πράκτορες να αυτό-οργανωθούν σε ομάδες και το σύστημα να καταλήξει σε μια τελική κατάσταση ισορροπίας, όπου όμως κάθε πράκτορας ταλαντώνεται σε μια περιοδική κίνηση με περίοδο δύο.

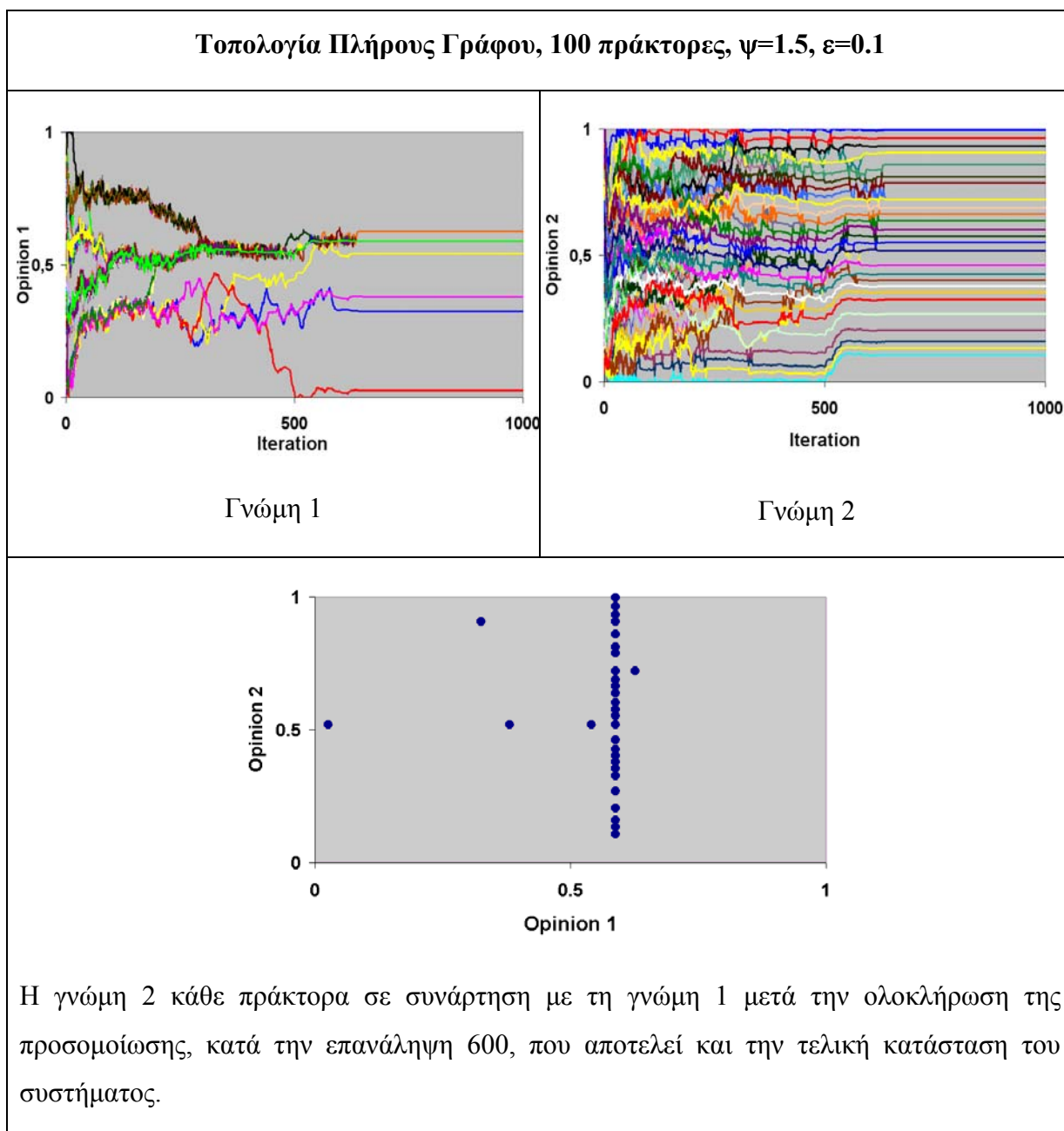
Η επίδραση του φράγματος εμπιστοσύνης ε αφορά στον αριθμό των σχηματιζόμενων ομάδων. Στην περίπτωση του $\varepsilon=0.2$ σχηματίζονται τέσσερις ομάδες για κάθε γνώμη (τρίτη γραμμή του πίνακα 7.5) ενώ στην περίπτωση $\varepsilon=0.3$ σχηματίζεται μόνο μία (τρίτη γραμμή του πίνακα 7.6), δηλαδή έχουμε ομοφωνία, διαφορετική όμως από τις περιπτώσεις όλων των υπολοίπων δραστοστρεφών μοντέλων. Κι αυτό γιατί, όπως παρατηρούμε στις δεύτερες γραμμές των προηγούμενων δύο πινάκων, όπου παρουσιάζονται λεπτομερώς οι κινήσεις κάποιων πρακτόρων, η ταλάντωση των πρακτόρων δε γίνεται για όλους ταυτόχρονα. Οι πράκτορες ταλαντώνονται με περίοδο 2 με τη μία θέση της ταλάντωσης για την γνώμη τους 1 είναι ίση 0.5 περίπου. Οι μισές περίπου πράκτορες ταλαντώνονται με τη δεύτερη θέση της ταλάντωσης να έχει τιμή μεγαλύτερη από 0.5 και οι άλλες μισές με τιμές μικρότερες του 0.5. Επίσης, το πλάτος της ταλάντωσης έχει διαφορετική τιμή για κάθε πράκτορα. Κατά συνέπεια οι πράκτορες σχηματίζουν ομάδες, ταυτόχρονα όμως διατηρούν και την ατομικότητά τους, με το όλο σύστημα να ισορροπεί σε μια αέναη ταλάντωση. Όσον αφορά στον αριθμό των ομάδων, αυτός επηρεάζεται από το μέγεθος του φράγματος εμπιστοσύνης ε και όχι από το συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ .

Στη συνέχεια θα γίνει διερεύνηση του μοντέλου MER για συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας $\psi=1.5$, σε συνδυασμό με φράγμα εμπιστοσύνης $\varepsilon=0.1$, $\varepsilon=0.2$ και $\varepsilon=0.3$.

7.2.3. Τρίτη Περίπτωση, $\psi=1.5$: Το Σύστημα Παρουσιάζει Εφήμερο

Χάος

Στην περίπτωση που θα εξεταστεί στη συνέχεια, ο συντελεστής ενδοατομικής ισορροπίας ψ ισούται με 1.5, δηλαδή όλες οι πράκτορες διορθώνουν περισσότερο τη γνώμη τους, υπερεκτιμούν την σημασία της εσωτερικής τους ισορροπίας και αποδίδουν μικρότερη σημασία στην κοινωνική τους ισορροπία.



Πίνακας 7.7: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, Τοπολογία Πλήρους Γράφου, 100 πράκτορες, $\psi=1.5$, $\varepsilon=0.1$

Στον Πίνακα 7.7, όπου κυριαρχεί η τάση των πρακτόρων για ενδοατομική ισορροπία ($\psi=1.5$), παρουσιάζεται μια τελείως διαφορετική εικόνα, απ' ότι σε όλες τις προηγούμενες προσομοιώσεις. Το σύστημα καταλήγει σε μια τελική σταθερή κατάσταση, όπου η γνώμη 1 και 2 για κάθε πράκτορα παίρνει μια σταθερή τιμή, όπως συνέβη και στην περίπτωση $\psi=0.5$. Υπάρχουν όμως στην περίπτωση αυτή κάποιες σημαντικές διαφορές. Μια πρώτη διαφοροποίηση είναι ότι η τελική κατάσταση για $\psi=0.5$ επιτυγχάνεται πάντα έπειτα από 15 ή το πολύ 20 επαναλήψεις ενώ για $\psi=1.5$ απαιτούνται τουλάχιστον 600 επαναλήψεις για να ισορροπήσει το σύστημα. Ακόμη και για $\psi=1$ που η τελική κατάσταση είναι ταλάντωση, χρειάζονται το πολύ μερικές δεκάδες επαναλήψεις για να ισορροπήσει το σύστημα. Στην περίπτωση όμως όπου ο συντελεστής ενδοατομικής ισορροπίας ψ ισούται με 1.5, σε 20 ακόμη προσομοιώσεις που διεξήγαμε με διαφορετικά τυχαία αρχικά προφίλ γνώμων, ο αριθμός των επαναλήψεων που χρειάζεται το σύστημα να τερματίσει είναι πάντα μερικές εκατοντάδες.

Ο μεγάλος αριθμός επαναλήψεων όμως, που απαιτείται για να ισορροπήσει το σύστημα, δεν είναι η χαρακτηριστικότερη ιδιότητα του μοντέλου με αυτές τις τιμές των παραμέτρων. Μια πολύ πιο σημαντική διαφοροποίηση από τις προηγούμενες περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί, καθώς και με όλα τα γνωστά δραστοστρεφή μοντέλα της βιβλιογραφίας, είναι η διαφορετική διαμόρφωση του συστήματος για τη γνώμη 1 και για τη γνώμη 2. Οι πράκτορες, όσον αφορά στη γνώμη 1, φαίνεται να σχηματίζουν έξι ομάδες. Στην πραγματικότητα πρόκειται σχεδόν για ομοφωνία, μιας και η τροχιά με το πράσινο χρώμα συγκεντρώνει τους 95 πράκτορες και οι υπόλοιπες πέντε τροχιές αντιστοιχούν στους εναπομείναντες πέντε πράκτορες. Όπως θα γίνει φανερό στη συνέχεια, στους πίνακες 7.8 και 7.9, για $\varepsilon=0.2$, μόνο ένας πράκτορας αποφεύγει την ομοφωνία αυτή (μάλιστα για τη γνώμη 2) και για $\varepsilon=0.3$ όλες οι πράκτορες καταλήγουν να συμφωνήσουν όσον αφορά στη γνώμη 1.

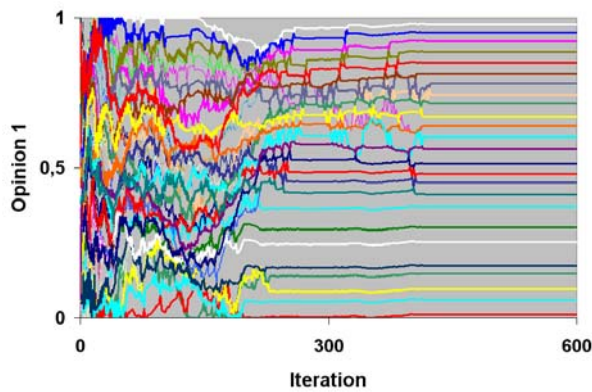
Αντίθετα, όσον αφορά τη γνώμη 2, οι γνώμες των πρακτόρων κατακερματίζονται και καταλήγουν σε ένα μεγάλο αριθμό διαφορετικών τιμών. Όλοι οι πράκτορες, όσον αφορά στη γνώμη 1 φαίνεται να χαρακτηρίζονται από προτεραιότητα στην κοινωνική ισορροπία και τάση για το σχηματισμό ομάδων, παρά τη μεγάλη τιμή του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας, ενώ όσον αφορά στη γνώμη 2 επικρατεί η τάση για ενδοατομική ρύθμιση και σχεδόν μηδενικός σχηματισμός ομάδων γνώμων. Αυτό το αναδυόμενο αποτέλεσμα δεν έχει παρατηρηθεί σε άλλα δραστοστρεφή μοντέλα κοινωνικών προσομοιώσεων, αλλά ούτε με άλλη τοπολογία επικοινωνίας στο μοντέλο

MER. Παρατηρείται μόνο για τιμές της παραμέτρου ψ κοντινές στην τιμή 1.5 και για τοπολογία επικοινωνίας αυτή του πλήρους γράφου.

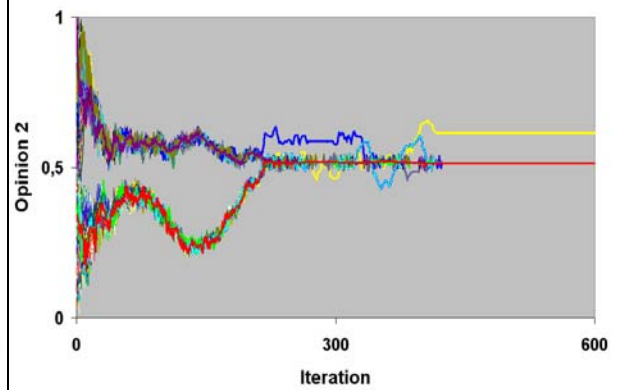
Μια άλλη σημαντική διαφοροποίηση στην περίπτωση αυτή είναι οι εξαιρετικά ανώμαλες τροχιές των πρακτόρων, οι οποίες, για όσο το σύστημα αλληλεπιδρά, παρουσιάζουν συνεχείς αλλαγές κατεύθυνσης πριν σταθεροποιηθούν στην τελική τιμή ισορροπίας τους.

Στους πίνακες 7.8 και 7.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για φράγμα εμπιστοσύνης ε ίσο με 0.2 και 0.3.

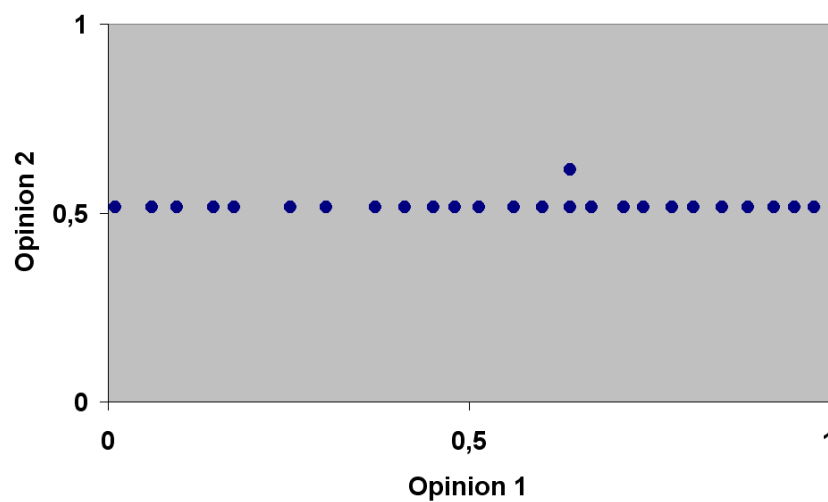
Τοπολογία Πλήρους Γράφου, 100 πράκτορες, $\psi=1.5$, $\varepsilon=0.2$



Γνώμη 1

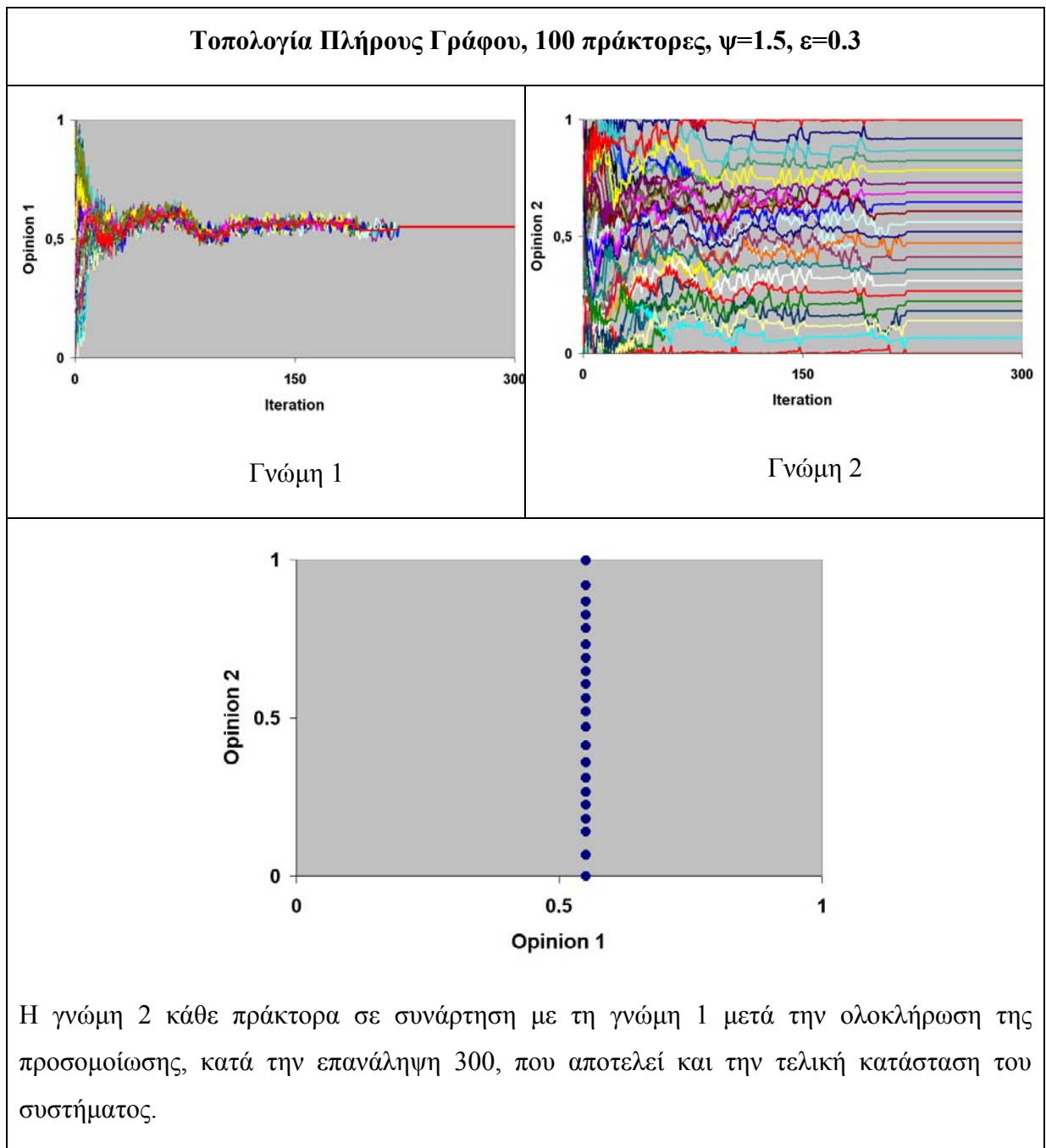


Γνώμη 2



Η γνώμη 2 κάθε πράκτορα σε συνάρτηση με τη γνώμη 1 μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, κατά την επανάληψη 600, που αποτελεί και την τελική κατάσταση του συστήματος.

Πίνακας 7.8: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, Τοπολογία Πλήρους Γράφου, 100 πράκτορες, $\psi=1.5$, $\varepsilon=0.2$



Πίνακας 7.9: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, Τοπολογία Πλήρους Γράφου, 100 πράκτορες, $\psi=1.5$, $\varepsilon=0.1$

Παρατηρούμε ότι, όπως και στην περίπτωση όπου $\varepsilon=0.1$, το σύστημα επιδεικνύει παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά στις ταραχώδεις τροχιές των γνώμων των πρακτόρων, την τελική κατάσταση και τη διαφορά στον αριθμό των σχηματιζόμενων ομάδων, τόσο για τη γνώμη 1 όσο και για τη γνώμη 2.

Για $\varepsilon=0.2$ έχουμε κατάτμηση σε ομάδες για τη γνώμη 1 και ομοφωνία για τη γνώμη 2, εκτός από μία μοναδική πράκτορα που η τελική της γνώμη 2 διαφέρει από τη γνώμη όλων των υπολοίπων (η τροχιά με το κίτρινο χρώμα στη δεξιά στήλη της πρώτης γραμμής του πίνακα 7.8). Για $\varepsilon=0.3$ όλες οι πράκτορες καταλήγουν να συμφωνήσουν όσον αφορά τη γνώμη 1 και κατακερματίζονται σε ένα πολύ μεγάλο αριθμό ομάδων, όσον αφορά στη γνώμη 2.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι για τις μεγάλες τιμές του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ , όπου η τάση για ενδοατομική ισορροπία επικρατεί, η επίδραση του μεγέθους του φράγματος εμπιστοσύνης ε είναι αμελητέα και δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα της προσομοίωσης, ούτε καν τον αριθμό των ομάδων που σχηματίζονται. Το γεγονός ότι για $\varepsilon=0.1$ διαφεύγουν της ομοφωνίας για τη γνώμη 1 πέντε συνολικά πράκτορες, για $\varepsilon=0.2$ διαφεύγει μία πράκτορας και για $\varepsilon=0.3$ καμιά¹⁸, είναι μια μικρή διαφοροποίηση που οφείλεται στις τιμές του ε , είναι όμως ασήμαντη σε σχέση με την επίδραση της τιμής του ψ , η οποία επικρατεί και καθορίζει σχεδόν όλες τις ιδιότητες του συστήματος.

Η τιμή αυτή του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ προκαλεί πολύ μεγάλες αυξομειώσεις στις τροχιές των γνώμων. Σε συνδυασμό με το μη γραμμικό χαρακτήρα του μοντέλου, η επόμενη ιδιότητα που θα μελετήσουμε, για $\psi=1.5$ είναι αυτή της δυνατότητας πρόβλεψης, αν δηλαδή το σύστημα είναι ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες.

7.3. Είναι το Σύστημα Ευαίσθητο στις Αρχικές Συνθήκες; Επανάληψη της Προσομοίωσης με μια Απειροελάχιστη Μεταβολή στην Αρχική Γνώμη μιας Πράκτορα.

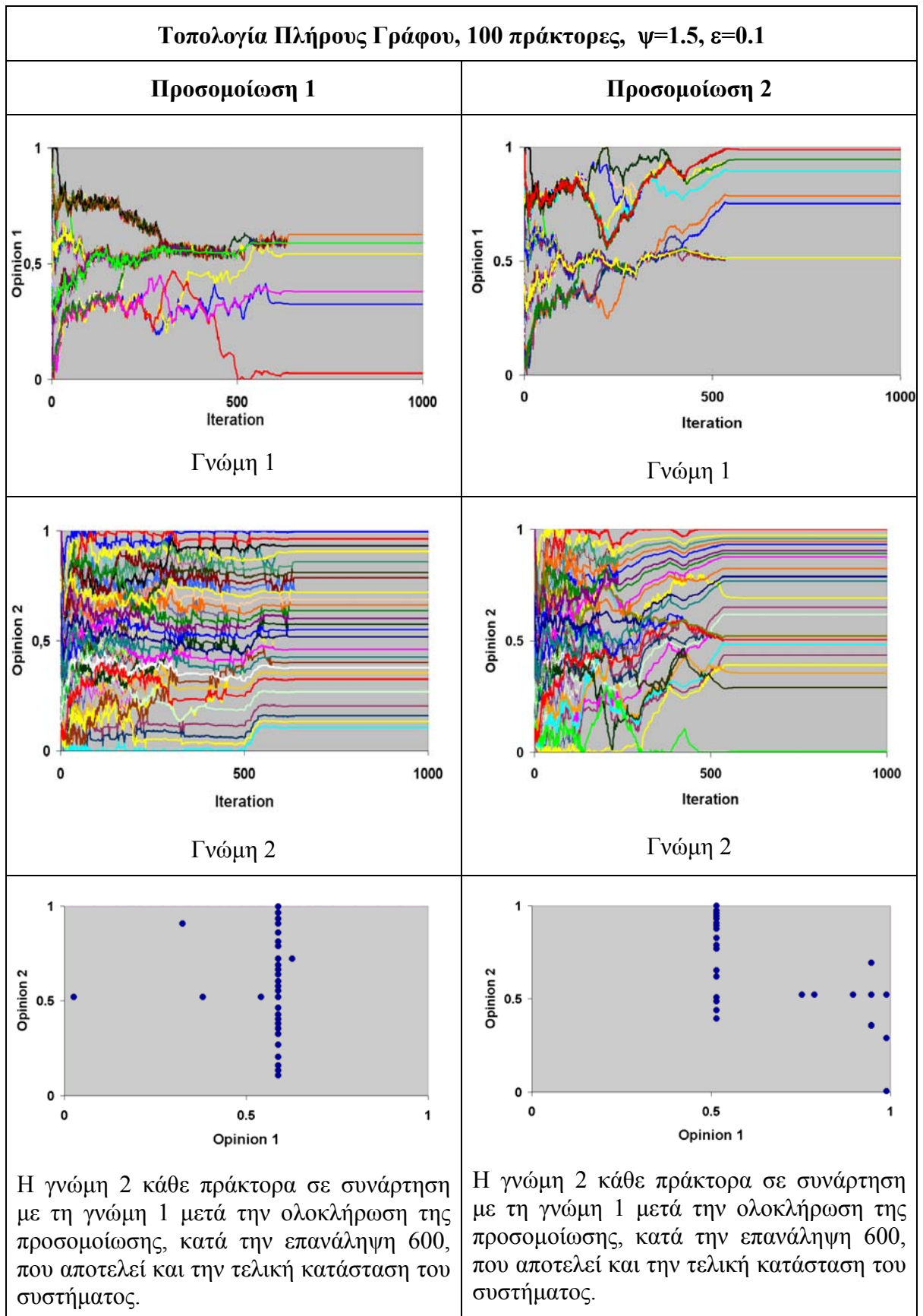
Η πρώτη και ίσως η σημαντικότερη ιδιότητα του μοντέλου που θα διερευνήσουμε, είναι αυτή της δυνατότητας πρόβλεψης. Η ιδιότητα της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες και η δυνατότητα πρόβλεψης στα δυναμικά συστήματα παρουσιάστηκε στο 5^ο κεφάλαιο της διατριβής. Για το ντετερμινιστικό, μη γραμμικό μοντέλο MER θα δειχθεί ότι, ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων, η συμπεριφορά του

¹⁸ Με διαφορετικά αρχικά προφίλ, ο αριθμός των πρακτόρων που διαφεύγει της ομοφωνίας είναι σε όλες τις περιπτώσεις μικρός.

μπορεί να είναι ήρεμη και απόλυτα προβλέψιμη ή τυρβώδης και θεμελιωδώς μη προβλέψιμη.

Η ιδιότητα της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες σημαίνει ότι και η παραμικρή παρέκκλιση από τις αρχικές συνθήκες αυξάνει εκθετικά¹⁹ και κατά συνέπεια, μετά από έναν ικανό αριθμό επαναλήψεων, το σύστημα ακολουθεί μια εντελώς διαφορετική πορεία από την προηγούμενη. Για να εξετάσουμε αν το σύστημα είναι ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες, διενεργούμε και πάλι, με μια μικρή παραλλαγή όμως, την προσομοίωση που τα αποτελέσματά της παρουσιάστηκαν στον πίνακα 7.7 (την ονομάζουμε προσομοίωση 1). Η νέα προσομοίωση που διεξάγουμε ονομάζεται προσομοίωση 2. Στην προσομοίωση 2 χρησιμοποιούμε τις ίδιες τιμές των παραμέτρων και «σχεδόν» τις ίδιες αρχικές τιμές με την 1. Δηλαδή όλες οι πράκτορες έχουν αρχικά τις ίδιες ακριβώς γνώμες 1 και 2 στις προσομοιώσεις 1 και 2 εκτός από τη γνώμη 1 του πράκτορα 1. Ο πράκτορας αυτός στην προσομοίωση 1 είχε αρχική γνώμη 1 ίση με 0.7055475 ενώ στην προσομοίωση 2 έχει αρχική γνώμη 1 ίση με 0.7055475001. Η διαφορά των δύο αυτών γνωμών ισούται με 10^{-10} . Το λάθος αυτό είναι προφανώς άνευ νοήματος στην κοινωνιοψυχολογική έρευνα, όπου τα αναμενόμενα λάθη μέτρησης στη συλλογή των δεδομένων είναι εξαιρετικά μεγαλύτερα. Υπενθυμίζουμε εδώ ότι κάθε αριθμός που αντιστοιχεί σε μια αρχική γνώμη έχει πέντε δεκαδικά ψηφία και παράχθηκε από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Στη συνέχεια, σύμφωνα με τον αλγόριθμο, διενεργούνται όλων των ειδών οι πράξεις, ακόμη και διαιρέσεις. Η ακρίβεια των διενεργούμενων πράξεων φτάνει μέχρι το εικοστό όγδοο δεκαδικό ψηφίο, στην έκδοση της Visual Basic που χρησιμοποιήσαμε για την κατασκευή του προγράμματος, άρα κάθε γνώμη που προκύπτει σε οποιαδήποτε επανάληψη μετά την αρχική φτάνει σε ακρίβεια τα 28 δεκαδικά ψηφία. Η διερεύνηση για το τι συμβαίνει αν η ακρίβεια αυτή ισούται με 100, 200 ή και 1, 2, 3 ή 4 δεκαδικά ψηφία υπερβαίνει τα όρια της παρούσας διατριβής. Στις περιπτώσεις όπου έχουμε $\psi=0.5$ ή $\psi=1$ δεν παρατηρείται καμιά διαφοροποίηση μεταξύ των δύο προσομοιώσεων. Για $\psi=1.5$ τα αποτελέσματα είναι πολύ διαφορετικά, παρά την ασημαντότητα της διαφοράς στις αρχικές συνθήκες των δύο προσομοιώσεων, όπως φαίνεται στον πίνακα 7.10.

¹⁹ Εκθετική αύξηση σημαίνει πρακτικά ότι το 2 γίνεται 4, μετά 8, 16, 32 και ούτω καθ' εξής ή αλλιώς το 0.001 γίνεται 0.002, 0.004, 0.008, 0.016, 0.032, 0.064, 0.128, 0.256, 0.512, 1.024 κλπ. Το ένα χιλιοστό λοιπόν, μετά από 10 μόλις χρονικές μονάδες έχει γίνει 1024 φορές μεγαλύτερο.



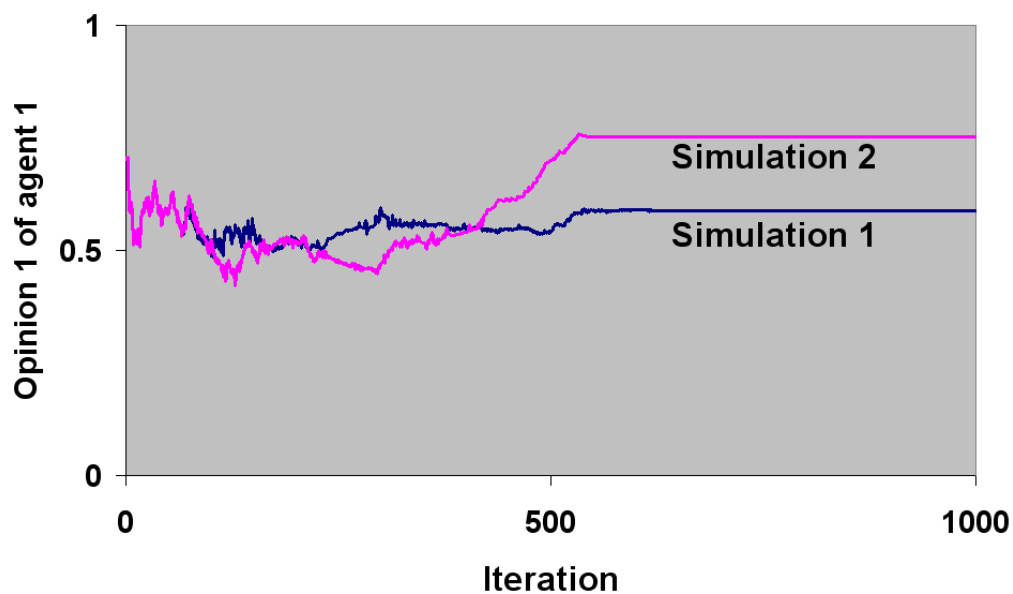
Πίνακας 7.10: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER με μια απειροελάχιστα μικρή παραλλαγή στις αρχικές συνθήκες. Η προσομοίωση 1, στην

αριστερή στήλη παρουσιάστηκε και μελετήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Στην Προσομοίωση 2 μοναδική αλλαγή σε σχέση με την προσομοίωση 1 είναι η ελάχιστη μεταβολή, κατά 10^{-10} , στη αρχική γνώμη 1 του πράκτορα 1. Οι αρχικές γνώμες 1 και 2 όλων των πρακτόρων παραμένουν ακριβώς ίδιες. Οι ατομικές τροχιές των γνώμων 1 και 2 του συνόλου των 100 πρακτόρων καθώς και η τελική διαμόρφωση του συστήματος είναι διαφορετικές, εξαιτίας της ιδιότητας της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες.

Οι παρατηρούμενες αλλαγές είναι συντριπτικές. Είναι φανερό ότι το σύστημα είναι ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες. Η δυναμική του συστήματος καθώς και η τελική διαμόρφωση όλων των γνώμων διαφέρει σημαντικά στις δύο προσομοιώσεις και οφείλεται σε μια απειροελάχιστη μεταβολή στις αρχικές συνθήκες. Στη συνέχεια θα μελετήσουμε τη μεταβολή στις ατομικές τροχιές των πρακτόρων καθώς και στις μακρο ιδιότητες του συστήματος.

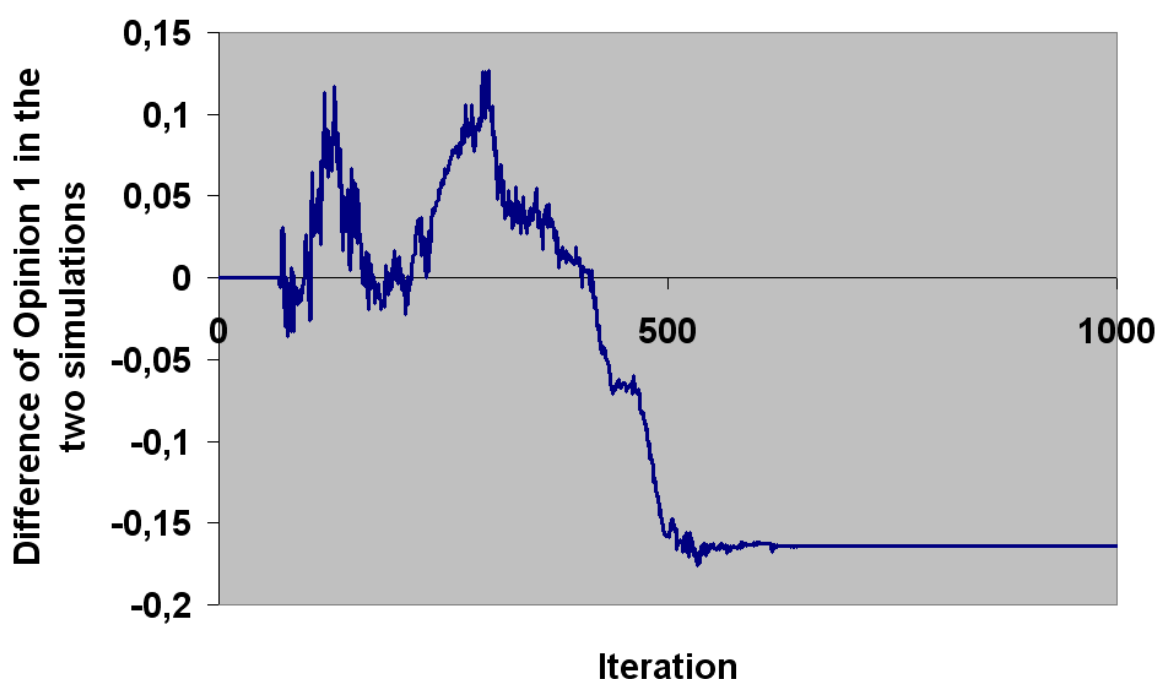
7.3.1. Μελέτη των Ατομικών Τροχιών των Πρακτόρων

Η απειροελάχιστη μικρή μεταβολή στην αρχική γνώμη 1 της πράκτορα 1 προκάλεσε πλήρη αλλαγή στην πορεία των γνώμων όλων των πρακτόρων. Για παράδειγμα, στο διάγραμμα 7.2 παρατηρούμε τη γνώμη 1 του πράκτορα 1 στις δύο προσομοιώσεις.



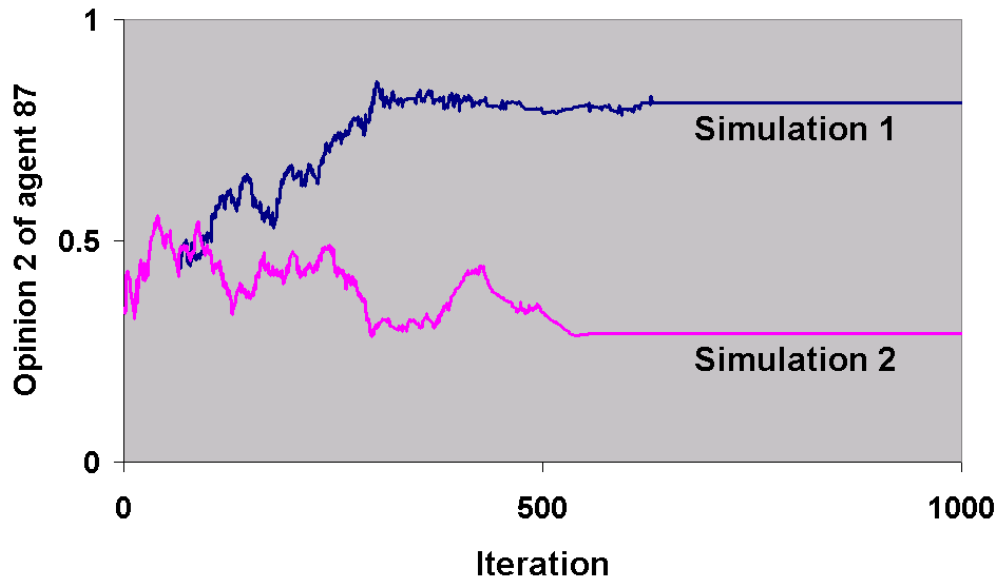
Διάγραμμα 7.2: Γνώμη 1 του πράκτορα 1 στις δύο προσομοιώσεις για $\psi=1.5$ και $\varepsilon=0.1$ με τοπολογία επικοινωνίας αυτή του πλήρους γράφου.

Η μπλε γραμμή απεικονίζει την γνώμη 1 του πράκτορα 1 κατά την προσομοίωση 1 ενώ η κόκκινη την ίδια γνώμη του ίδιου πράκτορα κατά την προσομοίωση 2. Παρατηρούμε ότι η διαφορά των γνώμων παραμένει απειροελάχιστα μικρή (της τάξης του 10^{-10}) για περίπου 70 επαναλήψεις, αλλά στη συνέχεια η «διαταραχή» αυτή μεγαλώνει σημαντικά και γίνεται του ίδιου μεγέθους (της ίδιας τάξης) με τις γνώμες. Στο διάγραμμα 7.3 δίνεται η διαφορά της γνώμης 1 του πράκτορα 1 στις δύο προσομοιώσεις.



Διάγραμμα 7.3: Διαφορά της γνώμης 1 του πράκτορα 1 στις προσομοιώσεις 1 και 2.

Η διαφορά αυτή στην πορεία της γνώμης 1 του πράκτορα 1 στις δύο προσομοιώσεις παραμένει σχεδόν μηδενική για περίπου 70 επαναλήψεις και στη συνέχεια μεγαλώνει, καταλήγοντας να ισούται με 0.17 στην τελική κατάσταση του συστήματος. Αυτή η διαφορά δεν περιορίζεται στη γνώμη του πράκτορα 1, που είχε την απειροελάχιστα έστω μικρή αρχική αλλαγή στη γνώμη του. Η διαφορετική πορεία ισχύει και για τις δύο γνώμες όλων των πρακτόρων. Όλες οι γνώμες είναι αλληλοεξαρτώμενες και έτσι όλο το σύστημα ακολουθεί μια τελείως διαφορετική πορεία. Αρκεί η παραμικρή αλλαγή σε μια από τις συνιστώσες του συστήματος και όλες οι άλλες επηρεάζονται. Για παράδειγμα, η πράκτορας 87 είχε ακριβώς την ίδια αρχική γνώμη 2, όπως και όλες οι άλλες πράκτορες, στις δύο προσομοιώσεις αλλά η πορεία της γνώμης 2 για αυτήν είναι εξαιρετικά διαφορετική, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.4.



Διάγραμμα 7.4: Μια απειροελάχιστα μικρή μεταβολή στην αρχική γνώμη 1 του πράκτορα 1 προκαλεί μια τεράστια μεταβολή στη γνώμη 2 του πράκτορα 87.

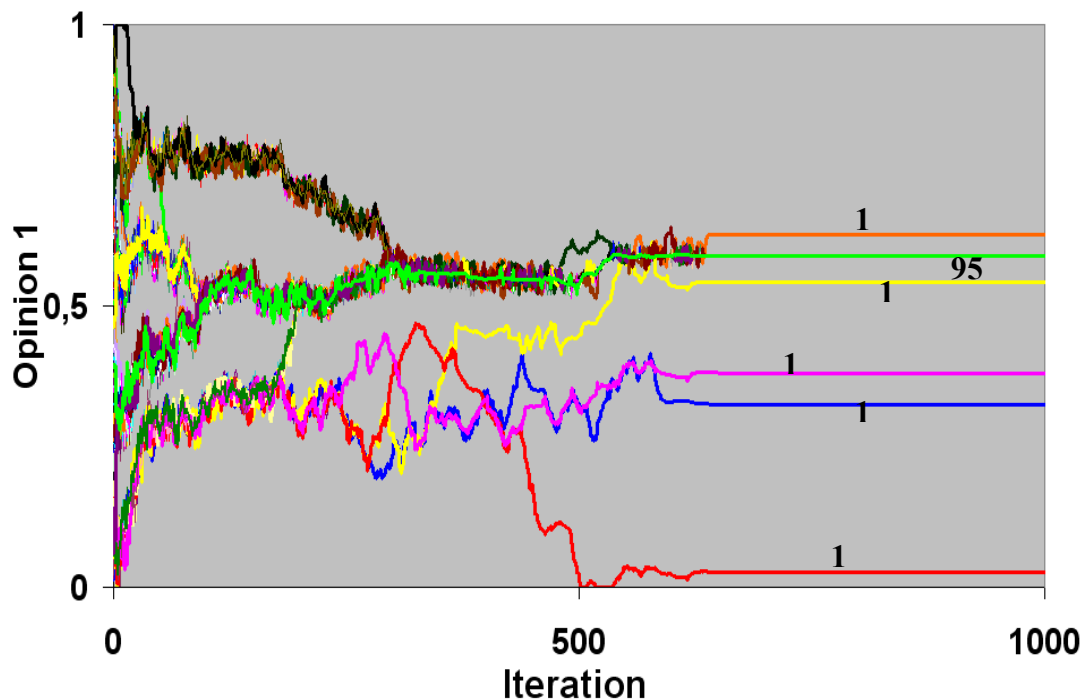
Η πράκτορας 87 ξεκίνησε και στις δύο προσομοιώσεις με «ακριβώς» την ίδια γνώμη 1 και 2. Η γνώμη της 2 αρχικά ήταν περίπου ίση με 0.45203. «Ζώντας» στην τεχνητή κοινωνία της προσομοίωσης 1, κατέληξε να έχει γνώμη 2 ίση με 0.8452 ενώ «ζώντας» στην τεχνητή κοινωνία της προσομοίωσης 2, η γνώμη της 2 κατέληξε να είναι 0.28214. Και στις δύο τεχνητές κοινωνίες όλες οι πράκτορες ξεκίνησαν με ακριβώς την ίδια γνώμη και ακολουθούσαν ακριβώς τους ίδιους κανόνες. Μόνο η πράκτορας 1 είχε απειροελάχιστα διαφορετική γνώμη 1. Η πράκτορας 87 είχε και τη μεγαλύτερη διαφορά από όλες τις άλλες στην τελική κατάσταση μιας γνώμης, για τις δύο προσομοιώσεις, διαφορά που ισούται περίπου με 0.56 στην κλίμακα του διαστήματος $[0,1]$ που ανήκουν οι γνώμες των πρακτόρων. Όλες οι υπόλοιπες πράκτορες έχουν επίσης μια εντελώς διαφορετική τροχιά στις δύο τους γνώμες στην προσομοίωση 1 απ' ότι στην προσομοίωση 2, όπως ακριβώς φαίνεται στα τρία παραδείγματα που παρουσιάστηκαν.

Κατά συνέπεια η πρόβλεψη της τροχιάς της κάθε πράκτορα είναι αδύνατη, ακόμη και με τη διεξαγωγή της προσομοίωσης, μιας και για $\psi=1.5$ το σύστημα είναι ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες και οποιαδήποτε, ακόμη και απειροελάχιστα μικρή, μεταβολή σε κάποια γνώμη αυξάνει εκθετικά και μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων τροποποιεί εξ' ολοκλήρου τις ατομικές τροχιές και των δύο γνώμων όλων των πρακτόρων. Δεν υπάρχει καμιά αμφιβολία για την ιδιότητα αυτή στο μικρο-επίπεδο.

Τι συμβαίνει όμως στο μάκρο επίπεδο; Μήπως συνολικά το σύστημα διατηρεί κάποιες μάκρο-ιδιότητες, και αν ναι ποιες είναι αυτές; Οι μάκρο-ιδιότητες του συστήματος που θα μελετηθούν στη συνέχεια ως προς την ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες είναι ο αριθμός των ομάδων των γνωμών των πρακτόρων που σχηματίζονται, ο αριθμός των πρακτόρων σε κάθε ομάδα καθώς και οι στατιστικοί δείκτες θέσης και διασποράς των γνωμών.

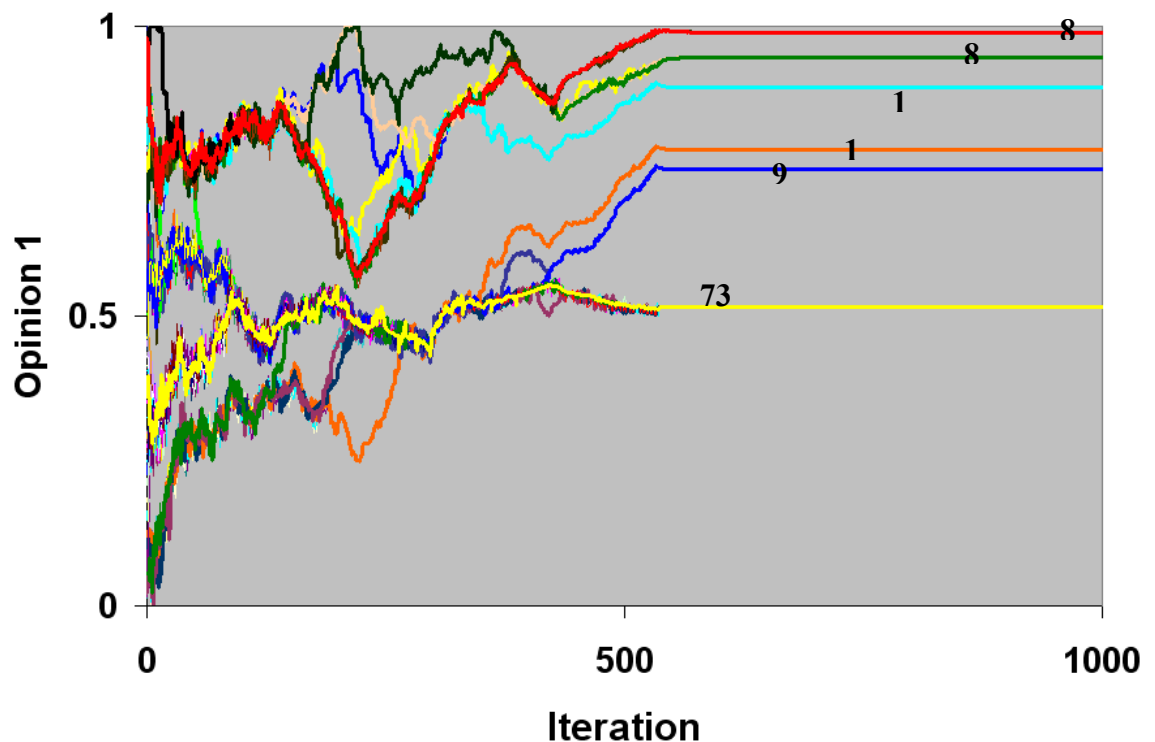
7.3.2. Μελέτη του Αριθμού των Συστάδων που Σχηματίζονται

Το ερώτημα που τίθεται είναι αν εκτός από το μικρό επίπεδο των ατομικών τροχιών των πρακτόρων, μια πολύ μικρή αλλαγή στη γνώμη 1 του πρώτου πράκτορα έχει επίδραση στις μάκρο ιδιότητες του συστήματος ή επιδρά μόνο στις ατομικές τροχιές των πρακτόρων. Όσον αφορά τη συνολική εικόνα του συστήματος, αυτή παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες στη δυναμική συμπεριφορά των τροχιών των γνωμών στις δύο προσομοιώσεις, όπως τουλάχιστον παρουσιάζεται στον πίνακα 7.10. Παρατηρούμε στον πίνακα αυτόν ότι, όσον αφορά στη γνώμη 1, οι πράκτορες καταλήγουν σε 6 ομάδες, ενώ για τη γνώμη 2 έχουμε κατάτμηση σε πολύ μεγάλο αριθμό ομάδων. Αυτό συμβαίνει και στις δύο προσομοιώσεις. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η διαμόρφωση του συνολικού συστήματος, έστω κι αν οι ατομικές τροχιές των πρακτόρων είναι διαφορετικές, παρουσιάζει ομοιότητες στο μάκρο επίπεδο, στον αριθμό των ομάδων που σχηματίζονται. Υπάρχει όμως μια σημαντική διαφορά, η οποία δεν είναι ορατή στον πίνακα 7.10, και γι' αυτό θα παρουσιάσουμε εκ νέου τα διαγράμματα της πρώτης γραμμής αυτού του πίνακα μαζί με κάποιες επιπλέον διευκρινήσεις, όσον αφορά τη δυναμική της γνώμης 1. Τα διαγράμματα που παρουσιάζουν την εξέλιξη της γνώμης 1 ή της γνώμης 2 των πρακτόρων δεν μπορούν να μας αποκαλύψουν πόσοι πράκτορες «κρύβονται» πίσω από μια μοναδική τροχιά. Στα επόμενα διαγράμματα 7.4 και 7.5 παρουσιάζεται εκ νέου η εξέλιξη της γνώμης 1 για τις προσομοιώσεις 1 και 2 αντίστοιχα, σημειώνοντας πάνω στις τροχιές της τελικής κατάστασης του συστήματος τον αριθμό των πρακτόρων που κρύβονται πίσω από κάθε τροχιά.



Διάγραμμα 7.5: Η εξέλιξη της γνώμης 1 για την προσομοίωση 1. Δίπλα ή πάνω σε κάθε τελική τροχιά σημειώνεται ο αριθμός των πρακτόρων που κρύβονται κάτω από αυτήν, ακολουθούν δηλαδή την ίδια τροχιά αλλά δεν είναι δυνατόν να διακριθούν στο διάγραμμα.

Στο διάγραμμα 7.5 που παρουσιάζει την εξέλιξη της γνώμης 1 για την πρώτη προσομοίωση, παρατηρούμε, όπως είχε αναφερθεί και σε προηγούμενη σελίδα, ότι στην πραγματικότητα πρόκειται σχεδόν για ομοφωνία, μιας και κάτω από την πράσινη τροχιά κρύβονται 95 πράκτορες, των οποίων η γνώμη ακολουθεί την ίδια πορεία, τουλάχιστον για τις επαναλήψεις που το σύστημα πλησιάζει να τερματίσει. Οι υπόλοιπες πέντε τροχιές αντιστοιχούν σε διαφορετικές πράκτορες η καθεμιά, γεγονός που μπορεί να παρατηρηθεί αν ακολουθήσουμε αυτές τις τροχιές προς τα πίσω, στις αρχικές επαναλήψεις. Άρα έχουμε «σχεδόν ομοφωνία», με πέντε πράκτορες να τερματίζουν με γνώμη 1 διαφορετική της πλειοψηφίας. Η κατάσταση είναι αρκετά διαφορετική στην προσομοίωση 2, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.6.



Διάγραμμα 7.6: Η εξέλιξη της γνώμης 1 για την προσομοίωση 2. Δίπλα ή πάνω σε κάθε τελική τροχιά σημειώνεται ο αριθμός των πρακτόρων που κρύβονται κάτω από αυτήν, ακολουθούν δηλαδή την ίδια τροχιά αλλά δεν είναι δυνατόν να διακριθούν στο διάγραμμα.

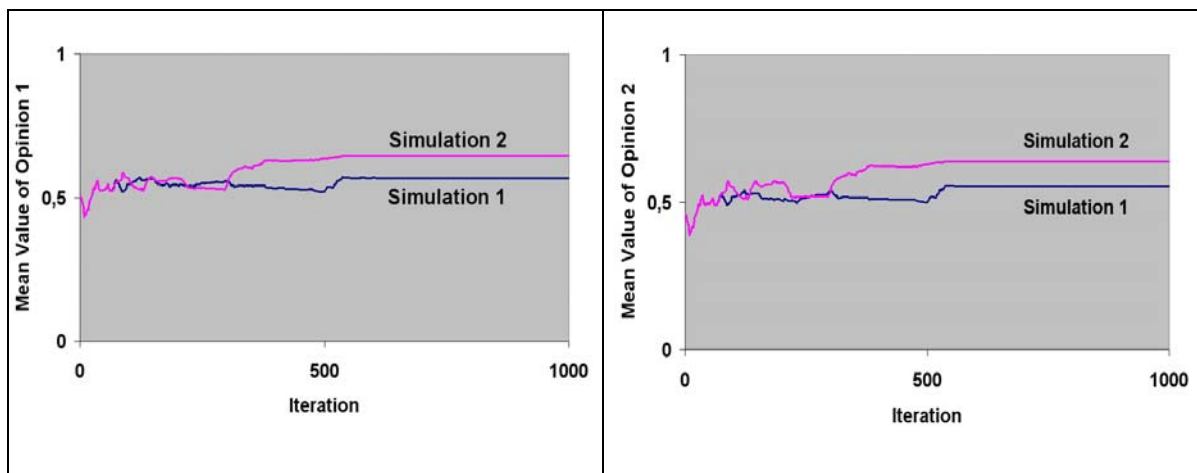
Παρατηρούμε ότι στη δεύτερη προσομοίωση, στη γνώμη της πλειοψηφίας καταλήγουν 73 πράκτορες και στις υπόλοιπες πέντε τελικές γνώμες ανήκουν συνολικά 27 πράκτορες. Αν ακολουθήσουμε τις τελικές τροχιές προς τα πίσω (από αριστερά προς τα δεξιά) θα μπορέσουμε να διακρίνουμε ότι στις τροχιές αυτές έχουν συμπεριληφθεί περισσότερες από μια πράκτορες. Άρα η συνένωση των πρακτόρων σε ομάδες είναι μια ιδιότητα που επίσης δε μπορεί να προβλεφθεί, λόγω της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες. Όσον αφορά στη γνώμη 2 δεν παρατηρείται κάποια μεγάλη μεταβολή στον αριθμό των ομάδων που σχηματίζονται (πρόκειται μόνο για μία ομάδα) είτε στον αριθμό των πρακτόρων που περιλαμβάνεται σε κάθε ομάδα.

Η διαφοροποίηση των ανωτέρω αποτελεσμάτων δεν είναι τυχαία για τη συγκεκριμένη προσομοίωση και το αρχικό προφίλ γνωμών που χρησιμοποιήθηκε. Παρόμοια αποτελέσματα, ποιοτικά και ποσοτικά, λάβαμε σε πέντε ακόμη διαφορετικά

προφίλ γνώμων, όπου προσομοίωση επαναλήφθηκε, με μια απειροελάχιστη μεταβολή στη γνώμη κάποιου πράκτορα. Σε όλες τις περιπτώσεις η ατομικές τροχιές των γνώμων ήταν εντελώς διαφορετικές, η μια από τις δύο γνώμες παρουσίαζε «σχεδόν ομοφωνία», άλλες φορές η γνώμη 1 και άλλες η γνώμη 2, ενώ η άλλη γνώμη παρουσίαζε κατάτμηση των γνώμων. Επαναλαμβάνοντας τις προσομοιώσεις με μια πολύ μικρή διαφοροποίηση στην αρχική γνώμη κάποιας πράκτορα, η διαμόρφωση του συστήματος των δύο γνώμων παρουσιάζει παρόμοια εικόνα και δυναμική, με τον αριθμό των πρακτόρων όμως που ανήκουν σε κάθε ομάδα να διαφέρει σε αρκετές περιπτώσεις, όπως περίπου και στο παράδειγμα που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Κατά συνέπεια όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν ως τώρα είναι έγκυρα και δεν «έτυχε» να εμφανιστούν για το συγκεκριμένο αρχικό προφίλ γνώμων που χρησιμοποιήθηκε, αλλά χαρακτηρίζουν τις υποθέσεις του μοντέλου και τις συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων του.

7.3.3. Ευαισθησία των Στατιστικών Δεικτών του Συστήματος (Μέτρα Θέσης και Διασποράς)

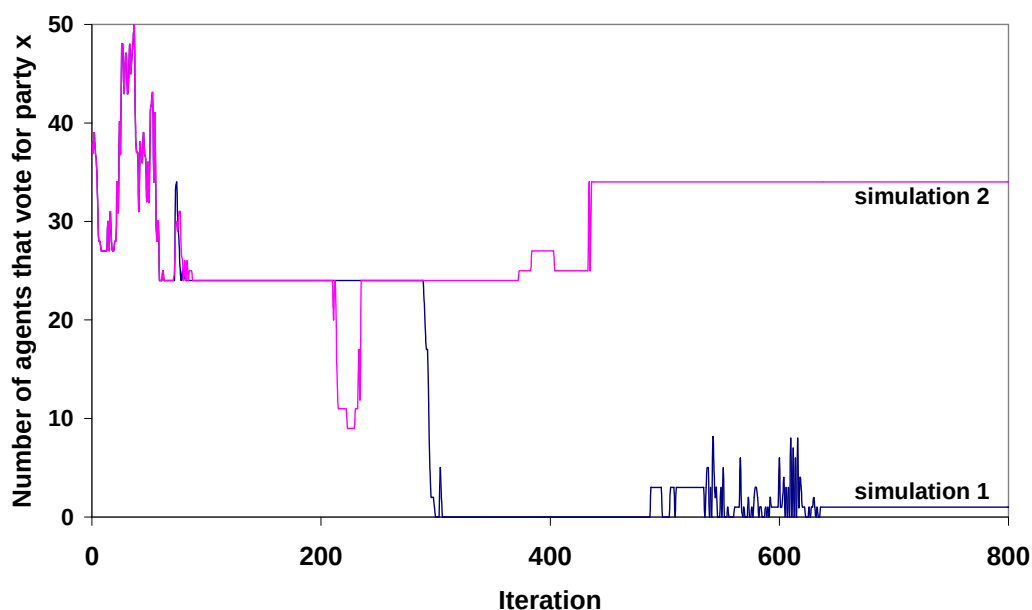
Συνεχίζουμε τη διερεύνηση των μακρο-ιδιοτήτων του μοντέλου με τη μελέτη της ευαισθησίας των στατιστικών δεικτών του συστήματος. Στον πίνακα 7.11 παρουσιάζονται οι μέση τιμή των γνώμων 1 και 2 στις δύο προσομοιώσεις.



Πίνακας 7.11: Μέση τιμή των γνώμων 1 και 2 για τις δύο προσομοιώσεις. Η διαφορά στην τελική κατάσταση (επανάληψη 800) ανάμεσα στις δύο προσομοιώσεις, για τη γνώμη 1 ισούται με 0.08 και για τη γνώμη 2 με 0.09.

Παρατηρούμε ότι για 70 περίπου επαναλήψεις οι μέσες τιμές των γνώμων των πρακτόρων παραμένουν ίσες. Στην πραγματικότητα η διαφορά τους είναι πολύ μικρή,

της τάξης του 10^{-10} , σταδιακά μεγαλώνει και γύρω στην επανάληψη 70 φτάνει να γίνει της τάξης του 10^{-2} . Κατόπιν μεγαλώνει περισσότερο και έτσι μπορεί να διακριθεί στα ανωτέρω διαγράμματα. Οι μέσοι όροι στη συνέχεια ακολουθούν διαφορετική πορεία και διαφέρουν στην τελική κατάσταση του συστήματος. Η τελική τους διαφορά είναι για τη γνώμη 1 ίση με 0.08 και για τη γνώμη 2 ίση με 0.09. Στον διάγραμμα 7.7 παρουσιάζεται η εξέλιξη του αριθμού των ατόμων που έχουν γνώμη 1 πάνω από 0.6 στις προσομοιώσεις 1 και 2.

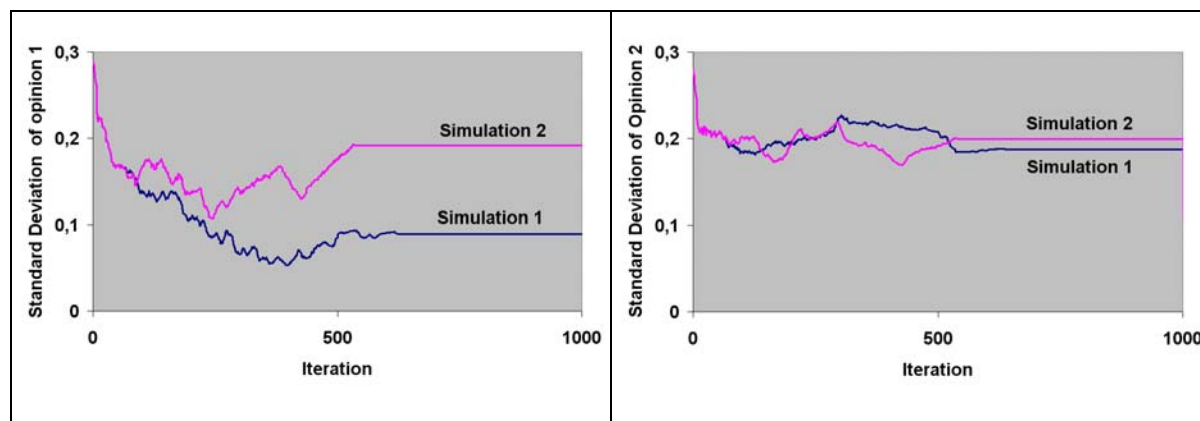


Διάγραμμα 7.7: Η εξέλιξη του αριθμού των ατόμων που έχουν γνώμη 1 πάνω από 0.6 στις προσομοιώσεις 1 και 2.

Αν υποθέσουμε ότι η γνώμη 1 αφορά τη γνώμη των πρακτόρων για το κόμμα X και ότι μία πράκτορας θα ψήφιζε το X κόμμα αν η γνώμη της έχει τιμή πάνω από 0.6, τότε ο αριθμός των ψήφων που θα λάμβανε το κόμμα X στην τεχνητή κοινωνία της προσομοίωσης 1 και της προσομοίωσης 2 φαίνεται στον προηγούμενο πίνακα. Παρατηρούμε ότι αν οι εκλογές λάμβαναν χώρα στην επανάληψη 220, τότε στην τεχνητή κοινωνία της προσομοίωσης 1 θα ψήφιζαν 24 πράκτορες το κόμμα X, ενώ 9 πράκτορες θα το ψήφιζαν στην τεχνητή κοινωνία της προσομοίωσης 2. Αντίθετα αν οι εκλογές πραγματοποιούνταν στην επανάληψη 600, που είναι και η τελική κατάσταση, στις εκλογές της τεχνητής κοινωνίας της προσομοίωσης 1 το κόμμα X θα λάμβανε 1 ψήφο ενώ στις εκλογές της προσομοίωσης 2 θα ελάμβανε 34 ψήφους. Μια απειροελάχιστη διαφορά στη γνώμη ενός πράκτορα είναι δυνατό να τροποποιήσει εξ' ολοκλήρου το

αποτέλεσμα των εκλογών! Υπενθυμίζεται ότι το αποτέλεσμα αυτό ισχύει για τις τιμές των παραμέτρων $\psi=1.5$ και $\varepsilon=0.1$, μόνο δηλαδή στην περίπτωση που οι πράκτορες έχουν ισχυρότερη τάση προς την εσωτερική τους ισορροπία.

Η ιδιότητα της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες παρατηρείται και στους στατιστικούς δείκτες της διασποράς. Στον πίνακα 7.12 μπορούμε να δούμε την εξέλιξη της τυπικής απόκλισης των γνώμων 1 και 2 για τις δύο προσομοιώσεις.



Πίνακας 7.12: Τυπική απόκλιση των γνώμων 1 και 2 στις προσομοιώσεις 1 και 2. Η διαφορά στην τελική κατάσταση (επανάληψη 800) ανάμεσα στις δύο προσομοιώσεις, για τη γνώμη 1 ισούται με 0.1 και για τη γνώμη 2 με 0.012.

Η μεταβολή κατά 10^{-10} της γνώμης 1 του πράκτορα 1 διαφοροποίησε την τυπική απόκλιση των γνώμων όλων των πρακτόρων κατά 0.1 στη γνώμη 1 και κατά 0.012 στη γνώμη 2. Η πολύ μεγάλη διαφορά στην τυπική απόκλιση της γνώμης 1 στις δύο προσομοιώσεις οφείλεται στο διαφορετικό αριθμό των πρακτόρων που ανήκουν στις 6 ομάδες της γνώμης 1 που σχηματίστηκαν, όπως φαίνεται στα διαγράμματα 7.4 και 7.5. Το ίδιο ισχύει και για όλα τα υπόλοιπα στατιστικά μέτρα θέσης και διασποράς, όπως η διάμεσος των γνώμων, η επικρατούσα τιμή, τα εκατοστημόρια, η διασπορά και ο συντελεστής μεταβολής. Διαπιστώνουμε λοιπόν, σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, ότι όλοι οι στατιστικοί δείκτες κεντρικής τάσης και διασποράς συμπεριφέρονται όπως και οι τροχιές των γνώμων των συγκεκριμένων ατόμων, παρουσιάζουν δηλαδή μικρές ή μεγάλες διαφορές στις προσομοιώσεις 1 και 2.

Από τη διεξαγωγή ικανού αριθμού προσομοιώσεων χρησιμοποιώντας διαφορετικά τυχαία αρχικά προφίλ γνώμων και κατόπιν επαναλαμβάνοντας την προσομοίωση με το ίδιο αρχικό προφίλ εισάγοντας μια απειροελάχιστη μεταβολή ίση με 10^{-10} στη μία γνώμη κάποιου πράκτορα, διαπιστώσαμε ότι κάθε στατιστικός δείκτης

παραλλάσσεται αλλά μέσα σε συγκεκριμένα όρια. Για παράδειγμα, η μέση τιμή της γνώμης 1 ή 2 μπορεί να μεταβληθεί μέχρι 0.09 και η τυπική απόκλιση μέχρι 0.018. Η γνώμη όμως κάποιας πράκτορα μπορεί να τροποποιηθεί μέχρι και τη μέγιστη δυνατή τιμή, δηλαδή 1, όπου η πράκτορας να καταλήγει στην τιμή 0 στην πρώτη προσομοίωση και 1 στη δεύτερη προσομοίωση. Οι αριθμοί αυτοί είναι διαφορετικοί για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου ψ και ε , για όλες τις περιπτώσεις όπου το σύστημα επιδεικνύει εφήμερο χάος.

Μετά την διερεύνηση της ιδιότητας της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες του συστήματος, στην επόμενη ενότητα θα υπολογίσουμε ένα δείκτη της χαοτικής συμπεριφοράς του συστήματος, τον εκθέτη Lyapunov.

7.4. Υπολογισμός του Εκθέτη Lyapunov

Στο προηγούμενο κεφάλαιο διαπιστώσαμε ότι το μοντέλο MER όταν ο συντελεστής ενδοατομικής ισορροπίας ψ είναι ίσος με 1.5 διαθέτει την ιδιότητα της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες. Υπάρχει η δυνατότητα να ποσοτικοποιηθεί την ιδιότητα αυτή, να πραγματοποιηθεί δηλαδή μέτρηση της ταχύτητας με την οποία η αρχική απειροελάχιστη μικρή παρέκκλιση στη γνώμη 1 της πρώτης πράκτορα μεγαλώνει και τροποποιεί την τροχιά των γνώμων όλων των πρακτόρων και του συνολικού συστήματος.

Ακόμη, η ιδιότητα της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες δεν οδηγεί αυτόματα και σε όλες τις περιπτώσεις σε μη προβλεψιμότητα. Στην πραγματικότητα υπάρχουν «ευαίσθητα» συστήματα που είναι προβλέψιμα. Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα το γραμμικό μετασχηματισμός

$$x_{n+1} = c \cdot x_n, \quad c \in \mathbb{R}, \quad n \in \mathbb{N}^*.$$

Ένα αρχικό λάθος μεγαθύνεται καθώς προχωρούν οι επαναλήψεις, αλλά με γραμμικό τρόπο και όχι εκθετικό και άρα παραμένει σημαντικά μικρότερο από το μέγεθος x_n (Peitgen et al, 1992). Στην περίπτωση αυτή έχουμε ασθενή ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες. Σε ένα χαοτικό όμως σύστημα που επιδεικνύει ισχυρή ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες το λάθος αυξάνει με εκθετικό τρόπο και γίνεται της ίδιας τάξης με το μέγεθος που μελετάμε και κατά συνέπεια δεν υπάρχει δυνατότητα πρόβλεψης.

Διευκρινίζουμε ότι γραμμική αύξηση σημαίνει για παράδειγμα ότι το 2 γίνεται 4, μετά 6, 8, 10 και ούτω καθ' εξής ή αλλιώς το 0.001 γίνεται 0.002, 0.003, 0.004, 0.005, 0.006 κλπ.. Αντίθετα εκθετική αύξηση σημαίνει ότι το 2 γίνεται 4, μετά 8, 16, 32 και ούτω καθ' εξής ή αλλιώς το 0.001 γίνεται 0.002, 0.004, 0.008, 0.016, 0.032, 0.064, 0.128, 0.256, 0.512, 1.024 κλπ. Δηλαδή όταν η αύξηση είναι γραμμική, το ένα χιλιοστό μετά από 10 χρονικές μονάδες γίνεται 10 φορές μεγαλύτερο, ενώ στην εκθετική αύξηση γίνεται 1024 φορές μεγαλύτερο.

Σύμφωνα με την επανάληψη της προσομοίωσης εισάγοντας ένα αρχικό λάθος στην αρχική συνθήκη, όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο της διατριβής, η διαφορά στα αποτελέσματα αποδεικνύει ότι το μοντέλο MER, για $\psi=1.5$ με την τοπολογία του πλήρους γράφου επιδεικνύει ισχυρή ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες και άρα είναι χαοτικό, δηλαδή μη προβλέψιμο. Παρόλο που η προηγούμενη παρουσίαση είναι αρκετή για τη θεμελίωση του χαοτικού χαρακτήρα του μοντέλου, στη συνέχεια θα υπολογίσουμε και το μέγιστο εκθέτη Lyapunov του συστήματος.

Η επιστήμη των δυναμικών συστημάτων και του χάους έχει εφοδιάσει την επιστημονική κοινότητα με ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη των χαοτικών συστημάτων, τους εκθέτες Lyapunov. Οι δείκτες αυτοί ποσοτικοποιούν την ιδιότητα της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες, μετρούν δηλαδή την ταχύτητα της αύξησης της απόκλισης της τάξης του 10^{-10} ή και μικρότερης ακόμη. Είδαμε στην ενότητα 7.3.1 ότι η διαφορά αυτή των γνώμων παραμένει απειροελάχιστα μικρή (της τάξης του 10^{-10}) για περίπου 70 επαναλήψεις και στη συνέχεια η «διαταραχή» αυτή μεγαλώνει σημαντικά και γίνεται του ίδιου μεγέθους (της ίδιας τάξης) με τις γνώμες. Θα μπορούσε το ίδιο φαινόμενο να συμβεί έπειτα από 10 ή και έπειτα από 1000 επαναλήψεις. Σε όλες τις περιπτώσεις το σύστημα θα ήταν ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες και άρα χαοτικό, αλλά ο βαθμός της ευαισθησίας θα ήταν διαφορετικός. Όπως θα αναλυθεί και στην παράγραφο 8.9, όπου θα παρουσιαστεί η έννοια του ορίζονται προβλεψιμότητας, ο υπολογισμός αυτής της ταχύτητας αύξησης του λάθους είναι απαραίτητος, ώστε όταν πραγματοποιούνται κάποιες βραχυπρόθεσμες προβλέψεις διεξάγοντας μια προσομοίωση, να είναι δυνατόν να γίνει έλεγχος και να εξασφαλισθεί ότι το μέγεθος του λάθους στις προβλέψεις αυτές είναι μικρό, έτσι ώστε να έχουν νόημα.

Οι εκθέτες Lyapunov αποτελούν ένα πανίσχυρο εργαλείο για το διαχωρισμό των περιπτώσεων ασταθούς και χαοτικής συμπεριφοράς των δυναμικών συστημάτων από αντίστοιχες σταθερής και προβλέψιμης συμπεριφοράς και μάλιστα για την

ποσοτικοποίηση της διαφοράς αυτής (Peitgen et al, 1992). Η έννοια των εκθετών Lyapunov έχει γενικευθεί και έχει βρει εφαρμογές στα περισσότερα δυναμικά συστήματα στα μαθηματικά και στις υπόλοιπες επιστήμες, και είναι πλέον μια από τις σημαντικότερες έννοιες για τον εντοπισμό, τη μέτρηση και την εκτίμηση της χαοτικής συμπεριφοράς.

Για τους εκθέτες Lyapunov έχουν αποδειχθεί μια σειρά από ιδιότητες, όπως ότι ο αριθμός των εκθετών Lyapunov είναι ίσος με τη διάσταση του δυναμικού συστήματος, ένας χαοτικός ελκυστής έχει τουλάχιστον ένα θετικό και ένα αρνητικό εκθέτη Lyapunov, για τα τρισδιάστατα δυναμικά συστήματα ο δεύτερος εκθέτης Lyapunov είναι ίσος με μηδέν και ο τρίτος αρνητικός, για συνεχή δυναμικά συστήματα τουλάχιστον ένας εκθέτης Lyapunov είναι ίσος με 0 και αντιστοιχεί στη διεύθυνση της κίνησης της τροχιάς, για συστήματα απώλειας ενέργειας (dissipative systems) το άθροισμα όλων των εκθετών Lyapunov είναι πάντα αρνητικό, αν το δυναμικό σύστημα δεν είναι χαοτικό τότε δεν έχει κανένα θετικό εκθέτη Lyapunov καθώς και μια σειρά άλλες ιδιότητες. Γενικά για ένα δυναμικό σύστημα που παράγει τροχιές σε κάποιο χώρο διάστασης n υπάρχουν n εκθέτες Lyapunov, ένας για κάθε διεύθυνση. Κάθε εκθέτης Lyapunov μετρά τη σύγκλιση ή την απόκλιση των τροχιών σε μια από τις διευθύνσεις του χώρου των φάσεων. Ένας αρνητικός εκθέτης Lyapunov δηλώνει το βαθμό σύγκλισης τροχιών στη διεύθυνση που του αντιστοιχεί ενώ ένας θετικός εκθέτης Lyapunov δηλώνει το βαθμό απόκλισης των τροχιών σε αυτήν τη διεύθυνση.

Για το μοντέλο MER έχουμε υποθέσει ότι έχει 100 πράκτορες στην παρούσα διατριβή και με την υπόθεση αυτή έχουμε διεξάγει τις προσομοιώσεις. Κατά συνέπεια το δυναμικό σύστημα του μοντέλου ανήκει στο χώρο των 200 διαστάσεων, δηλαδή στο R^{200} , αφού κάθε μία από τις 100 πράκτορας έχει δύο γνώμες και άρα το σύστημα έχει 200 εκθέτες Lyapunov. Υπάρχουν μέθοδοι εκτίμησης όλου του φάσματος των εκθετών Lyapunov, αν και ως τώρα δεν έχουν εφαρμοστεί σε συστήματα με τόσο μεγάλη διάσταση. Στην παρούσα διατριβή θα περιοριστούμε στην εκτίμηση του **μέγιστου εκθέτη Lyapunov (maximal Lyapunov exponent)**, που αντιστοιχεί στη διεύθυνση της μεγαλύτερης απόκλισης των τροχιών και από μόνος του χαρακτηρίζει τη χαοτική ή όχι συμπεριφορά του δυναμικού συστήματος. Ο υπολογισμός του μέγιστου εκθέτη Lyapunov είναι αρκετός για το χαρακτηρισμό και την ποσοτικοποίηση της χαοτικής συμπεριφοράς του μοντέλου MER καθώς και για τον υπολογισμό του ορίζονται προβλεψιμότητας, όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Ο υπολογισμός αυτός θα μας δώσει το μέτρο της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες και θα επαληθεύσει ακόμη

μια φορά την ιδιότητα της μη προβλεψιμότητας που θεμελιώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Ακόμη, επαναλαμβάνοντας τον υπολογισμό του εκθέτη Lyapunov στο κεφάλαιο 8 για την τοπολογία του κυψελοειδούς αυτομάτου, θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε τον ορίζοντα προβλεψιμότητας του συστήματος και άρα θα καταστεί δυνατή κάποια βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη για την εξέλιξη του συστήματος. Μια τέτοια βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη δεν είναι εφικτή στην περίπτωση της τοπολογίας του πλήρους γράφου, μιας και όπως θα αναλύσουμε στη συνέχεια, το χάος είναι εφήμερο και το σύστημα καταλήγει σε μια τελική κατάσταση όπου σταθεροποιείται.

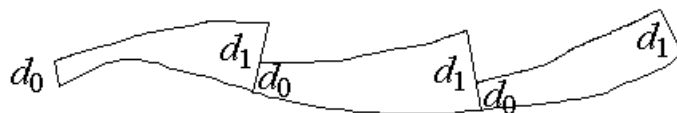
Η ιδιότητα των χαοτικών δυναμικών συστημάτων να έχουν ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες κάνει τροχιές που αρχικά είναι πολύ κοντά να αποκλίνουν γρήγορα και μάλιστα εκθετικά.. Αν το σύστημα είναι χαοτικό και οι τροχιές αποκλίνουν ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov είναι θετικός. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε τον τρόπο υπολογισμού του μέγιστου εκθέτη Lyapunov. Για τον υπολογισμό του θα χρειαστεί να ορίσουμε μια σειρά από έννοιες, όπως ο τοπικός αριθμός Lyapunov, ο λογάριθμός του, ο οποίος ονομάζεται τοπικός εκθέτης Lyapunov και το όριο των τοπικών εκθετών Lyapunov καθώς ο χρόνος τείνει στο άπειρο, το οποίο είναι ο καθολικός εκθέτης Lyapunov. Όλες αυτές οι έννοιες αφορούν το μέγιστο εκθέτη Lyapunov στην ανάλυση που ακολουθεί. Αντίστοιχοι ορισμοί υπάρχουν και για τους άλλους εκθέτες Lyapunov, εκτός από τον μέγιστο, δε θα επεκταθούμε όμως σε αυτούς στην παρούσα διατριβή.

Σε κάθε σύστημα που εξελίσσεται στο χρόνο, μπορούμε οποιαδήποτε στιγμή να θεωρήσουμε δύο γειτονικά σημεία που απέχουν μεταξύ τους μια πολύ μικρή απόσταση. Καθένα από τα σημεία αυτά ακολουθεί σύμφωνα με τις εξισώσεις του συστήματος μια τροχιά. Αν υπολογίσουμε που θα βρίσκονται τα δύο αυτά σημεία την επόμενη χρονική στιγμή, μπορούμε να μετρήσουμε αν η απόστασή τους έχει αυξηθεί ή έχει μειωθεί. Ο λόγος $\frac{d_0}{d_1}$ της απόστασής τους την επόμενη στιγμή d_1 προς την απόσταση την

προηγούμενη στιγμή d_0 είναι ο **τοπικός αριθμός Lyapunov (local Lyapunov number)**.

Κατά συνέπεια, αν αυτός είναι μεγαλύτερος της μονάδας τότε η τροχιά στο σημείο αυτό αποκλίνει, δηλαδή το παραμικρό λάθος αυξάνει και αν είναι μικρότερος της μονάδας η τροχιά συγκλίνει και κάθε λάθος μικραίνει. Ο λογάριθμος του λόγου αυτού είναι ο **τοπικός εκθέτης Lyapunov (local Lyapunov exponent)**. Αν ένας αριθμός είναι μεγαλύτερος της μονάδας, ο λογάριθμός του είναι μεγαλύτερος του μηδενός και αντίστροφα αν είναι μικρότερος της μονάδας ο λογάριθμός του είναι μικρότερος του

μηδενός. Κατά συνέπεια, θετικός τοπικός εκθέτης Lyapunov σημαίνει ότι εκείνη τη χρονική στιγμή το σύστημα μεγαλώνει τα λάθη, ενώ αρνητικός ότι το σύστημα μικραίνει τα λάθη. Στο επόμενο διάγραμμα 7.8 φαίνεται σχηματικά μια τροχιά που αυξάνει την απόσταση d_0 .



Διάγραμμα 7.8: Σχηματικό παράδειγμα ενός συστήματος όπου μια μικρή απόκλιση d_0 αυξάνεται και στις τρεις χρονικές στιγμές που απεικονίζονται σε d_1 .

Στις περισσότερες περιπτώσεις συστημάτων, τα λάθη ή αλλιώς οι αποκλίσεις, άλλες χρονικές στιγμές αυξάνουν και άλλες μειώνονται. Έχει αποδειχθεί (Oseledec, 1968) ότι αν ο μέσος όρος των τοπικών εκθετών Lyapunov συγκλίνει σε έναν αριθμό, τότε αυτός είναι ανεξάρτητος από το σημείο που επιλέγουμε να μετρήσουμε τις αποκλίσεις και χαρακτηρίζει το σύστημα. Ο αριθμός αυτός είναι ο **καθολικός εκθέτης Lyapunov (global Lyapunov exponent)** και είναι ο πιο αξιόπιστος δείκτης μέτρησης της δυνατότητας πρόβλεψης για ένα δυναμικό σύστημα.

Με άλλα λόγια, ο τοπικός αριθμός Lyapunov, δηλαδή ο λόγος L που μας δίνει την αύξηση του λάθους για μια συγκεκριμένη επανάληψη είναι ένα μέτρο του «τεντώματος» (stretching) του δυναμικού συστήματος. Αν ο λόγος αυτός είναι μεγαλύτερος του 1 το λάθος αυξάνεται, αν είναι μικρότερος του 1 μειώνεται. Ο τοπικός εκθέτης Lyapunov είναι ο λογάριθμος του L και όταν ο μέσος όρος των τοπικών εκθετών Lyapunov (running average of local Lyapunov exponent) συγκλίνει σε έναν αριθμό, τότε ο αριθμός αυτός είναι ο καθολικός εκθέτης Lyapunov²⁰. Ο δείκτης αυτός μας δίνει το μέση εκθετική αύξηση της διαφοράς δύο γειτονικών αρχικών συνθηκών, ή αλλιώς το μέσο «τέντωμα» του χώρου. Μια πιο λεπτομερή μαθηματική περιγραφή που συμπεριλαμβάνει και όλες τις τεχνικές λεπτομέρειες των τοπικών και του καθολικού εκθέτη Lyapunov δίνεται στο παράρτημα 4.

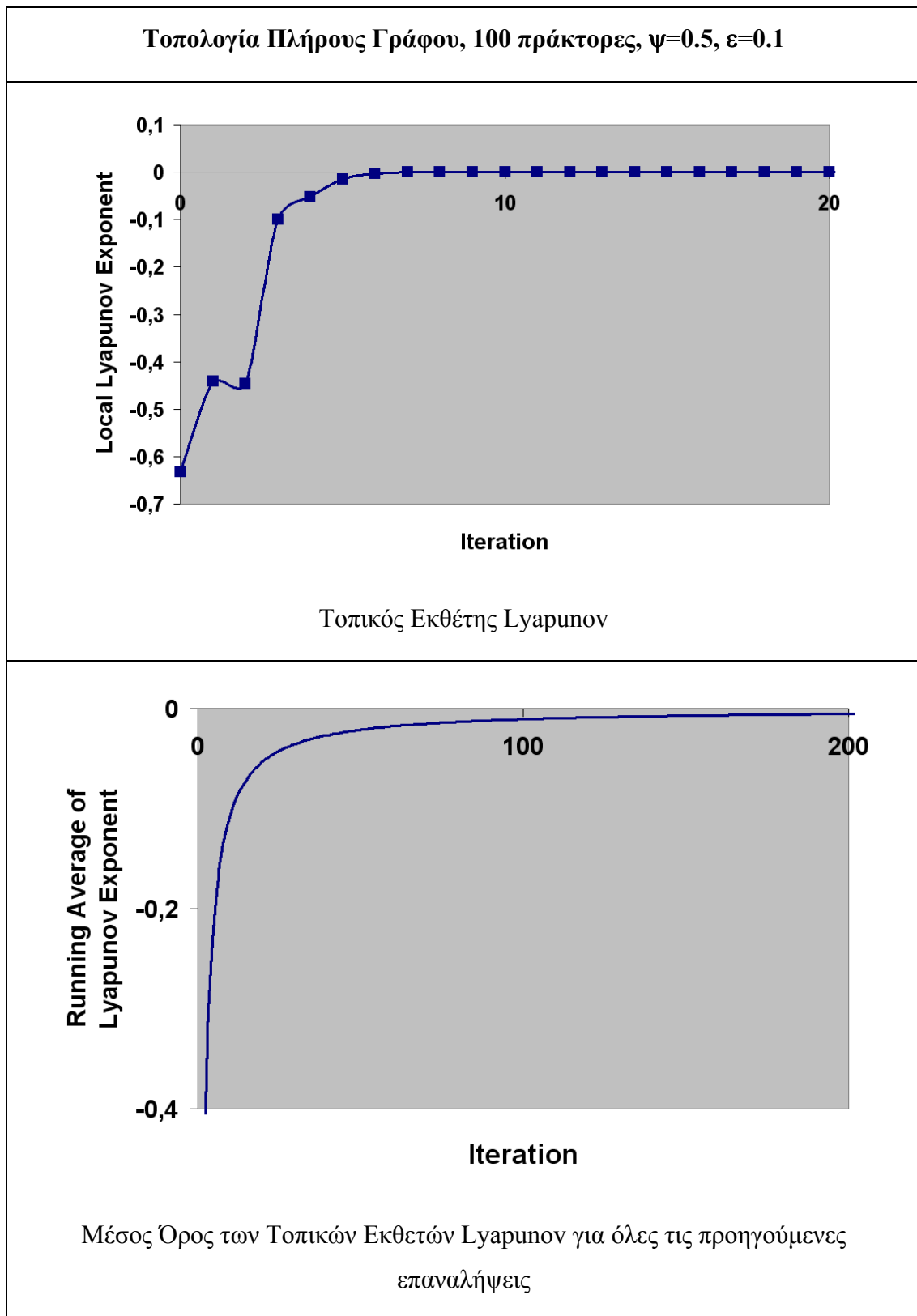
Συνεπώς, αν ο εκθέτης Lyapunov είναι θετικός, αυτό σημαίνει ότι απειροελάχιστα μικρά λάθη αυξάνονται εκθετικά σε κάθε επανάληψη και οι κοντινές τροχιές απομακρύνονται, ενώ αρνητικός εκθέτης σημαίνει ότι οι κοντινές τροχιές

²⁰ Στο εξής όταν γράφουμε εκθέτης Lyapunov θα αναφερόμαστε στον καθολικό εκθέτη Lyapunov.

έλκονται μεταξύ τους και το λάθος μικραίνει. Θετικός εκθέτης Lyapunov σημαίνει ότι η παραμικρή διαταραχή του συστήματος μεγαλώνει εκθετικά και η δυνατότητα πρόβλεψης χάνεται, δηλαδή ότι το σύστημα είναι χαοτικό. Αρνητικός εκθέτης Lyapunov σημαίνει ότι το σύστημα κατασταλάζει σε ένα σταθερό σημείο (fixed point) ή ένα περιοδικό κύκλο (periodic cycle) (Sprott, 2003). Μηδενικός εκθέτης Lyapunov δείχνει μια οριακά σταθερή τροχιά (marginally or neutrally stable orbit) (Kiel & Elliott, 1997/2000).

Όπως θα δούμε στη συνέχεια και όπως άλλωστε αναμενόταν, για όλες τις περιπτώσεις του ψ και για την τοπολογία επικοινωνίας του πλήρους γράφου, ο εκθέτης Lyapunov ισούται με τον αριθμό μηδέν, ο μέσος όρος δηλαδή των τοπικών εκθετών Lyapunov συγκλίνει στο μηδέν. Αυτό οφείλεται στο ότι στο σύστημα τερματίζει σε μια σταθερή τελική κατάσταση. Από το σημείο του τερματισμού και έπειτα, οποιαδήποτε μεταβολή στην τροχιά των πρακτόρων ούτε μεγαλώνει, ούτε μικραίνει. Άρα ο τοπικός εκθέτης Lyapunov ισούται με μηδέν. Αφού ο (καθολικός) εκθέτης Lyapunov προκύπτει από το μέσο όρο των τοπικών εκθετών, ότι κι αν ήταν οι τοπικοί εκθέτες για τις αρχικές επαναλήψεις, από τη στιγμή που το σύστημα τερματίζει και προσθέτουμε τους μηδενικούς εκθέτες, ο μέσος όρος αναγκαστικά συγκλίνει στο μηδέν. Έχει επίσης ελεγχθεί ότι ο αριθμός αυτός είναι ανεξάρτητος από τις αρχικές συνθήκες της προσομοίωσης καθώς και από το μέγεθος του λάθους (όταν αυτό τείνει στο 0) και κατά συνέπεια ο υπολογισμός είναι αξιόπιστος.

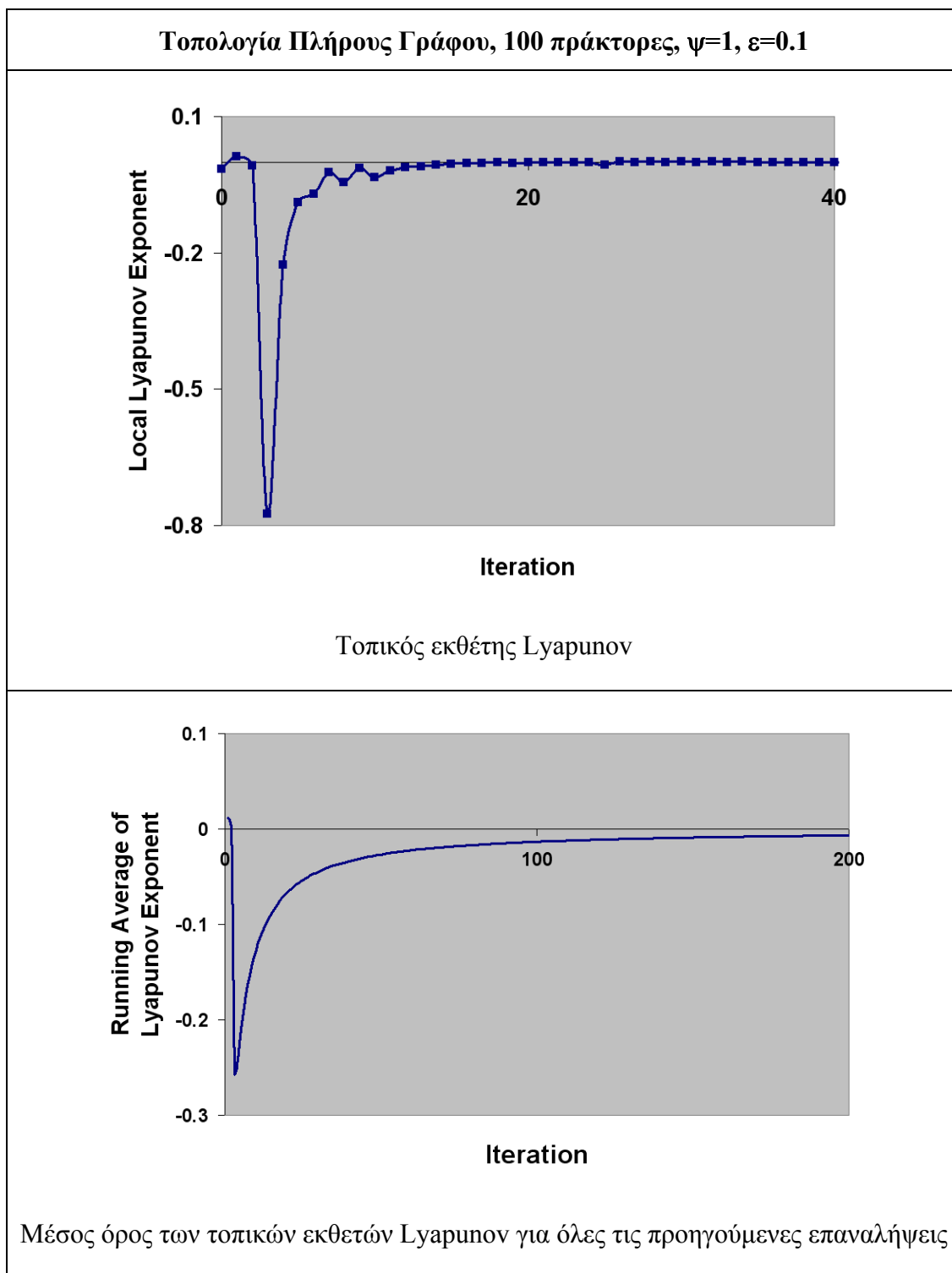
Στον πίνακα 7.13 παρουσιάζεται ο τοπικός εκθέτης Lyapunov ανά επανάληψη καθώς και ο (καθολικός) εκθέτης Lyapunov, ο μέσος όρος δηλαδή των τοπικών εκθετών για όλες τις προηγούμενες επαναλήψεις (running average of Lyapunov exponent) για $\psi=0.5$ και $\varepsilon=0.1$.



Πίνακας 7.13: Ο τοπικός εκθέτης Lyapunov ανά επανάληψη (iteration) και ο μέσος όρος των τοπικών εκθετών Lyapunov για όλες τις προηγούμενες επαναλήψεις (running average of local Lyapunov exponent) για $\psi=0.5$ και $\varepsilon=0.1$

Στο πρώτο διάγραμμα του πίνακα 7.12 παρατηρούμε ότι ο τοπικός εκθέτης Lyapunov είναι αρνητικός για τις πρώτες 7 επαναλήψεις και στη συνέχεια γίνεται ίσος με μηδέν. Το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο, διότι, όπως φαίνεται στον πίνακα 7.1, οι τροχιές των γνωμών των πρακτόρων συγκλίνουν για τις πρώτες 7 επαναλήψεις και στη συνέχεια παραμένουν σταθερές μιας και το σύστημα έφτασε σε μια τελική σταθερή κατάσταση. Η σύγκλιση των τροχιών δείχνει ότι και οποιοδήποτε λάθος σε κάποια τροχιά θα μειωθεί στη συνέχεια, άρα ο τοπικός εκθέτης Lyapunov θα είναι αρνητικός. Στο δεύτερο διάγραμμα του πίνακα 7.12 παρατηρούμε τους μέσους όρους των τοπικών εκθετών. Αρχικά οι τοπικοί εκθέτες είναι αρνητικοί και άρα ο μέσος όρος που προκύπτει είναι επίσης αρνητικός. Στη συνέχεια οι τοπικοί εκθέτες γίνονται ίσοι με μηδέν αλλά ο μέσος όρος παραμένει αρνητικός πλησιάζοντας την τιμή μηδέν. Χρειάζεται μεγάλο αριθμό επαναλήψεων και αρκετά «μηδενικά» των τοπικών εκθετών να προστεθούν στο μέσο όρο για να συγκλίνει αυτός τελικά στο μηδέν. Το όριο αυτών των μέσων όρων, καθώς ο αριθμός των επαναλήψεων γίνεται πολύ μεγάλος, ισούται με μηδέν, άρα ο (καθολικός) εκθέτης Lyapunov είναι μηδέν και το σύστημα είναι απολύτως προβλέψιμο.

Στον πίνακα 7.14 παρουσιάζεται ομοίως ο τοπικός εκθέτης Lyapunov και ο (καθολικός) εκθέτης Lyapunov για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$.

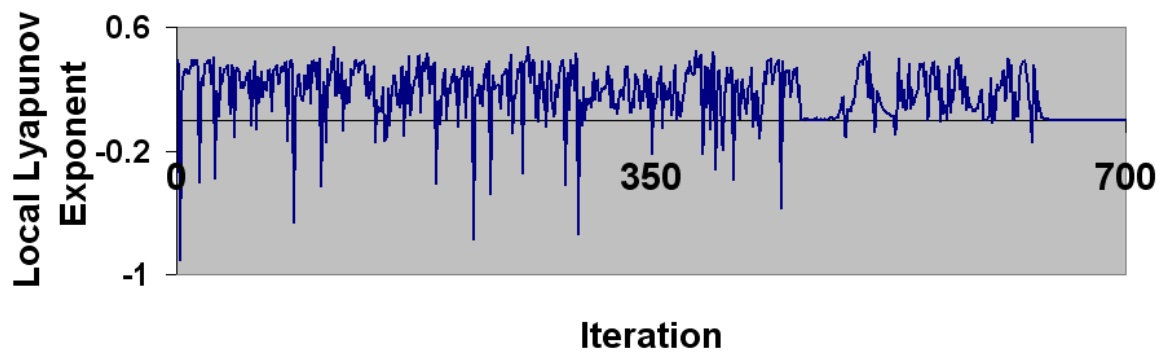


Πίνακας 7.14: Ο τοπικός εκθέτης Lyapunov ανά επανάληψη (iteration) και ο μέσος όρος των τοπικών εκθετών Lyapunov για όλες τις προηγούμενες επαναλήψεις (running average of local Lyapunov exponent) για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$

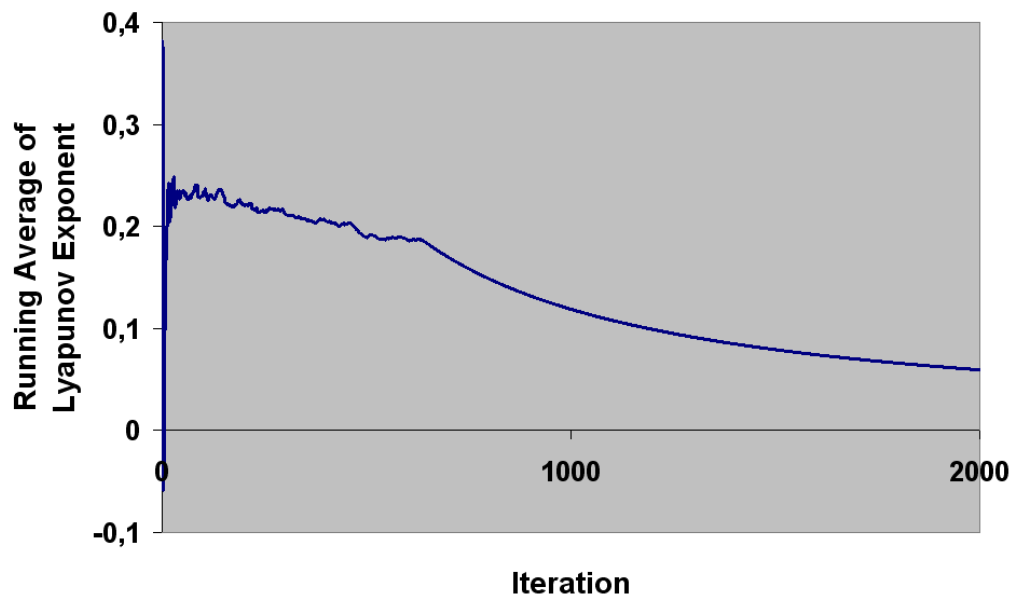
Τα συμπεράσματα είναι παρόμοια όπως και στην περίπτωση του $\psi=0.5$. Οι τοπικοί εκθέτες Lyapunov είναι αρνητικοί για περίπου 15 επαναλήψεις, άρα το σύστημα

συμπιέζει τις τροχιές και είναι προβλέψιμο και στη συνέχεια σταθεροποιείται, άρα ο (καθολικός) εκθέτης Lyapunov ισούται με μηδέν. Το ότι η τελική κατάσταση για $\psi=1$ είναι μια περιοδική κίνηση και όχι σταθερή κατάσταση, όπως είναι για $\psi=0.5$, δε διαφοροποιεί τον εκθέτη Lyapunov και κατά συνέπεια τη δυνατότητα πρόβλεψης. Τα αποτελέσματα όμως διαφέρουν για την περίπτωση όπου $\psi=1.5$, όπως φαίνεται στον πίνακα 7.15.

Τοπολογία Πλήρους Γράφου, 100 πράκτορες, $\psi=1.5$, $\varepsilon=0.1$



Τοπικός εκθέτης Lyapunov.



Μέσος όρος των τοπικών εκθετών Lyapunov των προηγούμενων επαναλήψεων.

Πίνακας 7.15: Τοπικός εκθέτης Lyapunov ανά επανάληψη (iteration) και μέσος όρος των τοπικών εκθετών Lyapunov για όλες τις προηγούμενες επαναλήψεις (running average of local Lyapunov exponent) για $\psi=1.5$ και $\varepsilon=0.1$

Για $\psi=1.5$ οι τοπικοί εκθέτες είναι άλλοτε θετικοί και άλλοτε αρνητικοί για ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων (περίπου 600) και στη συνέχεια γίνονται ίσοι με μηδέν. Ο μέσος όρος των εκθετών είναι θετικός (δεύτερο διάγραμμα του πίνακα 7.14), μάλιστα παίρνοντας τιμές μεγαλύτερες από 0.2 για τις πρώτες 300 επαναλήψεις, στη συνέχεια μειώνεται και από την επανάληψη 700 και έπειτα, όπου προστίθενται μηδενικά στο μέσο όρο, αυτός φθίνει και τείνει στο μηδέν. Κατά συνέπεια ο (καθολικός) εκθέτης Lyapunov είναι ίσος με μηδέν

Σε όλες τις περιπτώσεις των τιμών του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ , ο εκθέτης Lyapunov ισούται με μηδέν, για την τοπολογία του πλήρους γράφου. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού το σύστημα σταθεροποιείται σε μια τελική κατάσταση, είτε σε ένα σημείο (του χώρου R^{200}) είτε σε μια περιοδική κίνηση. Υπάρχει όμως μια σημαντική διαφορά στον τρόπο της σύγκλισης. Για $\psi=0.5$ και $\psi=1$ οι τοπικοί εκθέτες Lyapunov είναι αρνητικοί για ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων, όπως αναμενόταν μιας και οι κοντινές τροχιές των γνωμών πλησιάζουν η μία την άλλη και άρα μικρά λάθη σε οποιαδήποτε τροχιά μικραίνουν και τείνουν στο μηδέν. Αντιθέτως, για $\psi=1.5$, οι τοπικοί εκθέτες Lyapunov είναι θετικοί για ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων. Αυτό σημαίνει ότι κοντινές τροχιές απομακρύνονται και το σύστημα είναι ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες. Η κίνηση των τροχιών των γνωμών είναι χαοτική για ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων πριν το σύστημα κατασταλάξει σε ένα μη χαοτικό ελκυστή, ένα σταθερό σημείο του χώρου R^{200} . Το σημείο αυτό είναι διαφορετικό ακόμη και για οποιαδήποτε απειροελάχιστη διαφορά στις αρχικές συνθήκες. Συνεπώς η τελική κατάσταση που φτάνει το σύστημα είναι μη προβλέψιμη. Η κατάσταση αυτή αναφέρεται στη βιβλιογραφία και σαν *ευαισθησία στην τελική κατάσταση (final state sensitivity)* (Peitgen et al 1992:757) ή *εφήμερο χάος (transient chaos)* (Sprott 2003:173). Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν υπάρχουν ταυτόχρονα πολλοί ελκυστές. Οι ελκυστές αυτοί μπορεί να είναι «παράξενοι» (Cambel, 1993) ή σταθερά σημεία.. Στο μοντέλο MER και για την τοπολογία του πλήρους γράφου οι ελκυστές είναι σημεία του χώρου R^{200} , δηλαδή οι τροχιές των γνωμών συγκλίνουν σε διάφορες τελικές καταστάσεις.

Οι τοπικοί και ο καθολικός εκθέτης Lyapunov δε διαφέρει ουσιαστικά, είτε ποιοτικά είτε ποσοτικά για τις περιπτώσεις του φράγματος εμπιστοσύνης $\varepsilon=0.2$ και $\varepsilon=0.3$

από την περίπτωση $\varepsilon=0.1$ που εξετάσαμε, για το λόγο αυτό η παρουσίασή τους παραλείπεται. Στην επόμενη ενότητα θα υπολογίσουμε την εντροπία της πληροφορίας για μοντέλο MER με τοπολογία επικοινωνίας του πλήρους γράφου και τις τιμές των παραμέτρων που παρουσιάσαμε ως τώρα, η οποία αποτελεί ένα δείκτη απόκλισης από την ισορροπία και αυτοοργάνωσης του συστήματος.

7.5. Υπολογισμός της Εντροπίας του Συστήματος

Η έννοια της εντροπίας είναι μία από τις σημαντικότερες έννοιες στις φυσικές επιστήμες, λόγω της διατύπωσης του δεύτερου θερμοδυναμικού αξιώματος, σύμφωνα με το οποίο σε μία μεταβολή ενός απομονωμένου συστήματος η εντροπία πάντοτε αυξάνεται. Για την έννοια της εντροπίας έχουν δοθεί μια σειρά ορισμών. Στα πλαίσια της θερμοδυναμικής η εντροπία ορίζεται ως το πηλίκο της απειροστής προσδιδόμενης θερμότητας, σε μια **αντιστρεπτή μεταβολή**, προς τη θερμοκρασία ($\delta q = Tds$). Από αυτό προκύπτει ότι η ροή θερμότητας προς ένα σύστημα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εντροπίας του. Είναι αρκετά δύσκολο να δοθεί κάποια φυσική σημασία στην έννοια αυτή, καθώς δεν αντιστοιχεί προς κάποιο αισθητό στον άνθρωπο μέγεθος. Άλλοι ορισμοί για την έννοια της εντροπίας είναι η ικανότητα ενός συστήματος να φτάνει στην ισορροπία, ο βαθμός τάξης ή αταξίας ενός συστήματος, ένας δείκτης μετάδοσης της πληροφορίας κ.λπ. Στα πλαίσια της θεωρίας πληροφοριών η εντροπία αποτελεί ένα μέτρο αβεβαιότητας που διακατέχει ένα σύστημα. Ο ορισμός που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια δόθηκε από τον Shannon το 1938 και για το λόγο αυτό ονομάζεται και εντροπία του Shannon. Πλέον η έννοια της εντροπίας και στη θερμοδυναμική μπορεί να ιδωθεί ως εφαρμογή της εντροπίας στη θεωρία πληροφοριών. Η εντροπία της πληροφορίας ποσοτικοποιεί την πληροφορία που περιέχει ένα σύνολο δεδομένων.

Σύμφωνα με τον Cambel (1993:129-130) δεν υπάρχει καλύτερος ορισμός για την έννοια της εντροπίας που να ισχύει για όλες τις περιπτώσεις εφαρμογής της έννοιας αυτής. Ο συνδυαστικός κρίκος ανάμεσα στους διάφορους ορισμούς είναι ότι η εντροπία αποτελεί δείκτη απόκλισης από την ισορροπία και χαοτικής συμπεριφοράς, εκφράζει δηλαδή το μέτρο της αταξίας ενός συστήματος. Ο ίδιος προτείνει στον καθένα να χρησιμοποιήσει τον καλύτερα προσαρμοσμένο στην περίπτωση που θέλει να μελετήσει και δίνει κάποιους.

Για αν εξετάσουμε τη συμπεριφορά του συστήματος στο μοντέλο MER καθώς και το βαθμό αυτοοργάνωσής του, στη συνέχεια θα υπολογίσουμε την *εντροπία της*

πληροφορίας (*information entropy*) του συστήματος ή αλλιώς *εντροπία του Shannon* (*Shannon's Entropy*) για τις τιμές των παραμέτρων ψ και ε που μελετήθηκαν στις προηγούμενες ενότητες και την τοπολογία του πλήρους γράφου.

Στο μοντέλο MER θα μπορούσαμε να πούμε ότι αν χωρίσουμε το διάστημα $[0,1]$ σε 100 ίσα διαστήματα και ρωτούσαμε κάποιον για να μας πει σε πιο διάστημα ανήκει μια γνώμη, η εντροπία της πληροφορίας θα ήταν ο μέσος αριθμός ερωτήσεων που θα χρειαζόταν ώσπου να βρεθεί το διάστημα αυτό. Όταν η εντροπία της πληροφορίας αυξάνεται, το σύστημα γίνεται λιγότερο ομοιογενές και περισσότερο αποδιοργανωμένο (στο MER υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός ομάδων) ενώ όταν μειώνεται το σύστημα γίνεται περισσότερο ομοιόμορφο και οργανωμένο (Lugan, 1993).

Για τον υπολογισμό της εντροπίας της πληροφορίας (Peitgen et al, 1992) χρησιμοποιούμε τον τύπο

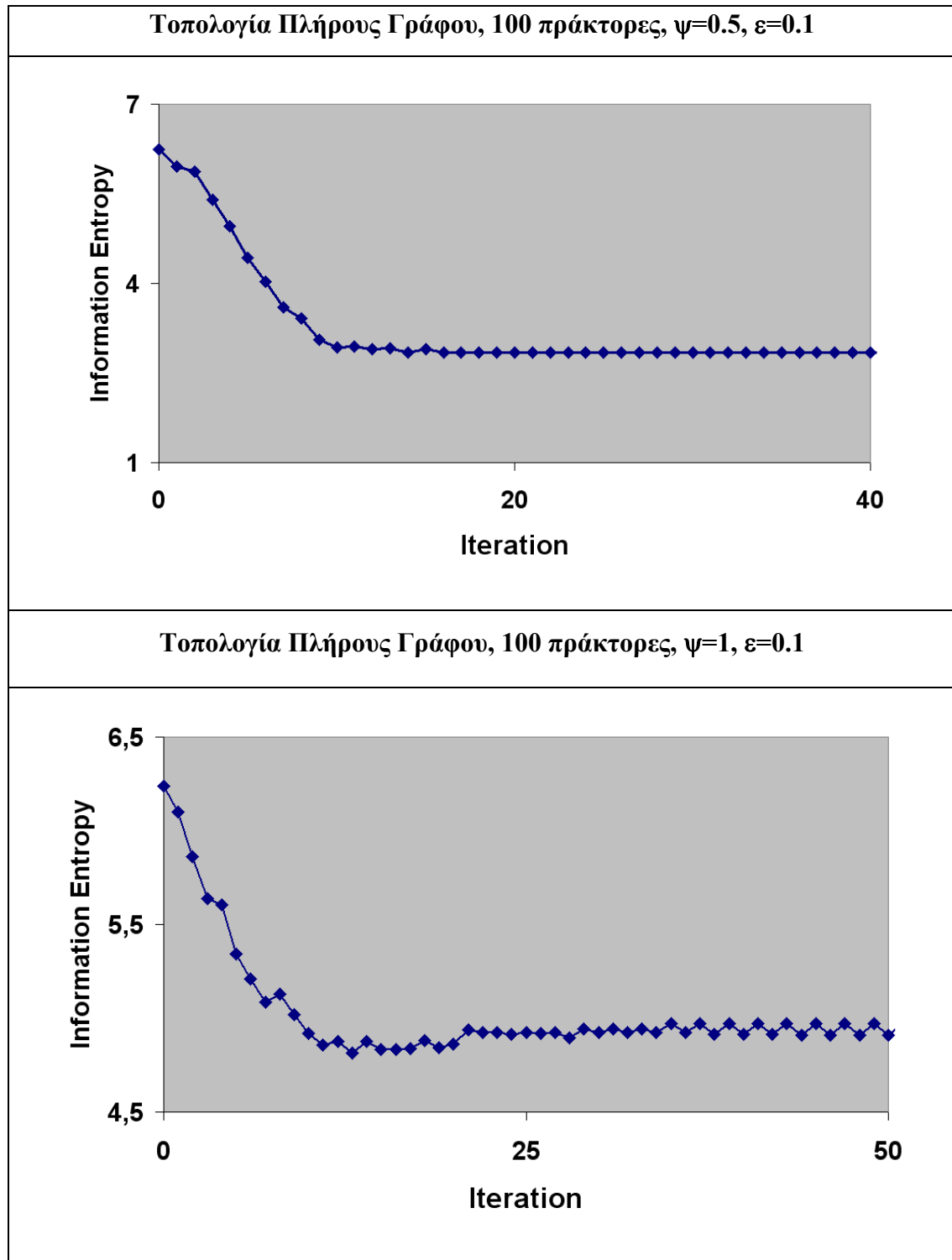
$$I = - \sum_{k=1}^{100} P(\mathbf{B}_k) \cdot \log_2(P(\mathbf{B}_k))$$

Ο αλγόριθμος υπολογισμού έχει ως εξής. Χωρίζουμε το διάστημα $[0,1]$ σε 100 μικρότερα διαστήματα²¹ ίσου μήκους $\mathbf{B}_1=[0, 0.01]$, $\mathbf{B}_2=[0.01, 0.02]$ κλπ. δηλαδή $\mathbf{B}_k=[(k-1)/100, k/100]$, $k=1,2,...100$. Για κάθε διάστημα $\mathbf{B}_k$ υπολογίζουμε την πιθανότητα $P(\mathbf{B}_k)$ της γνώμης ενός πράκτορα να ανήκει στο διάστημα $\mathbf{B}_k$ διαιρώντας τον αριθμό των πρακτόρων που η γνώμη τους ανήκει στο $\mathbf{B}_k$ με το συνολικό αριθμό των πρακτόρων. Προσθέτουμε για τα 100 διαστήματα $\mathbf{B}_k$ το γινόμενο των πιθανοτήτων $P(\mathbf{B}_k)$ με το λογάριθμο με βάση 2 της $P(\mathbf{B}_k)$. Αυτό που προκύπτει είναι μια αρνητική τιμή που είναι το αντίθετο της εντροπίας της πληροφορίας. Τοποθετώντας ένα αρνητικό πρόσημο μπροστά στον τύπο του αθροίσματος λαμβάνουμε τον τύπο της εντροπίας της πληροφορίας, ο οποίος όπως προαναφέραμε μετρά το βαθμό αυτοοργάνωσης του συστήματος. Για το μοντέλο MER η μέτρηση αυτή αφορά την οργάνωση των γνώμων

²¹ Ο αριθμός 100 επιλέχθηκε με κριτήριο τη διεξαγωγή των υπολογισμών μέσα σε εύλογο χρονικό διάστημα από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Θα μπορούσαμε να χωρίσουμε το διάστημα σε 1000 μικρότερα διαστήματα. Η ακρίβεια των υπολογισμών είναι ικανοποιητική για μερικές εκατοντάδες χιλιάδες επαναλήψεις. Εξαιτίας της διαδικασίας Ανακλιμάκωσης για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων η ακρίβεια υπολογισμού της εντροπίας δεν είναι πλέον ικανοποιητική και στην περίπτωση αυτή επιβάλλεται να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερος αριθμός διαστημάτων.

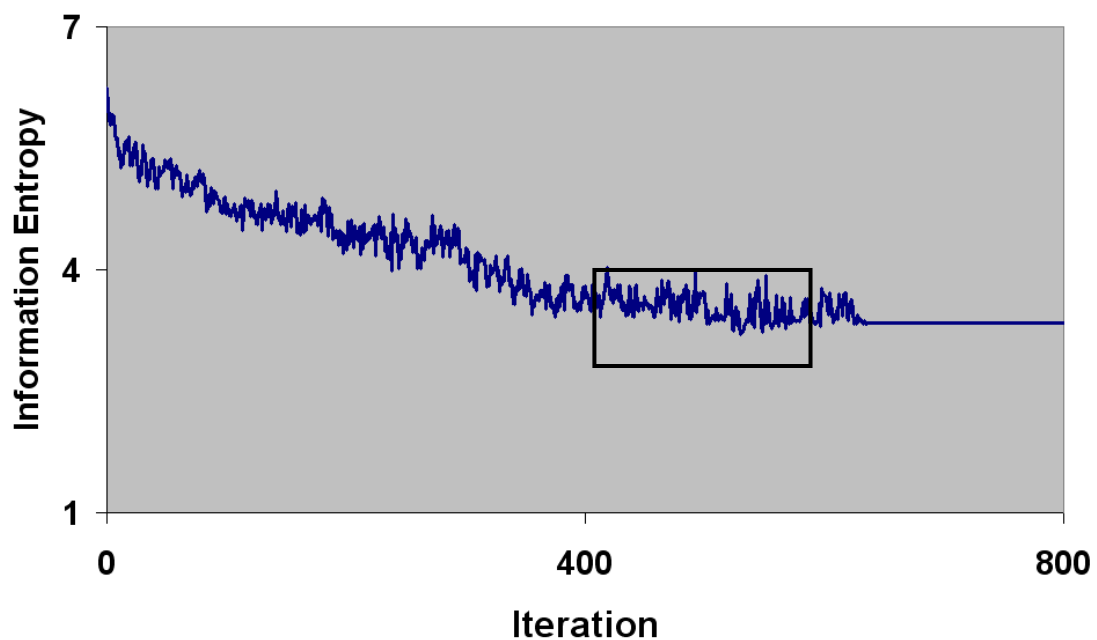
των πρακτόρων σε ομάδες. Οργάνωση σε λίγες ομάδες σημαίνει χαμηλή εντροπία ενώ οργάνωση σε πολλές υψηλή εντροπία.

Στον πίνακα 7.16 παρουσιάζεται ο υπολογισμός της εντροπίας της πληροφορίας για να μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος καθώς και η ικανότητά του να αυτό-οργανώνεται (self-organise).



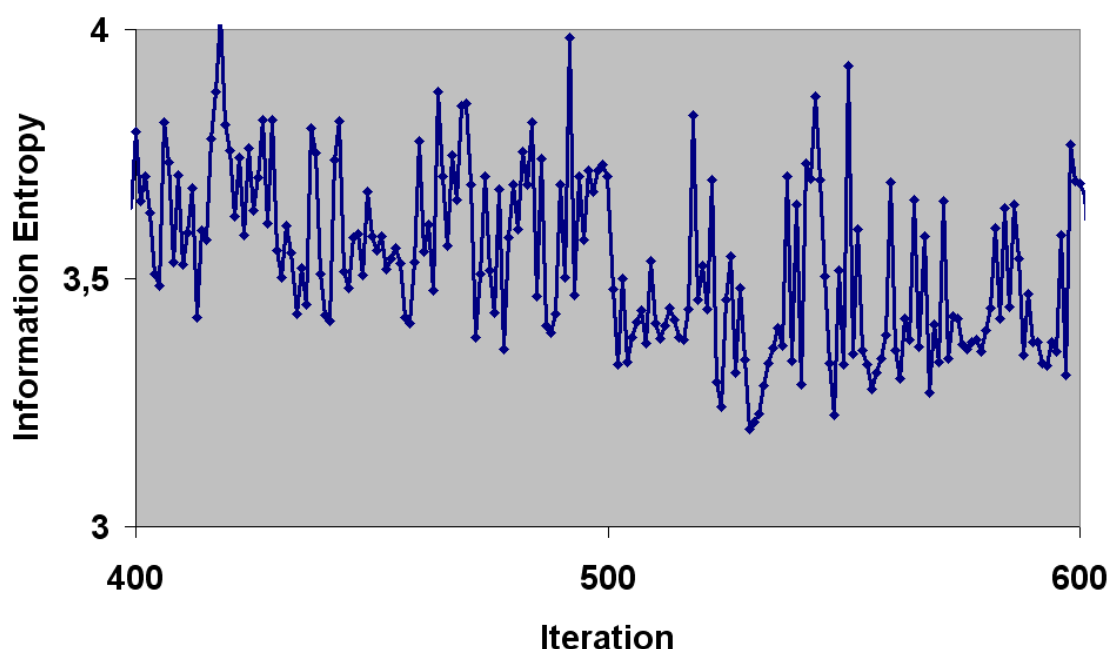
Πίνακας 7.16: Η εντροπία του συστήματος για $\psi=0.5$ και $\psi=1$ σε συνδυασμό με $\varepsilon=0.1$.

Παρατηρούμε ότι και για τις δύο τιμές του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ η εντροπία ελαττώνεται σημαντικά αλλά ομοιόμορφα, άρα το σύστημα αυτοοργανώνεται, και όταν φτάσει στην τελική του κατάσταση η εντροπία παραμένει σταθερή. Η εντροπία και στις δύο περιπτώσεις ξεκινά από την τιμή 7.24, η οποία είναι ίδια για όλες τις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στη διατριβή και χρησιμοποιούν το ίδιο αρχικό προφίλ γνώμων, και στη συνέχεια μειώνεται. Όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, μείωση της εντροπίας σημαίνει ότι η τάξη του συστήματος αυξάνει, άρα το σύστημα αυτοοργανώνεται. Για $\psi=0.5$ καταλήγει σε μια σταθερή τιμή που ισούται με 2.84 και χαρακτηρίζει την τελική κατάσταση του συστήματος, ενώ για $\psi=1$ καταλήγει σε μια ταλάντωση, όπου στη μια θέση ισούται με 4.91 και στην άλλη με 4.97. Η αυτοοργάνωση του συστήματος είναι μεγαλύτερη για $\psi=0.5$ παρά για $\psi=1$, γεγονός που οφείλεται στο ότι οι ομάδες στην πρώτη περίπτωση είναι πιο «συμπαγείς», οι πράκτορες έχουν ακριβώς την ίδια γνώμη 1 και 2, όπως φαίνεται και στην δεύτερη γραμμή του πίνακα 7.1, ενώ στη δεύτερη περίπτωση έχουν περίπου τις ίδιες τιμές (βλέπε τρίτη γραμμή του πίνακα 7.4). Τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα και συμφωνούν με τις μέχρι τώρα αναλύσεις του μοντέλου για τις συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων. Στο διάγραμμα 7.8 όμως που παρουσιάζεται η εντροπία του μοντέλου για $\psi=1.5$ παρατηρούμε ότι η εξέλιξη της εντροπίας είναι διαφορετική.



Διάγραμμα 7.8: Η εντροπία του συστήματος για $\psi=1.5$ και $\varepsilon=0.1$

Στην περίπτωση αυτή έχουμε ομοίως με τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις μείωση της εντροπίας, όμως αυτή λαμβάνει χώρα με ένα χαοτικό τρόπο. Μετά μια αρχική μεγάλη μείωση ακολουθούν διαδοχικές αυξομειώσεις, κατά συνέπεια το σύστημα αυτοοργανώνεται και αυτό-αποδιοργανώνεται, ώσπου να φτάσει στην τελική σταθερή του κατάσταση και η εντροπία να πάρει την τελική της τιμή που είναι ίση με 3.35. Για να αποσαφηνίσουμε ακόμη περισσότερο το βαθμό της ακανόνιστης μεταβολής της εντροπίας, στο διάγραμμα 7.9 παρουσιάζουμε μια λεπτομέρεια του διαγράμματος 7.5, μεγεθύνοντας την περιοχή του μαύρου ορθογωνίου, εστιάζοντας έτσι στις επαναλήψεις 400 ως 600. Οι επαναλήψεις αυτές επιλέγηκαν τυχαία και αν εστιάσουμε σε άλλο σημείο της εξέλιξης της εντροπίας, η εικόνα που θα πάρουμε θα είναι παρόμοια.



Διάγραμμα 7.9: Λεπτομέρεια του διαγράμματος 7.5.

Παρατηρούμε πόσο ακανόνιστη είναι η πορεία της εντροπίας και κατά συνέπεια η οργάνωση και αποδιοργάνωση των ομάδων που σχηματίζουν οι τροχιές των πρακτόρων, όλες αποτέλεσμα εσωτερικών διεργασιών του μοντέλου με βάση τις υποθέσεις του και χωρίς καμιά εξωτερική επίδραση. Η εικόνα αυτή επιβεβαιώνει την υψηλή αστάθεια του συστήματος πριν αυτό φτάσει στην τελική κατάσταση ισορροπίας.

7.6. Συμπεράσματα

Βασική υπόθεση του μοντέλου MER είναι ο συνδυασμός δύο ψυχολογικών αρχών, της τάσης του ατόμου προς επίτευξη κοινωνικής και ενδοατομικής ισορροπίας, με βάση τον μεθοδολογικό ιντιβιντουαλισμό (methodological individualism) (Katerelos & Koulouris, 2004a). Ο πιο απλός τρόπος να ορίσουμε το μεθοδολογικό ιντιβιντουαλισμό είναι η άποψη ότι κάθε ισχυρισμός σχετικά με μια ομάδα διατυπώνεται με όρους συμπεριφοράς ή αλληλεπίδρασης των ατόμων που αποτελούν την ομάδα (Schumpeter, 1908).

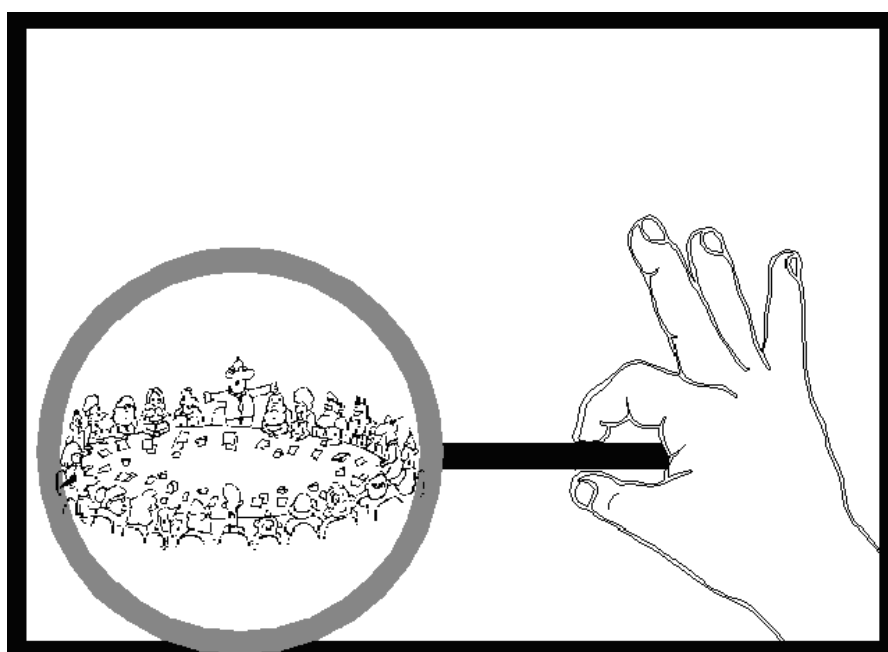
Οι τιμές των παραμέτρων ε και ψ παίζουν ένα ουσιώδη ρόλο στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Δείξαμε ότι για $\psi=0.5$ η δυναμική του μοντέλου MER είναι παρόμοια με το μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης. Η τάση προς ατομική ισορροπία είναι πολύ μικρή και η τάση προς κοινωνική ισορροπία κυριαρχεί. Για $\psi=1$ αυτές οι δύο τάσεις έχουν το ίδιο μέγεθος. Αυτή η «ισορροπία» των δύο δυνάμεων οδηγεί στο σύστημα στη μόνη κίνηση που μπορεί να χαρακτηριστεί ταυτόχρονα σαν αρμονική και ισορροπημένη αλλά να παραμένει κίνηση: την περιοδική κίνηση. Για $\psi=1.5$ η ισχυρή τάση για ατομική ισορροπία κάνει το σύστημα ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες και κατά συνέπεια μη προβλέψιμο. Το σύστημα επιδεικνύει εφήμερο χάος και οποιοδήποτε είδους μαθηματική ανάλυση δεν είναι σε θέση να προβλέψει την τελική του κατάσταση. Αυτό ισχύει για την τιμή $\psi=1.5$, όπου η τάση της κάθε πράκτορα για ενδοατομική ισορροπία είναι ισχυρότερη από την τάση για να ισορροπήσει κοινωνικά. Για $\psi=0.5$ και $\psi=1$ όπου η τάση για ατομική ισορροπία είναι ίση ή μικρότερη από την τάση για κοινωνική, οποιαδήποτε αλλαγή στη γνώμη κάποιας πράκτορα παραμένει και δεν αυξάνεται σε καμιά περίπτωση. Θα μπορούσαμε να πούμε λοιπόν ότι ο «σκεπτόμενος» άνθρωπος, αυτός που δίνει μεγάλη σημασία στο να μην αποδέχεται τις κοινωνικές επιδράσεις όταν αυτές αντιφάσκουν, προκαλεί την αδυναμία πρόβλεψης στο σύστημα, όταν επιπλέον έχουμε υποθέσει ότι η επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων είναι απόλυτη και όλοι γνωρίζουν τις δύο γνώμες όλων των άλλων πρακτόρων και μπορούν να αλληλεπιδράσουν. Όπως θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 9, εισάγοντας την τοπικότητα στην επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων, δηλαδή την τοπολογία των κυψελοειδών αυτομάτων, η επίδραση του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ θα είναι εντελώς διαφορετική.

Η προηγούμενες προσομοιώσεις δείχνουν ότι η κοινωνική πρακτική (social action) που θεωρητικά αναζητεί την συνδυασμένη ατομική και κοινωνική ισορροπία,

μπορεί να «γεννήσει» ένα σύστημα μη προβλέψιμο, ακόμα κι αν το σύστημα είναι ντετερμινιστικό. Η τάση προς την ισορροπία αποτελεί ένα κίνητρο, είτε είναι διατομική, δηλαδή κοινωνική, είτε είναι ενδοατομική: όλοι οι πράκτορες αναζητούν μία κατάσταση ισορροπίας, παρόλα αυτά το σύστημά τους είναι μη προβλέψιμο, δηλαδή *η αναζήτηση ισορροπίας μπορεί να προκαλέσει τη μη προβλεψιμότητα*. Όλα μοιάζουν να διαπραγματεύονται ανάμεσα στο ατομικό και το κοινωνικό. Κάθε κίνηση των πρακτόρων για την επίτευξη της κοινωνικής τους ισορροπίας αποσταθεροποιεί την εσωτερική τους ισορροπία και κάθε φορά που οι πράκτορες τείνουν να ισορροπήσουν ατομικά διαταράσσουν την κοινωνική ισορροπία. Παρότι το σύστημα δεν έχει κανένα στοχαστικό στοιχείο στον αλγόριθμό του και οι τροχιές των γνωμών των πρακτόρων είναι ντετερμινιστικά προκαθορισμένες από τις αρχικές συνθήκες και τους κανόνες αλληλεπίδρασης, είναι αδύνατο να προβλεφθούν στην περίπτωση του $\psi=1.5$.

Οι δραστοστρεφείς προσομοιώσεις που βασίζονται σε απλοποίηση των διαδικασιών είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την κατανόηση του πραγματικού κόσμου των μεγαλύτερων διαστάσεων (Hegselmann & Flache, 1998). Θεωρίες με μεγάλο εύρος πάνω στην αλλαγή των στάσεων χαρακτήριζαν την κοινωνική έρευνα σε προηγούμενες δεκαετίες. Οι θεωρίες αυτές διατυπώθηκαν την δεκαετία του 1950 και εξερευνήθηκαν εμπειρικά τις δεκαετίες του 1950 και του 1960. Οι θεωρίες γνωστικής συμφωνίας (cognitive consistency theories) συγκέντρωναν το ενδιαφέρον εκείνη την εποχή και ειδικότερα οι θεωρίες της γνωστικής ασυμφωνίας (dissonance theories) και γνωστικής ισορροπίας (balance theories) τράβηξαν την μεγαλύτερη προσοχή. Όλες αυτές οι θεωρίες επιχείρησαν να συμπεριλάβουν ένα ευρύ φάσμα από φαινόμενα που αφορούσαν τη συμπεριφορά (attitudinal phenomena) χρησιμοποιώντας ένα σχετικά μικρό σύνολο θεωρητικών κατασκευών. Η αποδοχή αυτών των θεωριών σταδιακά μειώθηκε για πολλούς λόγους, ένας από τους οποίους αναμφίβολα είναι μια απλή ανία με τις ιδέες που είμαστε εξοικειωμένοι και προκαλούν αλλαγές στο zeitgeist. Απ' την άλλη όμως, μια από τις βασικές αντιρρήσεις που διατυπώθηκε ενάντια στους «ισορροπιστές» (equilibrists) είναι ότι τα μοντέλα τους ήταν πολύ θεωρητικά και απομακρυσμένα από την υπάρχουσα κοινωνική πραγματικότητα, η οποία κρύβει πολύ περισσότερες εκπλήξεις από όσες μπορούν να προβλεφθούν. Με άλλα λόγια, ένας κόσμος σε ισορροπία είναι ένας ανιαρός, μονότονος και προβλέψιμος κόσμος όπου καμιά αλλαγή δεν αναμένεται και τελικά ένα μέρος όπου είναι αδύνατον να ζήσει ένας άνθρωπος (Katerelos & Koulouris, 2004a).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8
ΚΟΙΝΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΤΩΝ ΠΡΑΚΤΟΡΩΝ ΣΤΑ
ΔΡΑΣΤΟΣΤΡΕΦΗ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ



8.1. Κοινωνικά Δίκτυα

MOMMA By Mel Lazarus



Πηγή: Διαδίκτυο, <http://moreno.ss.uci.edu/work.html>

Στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής, πριν τη μελέτη της επίδρασης των διαφόρων τοπολογιών επικοινωνίας στο μοντέλο πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών, θα γίνει μια παρουσίαση των τοπολογιών επικοινωνίας που έχουν ήδη μελετηθεί στα άλλα δραστοστρεφή μοντέλα προσομοίωσης καθώς και μια σύντομη αναφορά στα κοινωνικά δίκτυα και την κοινωνιομετρία, στο χώρο της κοινωνιολογίας.

Η κοινωνιομετρία παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Jacob Moreno το 1933 στην εφημερίδα New York Times με την επωνυμία ψυχολογική γεωγραφία (psychological geography) και «απέβλεπε στη χαρτογράφηση, μέσω γραφικών αναπαραστάσεων, της συναισθηματικής εξέλιξης». Σύμφωνα με το πρώτο αυτό δημοσίευμα «οι γραφικές αναπαραστάσεις αναφέρονται σε μελέτες οι οποίες βασίζονται στις δυνάμεις έλξης και άπωσης που αναπτύσσονται ανάμεσα στα άτομα μιας ομάδας» (Berg, 1998). Η προτεινόμενη μέθοδος χαρτογράφησης των παραπάνω δυνάμεων καθιερώθηκε στη συνέχεια, στο χώρο της κοινωνιολογίας, με τον όρο *κοινωνιομετρία* (sociometry) και αποτελεί σήμερα μια από τις εγκυρότερες τεχνικές αποτύπωσης και ανάδειξης της εσωτερικής δυναμικής των ομάδων, με σημαντικές και διαδεδομένες εφαρμογές, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί σε ποικίλα περιβάλλοντα οργανισμών για να αποκαλύψει και να εξετάσει τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα πρόσωπα που συγκροτούν τις επιμέρους δομές. Η μετεξέλιξη της μεθόδου, με σαφέστερες κοινωνιολογικές αναφορές και τη συνδρομή των μαθηματικών, συγκρότησε την κρίσιμη μάζα για την ανάπτυξη της τεχνικής ανάλυσης των κοινωνικών δικτύων.

Η *ανάλυση των κοινωνικών δικτύων* (social network analysis) βασίζεται στη μελέτη των διαμορφούμενων ή υπό διαμόρφωση σχέσεων ανάμεσα στα μέλη μιας ομάδας ή ομάδων μεταξύ τους, καθώς επίσης και στη διερεύνηση των κοινωνικών

θέσεων των δρώντων υποκειμένων ή των επιμέρους ομάδων. Ο Moreno (1953) εισήγαγε επίσης την ιδέα της χρησιμοποίησης διαγραμμάτων για να αποκαλύψει τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα οποιασδήποτε κοινωνικής διαμόρφωσης.

Ο Freeman (2004) προσδιορίζει πέντε ιστορικές τομές στην πορεία οπτικοποίησης των κοινωνικών δικτύων. Η πρώτη περίοδος αναφέρεται στις πρώτες “χειρόγραφες” απεικονίσεις, η επιτυχία των οποίων προέκυπτε από την αντιληπτική και καλλιτεχνική δεξιότητα του δημιουργού. Η δεύτερη εντοπίζεται χρονικά στη δεκαετία του 1950, όταν οι ερευνητές εντάσσουν τις υπολογιστικές διαδικασίες στο ρεπερτόριο των δυνατοτήτων τους. Η τρίτη περίοδος, τη δεκαετία του 1970, χαρακτηρίζεται από την εισαγωγή της πληροφορικής και των ηλεκτρονικών υπολογιστών και την εφαρμογή εξειδικευμένου λογισμικού για την οπτικοποίηση των δικτύων. Στην τέταρτη περίοδο, τη δεκαετία του 1980, η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών διευρύνεται και οι δυνατότητες απεικόνισης βελτιώνονται. Τέλος, στην πέμπτη περίοδο, με σημείο αφετηρίας τα μέσα της δεκαετίας του 1990, το διαδίκτυο και οι εφαρμογές του επεκτείνουν ακόμη περισσότερο τα όρια των γραφικών απεικονίσεων.

Στην ανάλυση των κοινωνικών δικτύων τα άτομα και οι κοινωνικές τους σχέσεις απεικονίζονται ως *κόμβοι* και *δεσμοί*. Οι κόμβοι είναι οι μεμονωμένοι δράστες μέσα στα δίκτυα και οι δεσμοί είναι οι σχέσεις μεταξύ των δραστών. Μπορούν να υπάρξουν πολλά είδη δεσμών μεταξύ των κόμβων. Ένα κοινωνικό δίκτυο είναι μια κοινωνική δομή αποτελούμενη από κόμβους (που γενικά είναι άτομα ή οργανώσεις), οι οποίοι συνδέονται με έναν ή περισσότερους συγκεκριμένους τύπους σχέσεων, όπως οι οικονομικές ανταλλαγές, η φιλία, το μίσος, το εμπόριο, η επικοινωνία στο διαδίκτυο, οι συγκοινωνίες κλπ. Η έρευνα σε διάφορους επιστημονικούς τομείς έχει δείξει ότι τα κοινωνικά δίκτυα λειτουργούν σε πολλά επίπεδα, από το μικρό επίπεδο των οικογενειών ως το μεγάλο επίπεδο των εθνών, και διαδραματίζουν έναν κρίσιμο ρόλο στον τρόπο που επιλύονται τα προβλήματα, που διοικούνται οι οργανισμοί και στο βαθμό επίτευξης των στόχων των ατόμων. Οι τεχνικές ανάλυσης κοινωνικών δικτύων και ειδικότερα οι κοινωνιομετρικές τεχνικές παρέχουν τις προϋποθέσεις εκτίμησης και ποιοτικής ανάλυσης των σχέσεων στο εσωτερικό των ομάδων. Η έρευνά στο χώρο των κοινωνικών δικτύων κινείται στα πλαίσια μιας δομικής προοπτικής: μελετώνται οι δομικές μορφές ή τα σχήματα των δεσμών που συνδέουν τους κοινωνικούς δράστες. Στα πλαίσια αυτής της σχολής περιλαμβάνεται είτε η παρατήρηση και η συλλογή των εμπειρικών δεδομένων είτε η ανάπτυξη μοντέλων για την καλύτερη δυνατή εφαρμογή των διαθέσιμων εμπειρικών δεδομένων.

Τα κοινωνικά δίκτυα είναι συναθροίσεις ανθρώπων που τους συνδέουν κάποιου είδους δεσμοί. Έτσι για παράδειγμα οι μαθητές μιας τάξης, τα μέλη μιας οικογένειας, οι συνεργάτες σε μια δουλειά απαρτίζουν συγκεκριμένα κοινωνικά δίκτυα. Τα δύο κύρια χαρακτηριστικά των κοινωνικών δικτύων είναι η πυκνότητα (density) και η πολλαπλότητα (multiplexity). Η πυκνότητα εξαρτάται από το κατά πόσο όλα τα μέλη ενός κοινωνικού δικτύου γνωρίζονται μεταξύ τους. Αν π.χ. σε μια γειτονιά όλοι γνωρίζουν τους πάντες τότε το συγκεκριμένο κοινωνικό δίκτυο λέμε ότι παρουσιάζει μέγιστη πυκνότητα. Η πολλαπλότητα σχετίζεται με το πόσων ειδών σχέσεις συνυπάρχουν σε ένα δίκτυο. Έτσι, για παράδειγμα, αν στην προαναφερθείσα γειτονιά οι κάτοικοι είναι όχι μόνο συγγενείς αλλά και συνεργάτες, τότε το συγκεκριμένο κοινωνικό δίκτυο θεωρούμε ότι παρουσιάζει υψηλή πολλαπλότητα. Ο συνδυασμός υψηλής πυκνότητας και πολλαπλότητας ορίζει κλειστά δίκτυα ενώ ο συνδυασμός χαμηλής πυκνότητας και πολλαπλότητας παράγει χαλαρά δίκτυα (Knoke & Kuklinski, 1982).

Μεγάλα κομμάτια της σύγχρονης κοινωνίας δεν μπορούν πλέον να ταιριάζουν στο παραδοσιακό μοντέλο κοινωνικής οργάνωσης. Η πολυπλοκότητα των σημερινών σχέσεων και η ανάπτυξη της επικοινωνίας αλλάζουν τις παλιές και ιεραρχικά δομημένες σχέσεις στην εργασία, στην κοινότητα και στην κρατική δομή, μεταφέροντας δεσμούς και σχέσεις στα δίκτυα (Moreno, 1954). Σημείο συνάντησης της ψυχοδραματικής ψυχοθεραπευτικής μεθόδου του Moreno με την κοινωνική ψυχολογία ορίζεται το μικροκοινωνιολογικό πεδίο, μέσα στο οποίο διαδραματίζονται οι καθημερινές επαφές και συναντήσεις των ατόμων, οι διαδοχικές μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις που δημιουργούν τελικά το πολυδιάστατο πλέγμα των ανθρώπινων σχέσεων (Παπαστάμου, 2001:52). Στην κοινωνία των δικτύων οι ιεραρχικές σχέσεις και τα σύνορα ανάμεσα στις διάφορες κοινωνικές ομάδες είναι πιο διαπερατά και τα άτομα μπορούν να επικοινωνούν και να δημιουργούν δεσμούς δι-ομαδικά, δια-ταξικά και δια-κρατικά. Η θεωρία των κοινωνικών δικτύων επιτρέπει, ως ένα βαθμό, την κατανόηση και ανάλυση αυτών των θεμελιωδών κοινωνικών μεταμορφώσεων. Η κοινωνική ανάλυση δικτύων έχει αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων εξήντα ετών από τους ερευνητές στο χώρο της ψυχολογίας, της κοινωνιολογίας και της ανθρωπολογίας και χρησιμοποιείται ευρέως στο χώρο των κοινωνικών επιστημών, ως μια θεωρητική βάση για την ερμηνεία των κοινωνικών φαινομένων και την εξέταση των κοινωνικών δομών. Τα κοινωνικά δίκτυα αποτελούν σήμερα ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία των κοινωνικών και ανθρωπιστικών σπουδών.

Ως απόρροια της ανάγκης για πληρέστερη περιγραφή του κοινωνικού δικτύου κατέστη αναγκαία η χρήση μαθηματικών μοντέλων για την αξιοποίηση των σχετικών αλγορίθμων και συγκεκριμένα η αναπαράσταση των κοινωνικών δικτύων με τη βοήθεια της θεωρίας των γράφων. Η μαθηματική πλαισίωση επιτρέπει άλλωστε την εξαντλητική δομική ανάλυση του δικτύου σε ελάχιστο χρόνο με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η εξέλιξη, διεύρυνση και αναβάθμιση της τεχνολογίας και σχετικής τεχνογνωσίας και η έρευνα στα μαθηματικά και την κοινωνική ψυχολογία επέδρασαν έτσι, ώστε οι εκδόσεις του σχετικού λογισμικού να ανανεώνονται συνεχώς αλλά και να παράγεται νέο. Νεότερες και περισσότερο εξελιγμένες τεχνικές αποτύπωσης και ρεαλιστικής τρισδιάστατης απόδοσης των θέσεων και των σχέσεων, με πλήρη παραμετροποίηση των επιμέρους δομών και χαρακτηριστικών, κυριαρχούν στις σύγχρονες τεχνολογικές προτάσεις και είναι πλέον ευρέως διαθέσιμες. Παρόλα αυτά, η έρευνα αναφορικά με την ανάλυση και την απόδοση έγκυρων και αξιόπιστων αλγορίθμων καθώς και ο προγραμματισμός των ήδη έγκριτων τεχνικών απεικόνισης χρειάζεται περεταίρω βελτίωση.

8.2. Ο Ρόλος της Τοπολογίας της Επικοινωνίας στα Δραστοστρεφή

Μοντέλα Κοινωνικών Προσομοιώσεων

Αντίστοιχη σπουδαιότητα με τη μελέτη των κοινωνικών δικτύων και το ρόλο που διαδραματίζουν στην κοινωνική έρευνα, έχει και η μελέτη της επίδρασης της τοπολογίας επικοινωνίας των πρακτόρων στα δραστοστρεφή μοντέλα προσομοίωσης. Η τοπολογία επικοινωνίας μπορεί να παίζει καθοριστικό ρόλο στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ανάλογα φυσικά με το συγκεκριμένο δραστοστρεφές μοντέλο, στο οποίο εφαρμόζεται. Παρόλα αυτά, σε λίγα δραστοστρεφή μοντέλα έχει διερευνηθεί διεξοδικά ο ρόλος της τοπολογίας επικοινωνίας των πρακτόρων στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά ίσως παραδείγματα είναι αυτό που διενεργήθηκε από τον Axtell (2000a) και αφορούσε τη μέση ηλικία συνταξιοδότησης στις Ηνωμένες Πολιτείες.

Στην προσομοίωση αυτή ο Axtell διατήρησε όλες τις υποθέσεις του μοντέλου του σταθερές, εκτός από το δίκτυο επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης των πρακτόρων. Ο σκοπός της προσομοίωσης ήταν να αναπαραχθεί ένα παρατηρηθέν μακροοικονομικό φαινόμενο που αφορούσε στην ηλικία συνταξιοδότησης. Οι οικονομολόγοι δυσκολεύονταν να ερμηνεύσουν το γεγονός ότι αν και ο νόμος που αφορούσε την

κοινωνική ασφάλιση στις *Ηνωμένες Πολιτείες* είχε τροποποιηθεί το 1961, επιτρέποντας τη συνταξιοδότηση στην ηλικία των 62 ετών από 65 που ήταν προγενέστερα, η μέση ηλικία συνταξιοδότησης του πληθυσμού από τα 65 έτη έφτασε να γίνει ίση με τα 62 έτη σχεδόν 30 έτη αργότερα, μεταξύ του 1990 και του 1995. Σε μια προηγούμενη έκδοση αυτού του πειράματος, οι Axtell και Epstein (1999) είχαν αναπτύξει μια προσομοίωση που αναπαρήγαγε αυτό το μακρο φαινόμενο. Οι πράκτορες συνδέονταν και αλληλεπιδρούσαν μεταξύ τους σύμφωνα με την τοπολογία ενός τυχαίου γράφου, κάθε πράκτορας δηλαδή επικοινωνούσε τυχαία με n άλλους πράκτορες. Η προσομοίωση περιείχε τρεις τύπους πρακτόρων: λογικούς πράκτορες (rational agents), οι οποίοι συνταξιοδοτούνταν στη νεότερη δυνατή ηλικία που επιτρεπόταν από το νόμο, μιμητές (imitators), που μετατόπιζαν την προτίμησή τους, όσον αφορά στην ηλικία συνταξιοδότησης, ανάλογα με την προτίμηση των πρακτόρων που επικοινωνούσαν και τους πράκτορες που τυχαία συνταξιοδοτούνταν κάποια στιγμή μετά την ηλικία που επιτρέπει ο νόμος, συμφωνά με κάποια καθορισμένη κατανομή πιθανότητας. Η προσομοίωση αναπαρήγαγε επιτυχημένα τη χρονική καθυστέρηση που παρατηρήθηκε εμπειρικά, όπου οι προτιμήσεις, όσον αφορά την ηλικία συνταξιοδότησης μεταβάλλονταν μαζικά προς τα πάνω και προς τα κάτω, ως το χρονικό σημείο όπου μια νέα κοινωνική νόρμα εγκαθιδρύθηκε, η σύνταξη στα 62. Σύμφωνα με το μοντέλο, η χρονική καθυστέρηση ως την επιβολή της νόρμας και τον τερματισμό της προσομοίωσης μειώνεται όταν το ποσοστό των λογικών πρακτόρων αυξάνεται. Μόλις καθιερωθεί ο νέος αυτός κανόνας παραμένει σε ισχύ: σε καμία προσομοίωση δεν παρατηρήθηκε το φαινόμενο ο χρόνος συνταξιοδότησης να γίνει ίσος με τα 62 έτη και στη συνέχεια να αυξηθεί και πάλι. Το μοντέλο κατά συνέπεια μιμείται πετυχημένα την εμφάνιση της ισορροπίας καθώς και την αναπαραγωγή της κατάστασης ισορροπίας, μόλις αυτή προκύψει.

Ο Axtell (2000a) στη συνέχεια τροποποίησε την τοπολογία επικοινωνίας των πρακτόρων. Θεώρησε ότι οι πράκτορες βρίσκονται στις κορυφές ενός δικτυωτού πλέγματος (lattice network), όπου κάθε πράκτορας συνδέεται με όλους τους πράκτορες που απέχουν από αυτόν απόσταση μικρότερη ή ίση με n διαστήματα. Η αλλαγή αυτή της τοπολογίας επικοινωνίας των πρακτόρων από ένα τυχαίο γράφο σε ένα δικτυωτό πλέγμα μετέβαλε ριζικά τη συνολική συμπεριφορά της τεχνητής κοινωνίας. Στη νέα αυτή προσομοίωση, ο νέος κοινωνικός κανόνας (της συνταξιοδότησης στα 62 έτη) προκύπτει γρηγορότερα και μάλιστα ανεξάρτητα από το ποσοστό των λογικών πρακτόρων στο σύνολο του πληθυσμού. Επιπλέον, η δυναμική εξέλιξη της προσομοίωσης προς την

τελική κατάσταση ισορροπίας είναι διαφορετική. Με την τοπολογία του τυχαίου γράφου η μετάβαση της προτίμησης για μικρότερη ηλικία συνταξιοδότησης γινόταν από τα μεγαλύτερα προς τα μικρότερα ηλικιακά μέλη του πληθυσμού. Με την νέα τοπολογία επικοινωνίας, η προτίμηση αυτή ξεκινά από μια μικρή συστάδα πρακτόρων και διαδίδεται βαθμιαία σε πιο ηλικιωμένους πράκτορες. Η κοινωνική αλλαγή εμφανίζεται μέσω ενός διαφορετικού μηχανισμού απ' ότι με την τοπολογία του τυχαίου γράφου.

Οι διεξαγωγή των δύο αυτών προσομοιώσεων καταδεικνύει ότι *η μάκρο ιδιότητα της επικοινωνίας μεταξύ των πρακτόρων, η οποία προφανώς δεν αναδύεται από τις τοπικές αλληλεπιδράσεις των μεμονωμένων πρακτόρων αλλά προκαθορίζεται από τον κατασκευαστή του μοντέλου, είναι επαρκές αίτιο που επιδρά και τροποποιεί τους μηχανισμούς που δρουν στο μικρο επίπεδο και είναι υπεύθυνοι για την ανάδυση των μάκρο κοινωνικών φαινομένων*. Και στις δύο περιπτώσεις, ένας νέος κοινωνικός κανόνας, αυτός της συνταξιοδότησης στην ηλικία των 62, επικρατεί με μια καθυστέρηση. Εντούτοις, η δυναμική του μετασχηματισμού είναι ριζικά διαφορετική στις δύο τοπολογίες επικοινωνίας. Στην τοπολογία του τυχαίου γράφου ο νέος κανόνας καθιερώνεται πρώτα μεταξύ των παλαιότερων πρακτόρων και κατόπιν διαδίδεται στους νεότερους πράκτορες, ενώ στην τοπολογία του δικτυωτού πλέγματος ο νέος κανόνας καθιερώνεται αρχικά σε μια μικρή ομάδα μεταξύ των πρακτόρων που έχουν ηλικία 65 και βαθμιαία διαδίδεται στις μεγαλύτερες ηλικίες, καθώς εκείνη η ομάδα γερνά. Αυτό το είδος της μικρο-μάκρο μελέτης της κοινωνικής δυναμικής είναι σχεδόν αδύνατο να πραγματοποιηθεί με άλλη ερευνητική μέθοδο, εκτός αυτής των δραστοστραφών μοντέλων προσομοίωσης. *Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ομοιάζει με τον πειραματικό χειρισμό που εφαρμόζουν οι κοινωνικές επιστήμες στους ανθρώπους, μόνο που εδώ έχουμε πράκτορες. Κατ' αναλογία θα λέγαμε ότι η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι η τοπολογία επικοινωνίας μεταξύ των πρακτόρων και η εξαρτημένη είναι ο μηχανισμός με τον οποίο το σύστημα εξελίσσεται δυναμικά και φτάνει στην τελική κατάσταση ισορροπίας*.

Όπως θα αναλυθεί στο κεφάλαιο που ακολουθεί, στο μοντέλο MER παρατηρείται μια ακόμη μεγαλύτερη μεταβολή μετά την αλλαγή της τοπολογίας επικοινωνίας των πρακτόρων. Συγκεκριμένα, η αλλαγή της τοπολογίας επικοινωνίας των πρακτόρων από πλήρη γράφο σε κυψελοειδές αυτόματο προκαλεί, όχι απλά τροποποίηση του μηχανισμού ανάδυσης ενός μάκρο κοινωνικού φαινομένου, όπως στην περίπτωση της προσομοίωσης του Axtell, αλλά έχει ως αποτέλεσμα τη συντριπτική μεταβολή του συστήματος για την περίπτωση $\psi=1$, όπου το σύστημα από περιοδικό και προβλέψιμο

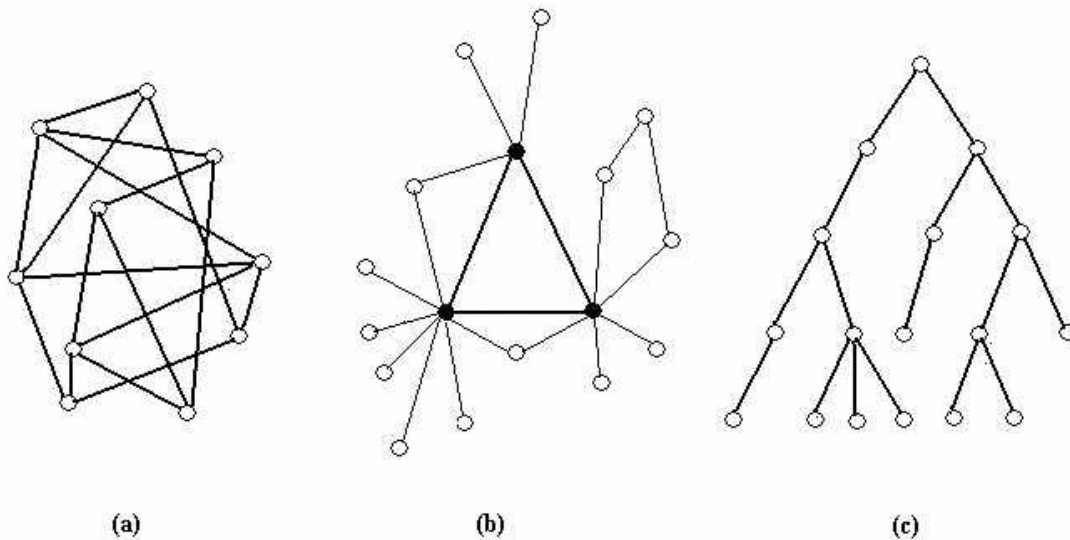
μετατρέπεται σε χαοτικό. Η αλλαγή της τοπολογίας επικοινωνίας των πρακτόρων έχει στο μοντέλο MER μια θεμελιώδη επίδραση στις ιδιότητες της υπό μελέτη τεχνητής κοινωνίας. Στην επόμενη ενότητα θα παρουσιάσουμε τις τοπολογίες επικοινωνίας των πρακτόρων που έχουν εφαρμοστεί στα δραστοστρεφή μοντέλα προσομοίωσης και η επίδρασή τους θα διερευνηθεί και στο μοντέλο MER.

8.3. Τοπολογίες Επικοινωνίας στα Δραστοστρεφή Μοντέλα Κοινωνικών Προσομοιώσεων

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός τοπολογιών επικοινωνίας που μπορεί να εφαρμοστεί στα δραστοστρεφή μοντέλα των κοινωνικών προσομοιώσεων. Όλες οι τοπολογίες μπορούν να θεωρηθούν ειδικές περιπτώσεις γράφων. *Γράφος (graph)* ή *γράφημα* είναι μια δομή που αποτελείται από ένα σύνολο κορυφών (vertices) ή κόμβων (nodes) που συνδέονται μεταξύ τους με ένα σύνολο ακμών (edges) ή γραμμών (lines). Ο γράφος ορίζεται πλήρως από τους κόμβους και τη συνδεσμολογία τους. Αν οι ακμές είναι προσανατολισμένες (ορίζονται δηλαδή από διατεταγμένα ζεύγη κόμβων) τότε ο γράφος λέγεται *κατευθυνόμενος (directed)*. Αντίθετα αν οι ακμές δεν είναι προσανατολισμένες, δηλαδή ορίζονται από μη διατεταγμένα ζεύγη κόμβων, τότε ο γράφος λέγεται *μη κατευθυνόμενος (undirected)*. Αν οι ακμές είναι συνδεδεμένες με κάποια *αξία (βάρος)* τότε ο γράφος λέγεται *σταθμισμένος (weighted)*. *Πλήρης (complete)* ορίζεται ο μη κατευθυνόμενος γράφος που περιέχει ακμές που ενώνουν κάθε ζεύγος κόμβων. Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η εικόνα ενός πλήρους γράφου (εικόνα 7.1), όπου κάθε κόμβος (πράκτορας) είναι συνδεδεμένος με όλους τους άλλους. *Αραιός* καλείται ο γράφος που περιέχει λίγες σχετικά ακμές, αν δηλαδή ο γράφος περιέχει V κόμβους, ο αριθμός των ακμών πρέπει να είναι μικρότερος του $V \cdot \log V$. *Πυκνός (dense)* καλείται ο γράφος από τον οποίο απουσιάζουν λίγες σχετικά ακμές.

Ένας γράφος μπορεί εύκολα να παρασταθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους, τον *πίνακα γειτνίασης (adjacency matrix)* και τη *λίστα γειτνίασης (adjacency list)*. Και οι δύο τρόποι προϋποθέτουν ένα μονοσήμαντο σύστημα αρίθμησης των κόμβων. Ο πίνακας γειτνίασης έχει διάσταση $n \times n$, για ένα γράφο με n κόμβους και περιέχει 1 στις θέσεις $(κ,λ)$ όπου υπάρχει ακμή που συνδέει τον κόμβο $κ$ με τον κόμβο $λ$ ενώ στις υπόλοιπες θέσεις περιέχει το μηδέν. Διαφορετικά, κάθε κόμβος συσχετίζεται με μια συνδεδεμένη λίστα γειτνίασης, η οποία περιέχει τα ονόματα των άλλων κόμβων με τους οποίους συνδέεται ο συγκεκριμένος κόμβος. Οι λίστες για όλους τους κόμβους μπορούν να

ξεκινούν από έναν μονοδιάστατο πίνακα μήκους V ή από μια άλλη συνδεδεμένη λίστα. Η θεωρία των γράφων είναι μια πολύ εκτεταμένη μαθηματική θεωρία, που σχετίζεται με την αλγεβρική τοπολογία, τη θεωρία ομάδων, τη συνδυαστική και τη γραμμική άλγεβρα και έχει εφαρμογές σε μια μεγάλη ποικιλία επιστημονικών κλάδων. Οι γράφοι όλων των ειδών έχουν μελετηθεί διεξοδικά και έχει αναπτυχθεί εξαιρετικά μεγάλη ορολογία, όπως διαδρομή (path) μέσα σε ένα γράφο, κύκλος (circle), απόσταση (distance) μεταξύ δύο κόμβων, διαδρομή Euler (Euler path), διαδρομή Hamilton (Hamilton path), συνεκτικοί (connected) γράφοι, βαθμός ενός κόμβου, βαθμός εισόδου (in-degree) κλπ. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα γράφων παρουσιάζονται στην εικόνα 8.1.



Εικόνα 8.1: Αναπαράσταση γράφων (δικτύων) : (a) τυχαίο, (b) γράφος (δίκτυο) χωρίς κλίμακα και (c) ιεραρχικός (Stocker et al, 2002).

Εάν οι ακμές του γράφου τοποθετηθούν τυχαία, το αποτέλεσμα είναι ένας *τυχαίος γράφος (random graph)*, χωρίς κάποια προφανή δομή (εικόνα 8.1.(a)). Αυτός ο τύπος γράφου χαρακτηρίζεται από την κατανομή του αριθμού των συνδέσεων κάθε κόμβου, η οποία προσεγγίζει την κατανομή Poisson.

Εάν ο γράφος κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι ακμές να τοποθετούνται σε ένα κόμβο με πιθανότητα ανάλογη με τον αριθμό των συνδέσεων που έχει (μια ακμή έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να τοποθετηθεί σε ένα κόμβο με πολλές συνδέσεις παρά σε έναν άλλο με λιγότερες), το αποτέλεσμα είναι ένα *δίκτυο χωρίς κλίμακα (scale-free network)* ή *γράφος χωρίς κλίμακα (scale free graph)* (εικόνα 8.1.(b)).

Ένας τέτοιος γράφος διαθέτει έναν μικρό αριθμό κόμβων με πολλές συνδέσεις και ένα μεγάλο αριθμό κόμβων με λιγότερες συνδέσεις. Στα δίκτυα χωρίς κλίμακα, οι κόμβοι με τις πολλές ακμές συνδέουν τους υπόλοιπους αραιά συνδεδεμένους κόμβους με το σύστημα και ο αριθμός των κόμβων σε σχέση με τον αριθμό των συνδέσεων του κάθε κόμβου ακολουθεί ένα νόμο δύναμης (*power law*) (Barabási. & Bonabeau, 2003). Στην εικόνα 8.1(b) οι κόμβοι με τις πολλές συνδέσεις έχουν πιο έντονο μαύρο χρώμα από τους υπολοίπους. Εάν οι ακμές είναι έτσι τοποθετημένες ώστε να μην σχηματίζονται κύκλοι (κλειστοί βρόχοι), το αποτέλεσμα μπορεί να ειπωθεί ως μια *ιεραρχία* (*hierarchy*) (εικόνα 8.1.(c)).

Όλες οι τοπολογίες επικοινωνίας των πρακτόρων στα δραστοστρεφή μοντέλα προσομοίωσης μπορούν να θεωρηθούν ειδικές περιπτώσεις γράφων. Παρά ταύτα, κάποιες τοπολογίες είναι τόσο ευρέως χρησιμοποιούμενες και έχουν μελετηθεί ακόμη εκτενέστερα. Η πιο συνηθισμένη τοπολογία στις κοινωνικές προσομοιώσεις είναι αυτή των κυψελοειδών αυτομάτων.

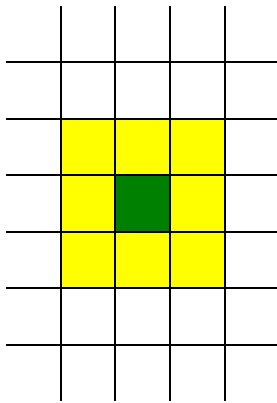
Τα κυψελοειδή αυτόματα (*cellular automata*) εισήχθησαν πρώτα στις φυσικές επιστήμες από τον John von Neumann και τον Stanislaw Ulam στα τέλη της δεκαετίας του 1940 (Neumann, 1966), κυρίως για να μοντελοποιηθεί η ζωή και τα συστήματα που αυτοοργανώνονται και αυτοαναπαράγονται (*self-reproducing systems*) στη βάση μιας αναγωγιστικής (*reductionistic*) προσέγγισης. Συνήθως η μοντελοποίηση αυτή απαιτεί τεράστια υπολογιστική δύναμη. Καθώς οι προσωπικοί υπολογιστές ισχυροποιούσαν την υπολογιστική τους δύναμη και έγιναν ευρέως διαθέσιμοι, η μοντελοποίηση με τη χρήση των κυψελοειδών αυτομάτων χρησιμοποιήθηκε όλο και σε περισσότερες επιστήμες. Στις μέρες μας χρησιμοποιείται εκτενώς σε εφαρμογές που ποικίλουν, από τους μικροκρυστάλους, τη διάβρωση του εδάφους, τη δυναμική των ρευστών ως και στη μοντελοποίηση των συγκρούσεων των γαλαξιών (Burks 1970, Demongeot *et al.* 1985, Wolfram 1986, Toffoli and Margolus 1987, Gutowitz 1991). Ο Stephen Wolfram (1984) έδωσε τη συστηματικότερη ταξινόμηση των κυψελοειδών αυτομάτων. Παρόλα αυτά δεν έχουν δοθεί παρά ελάχιστες αναλυτικές αποδείξεις, κατά συνέπεια η προσομοίωση εξακολουθεί να παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην έρευνα στο χώρο των κυψελοειδών αυτομάτων, ως η μόνη διαθέσιμη. Σύμφωνα με τους Hegselmann & Flache (1998) τα χαμηλής διάστασης και ιδιαίτερα δυσδιάστατα κυψελοειδή αυτόματα είναι μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για τη μοντελοποίηση και την κατανόηση της κοινωνικής δυναμικής.

Το κύριο χαρακτηριστικό των κυψελοειδών αυτομάτων είναι η *ιδιότητα της γειτνίασης-τοπικότητας (locality)*. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι αλληλεπιδράσεις λαμβάνουν χώρα μόνο μέσα σε μια καλά ορισμένη γειτονιά. Μια δραστοστρεφή μοντελοποίηση που χρησιμοποιεί την τοπολογία των κυψελοειδών αυτομάτων και υποθέτει την ύπαρξη 100 πρακτόρων θα μπορούσε να τις τοποθετήσει στα 100 κελιά ενός κυψελοειδούς αυτόματου 10x10, την καθεμιά σε ένα διαφορετικό κελί, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.1.

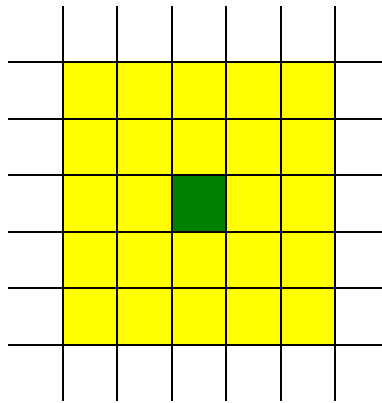
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Σχήμα 8.1: Ένα κυψελοειδές αυτόματο 10x10. Καθεμιά από τις 100 πράκτορες βρίσκεται σε ένα διαφορετικό κελί.

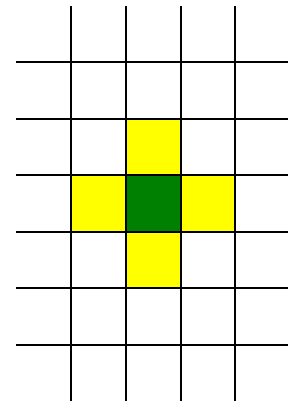
Όλες οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πρακτόρων λαμβάνουν χώρα μέσα σε αυστηρά οριοθετημένες *περιοχές* ή αλλιώς *γειτονιές (neighborhoods)*. Στο σχήμα μπορούμε να δούμε τα τρία βασικότερα είδη περιοχών, την 3x3 περιοχή Moore, την 5x5 Περιοχή Moore καθώς και την περιοχή Von Neumann.



3x3 Περιοχή Moore



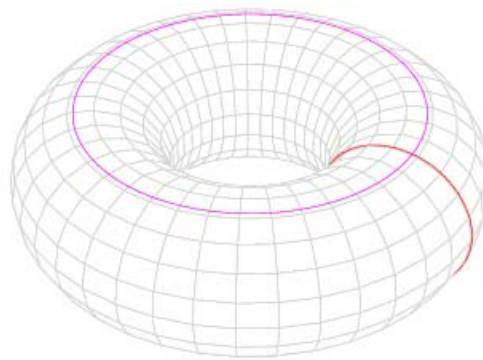
5x5 Περιοχή Moore



Περιοχή Von Neumann

Σχήμα 8.2: Τρία είδη περιοχών πάνω σε κυψελοειδές αυτόματο. Στην περιοχή θεωρούμε ότι συμπεριλαμβάνεται κάθε φορά και το κεντρικό κελί με το πράσινο χρώμα.

Κάθε πράκτορας αλληλεπιδρά, σύμφωνα πάντα με τους κανόνες του συγκεκριμένου μοντέλου, μόνο με τις πράκτορες που βρίσκονται μέσα στην περιοχή του. Αν ενώσουμε τη δεξιά και την αριστερή άκρη του κυψελοειδούς αυτομάτου καθώς και την πάνω και κάτω άκρη παίρνουμε ένα *τόρο (torus)* ή *λουκουμά*.



Σχήμα 8.3: Τόρος ή λουκουμάς.

Μπορούμε να πάρουμε τις προαναφερθείσες περιοχές και πάνω σε ένα τόρο. Η διαφορά φαίνεται στο επόμενο σχήμα.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Σχήμα 8.4: Παραδείγματα 3x3 περιοχών Moore σε ένα κυψελοειδές αυτόματο 10x10 (αριστερά) καθώς και σε ένα τόρο 10x10 (δεξιά).

Θεωρούμε ότι ο αριστερός πίνακας είναι ένα κυψελοειδές αυτόματο 10x10 και ο δεξιός ένας τόρος με τις ίδιες διαστάσεις. Δίνονται τρία παραδείγματα σε κάθε περίπτωση με τις περιοχές των πρακτόρων 1, 44 και 97. Στο κυψελοειδές αυτόματο, οι περιοχές των πρακτόρων αποτελούνται από 9 πράκτορες, όπως της πράκτορα 44 (συμπεριλαμβάνεται και η ίδια η 44), από 6 πράκτορες, όπως η 97 αλλά και από 4 πράκτορες, όπως η 1. Δεξιά όμως, στον τόρο, οι περιοχές όλων των πρακτόρων αποτελούνται από 9 πράκτορες. Και στα δύο σχήματα, η περιοχή του πράκτορα 1 παρουσιάζεται με πορτοκαλί χρώμα ενώ του πράκτορα 97 με γαλάζιο. Στις περιπτώσεις των πρακτόρων 1 και 97 οι περιοχές διαφέρουν από τις αντίστοιχες στο κυψελοειδές αυτόματο δεξιά.

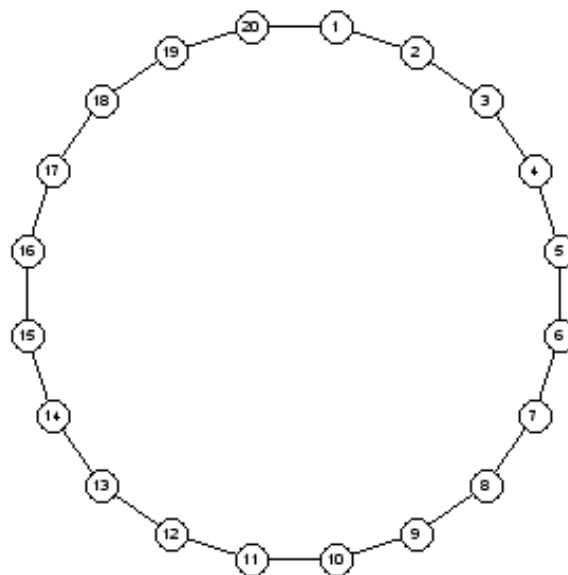
Μια άλλη τοπολογία που προϋποθέτει την τοπικότητα στην επικοινωνία είναι η ευθεία γραμμή, που παρουσιάζεται στο σχήμα 8.5.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	...	98	99	100

Σχήμα 8.5: Τοπολογία της Ευθείας Γραμμής.

Θεωρώντας ότι η διαστάσεις της περιοχής του κάθε πράκτορα είναι 3x1 (ή διαφορετικά μπορούμε να πούμε ότι η ακτίνα κάθε περιοχής ισούται με 1), υποθέτουμε ότι κάθε πράκτορας επικοινωνεί και επηρεάζεται μόνο από τις δύο γειτονικές του πράκτορες, αυτές που βρίσκονται στο αριστερό και στο δεξί κελί σε σχέση με το δικό της. Η πράκτορας 1 επικοινωνεί μόνο με την 2 και η 100 μόνο με την 99. Αν η περιοχή έχει διαστάσεις 5x1 (ή αλλιώς ακτίνα 2), κάθε πράκτορας επικοινωνεί με τις 4 γειτονικές του, τις δύο που βρίσκονται προς τα αριστερά και τις δύο προς τα δεξιά. Προφανώς σ' αυτή την περίπτωση οι πράκτορες 1, 2, 99 και 100 θα επικοινωνούν με λιγότερους από 4 πράκτορες.

Αν επιτρέψουμε την επικοινωνία των πρακτόρων 1 και 100, τότε λαμβάνουμε την τοπολογία «κύκλος» ή αλλιώς έναν κυκλικό γράφο. Στο σχήμα 8.6 παρουσιάζουμε ένα κυκλικό γράφο με 20 κόμβους (πράκτορες).

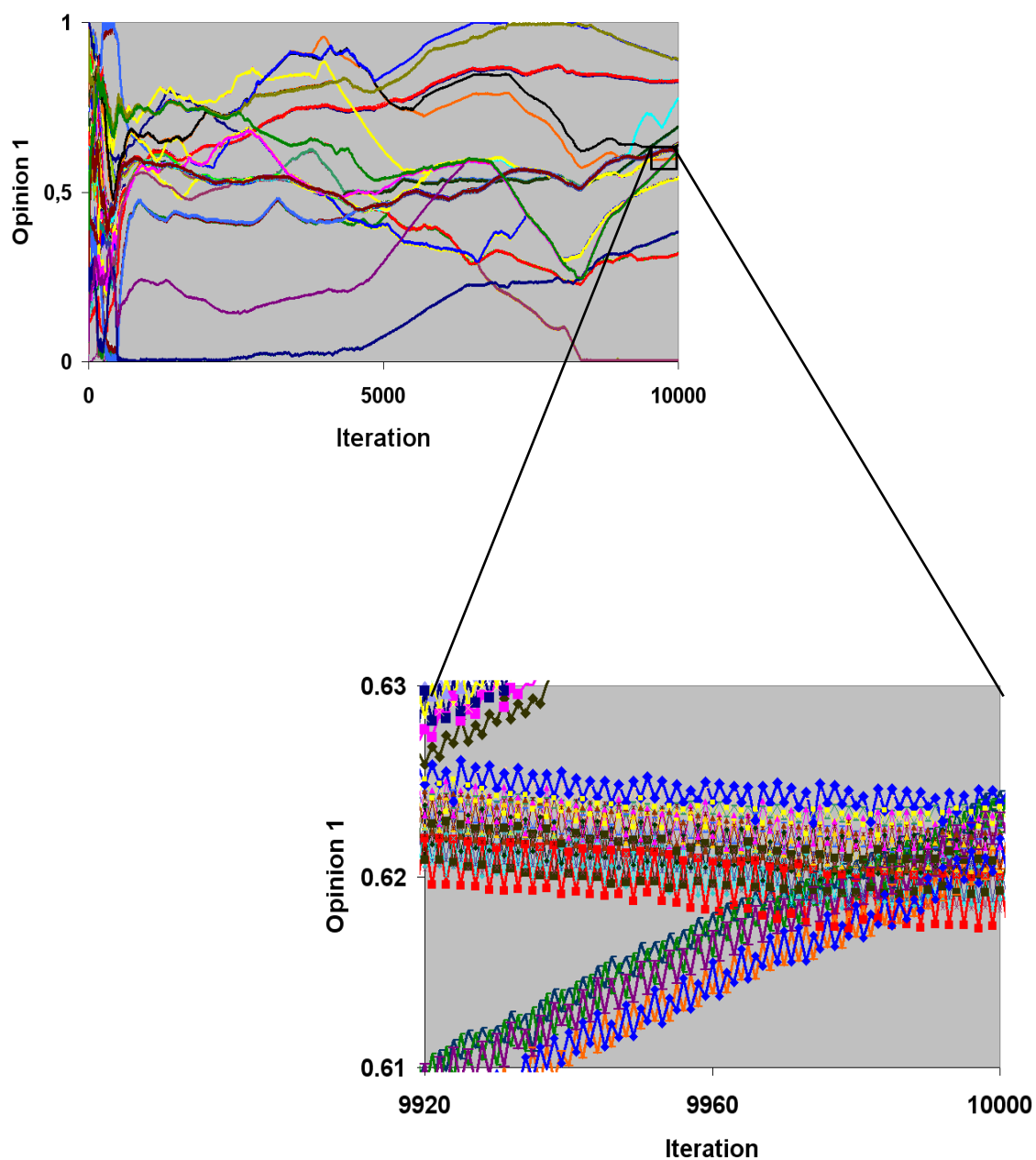


Σχήμα 8.6: Κυκλικός Γράφος

Στο επόμενο κεφάλαιο θα διερευνηθεί η επίδραση της τοπολογίας επικοινωνίας των κυψελοειδών αυτομάτων στο μοντέλο πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ ΠΟΥ ΕΙΣΑΓΟΥΝ ΤΗΝ ‘ΤΟΠΙΚΟΤΗΤΑ’ ΣΤΗΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MER



9.1. Εφαρμογή της Τοπολογίας ενός Κυψελοειδούς Αυτομάτου στο Μοντέλο MER

Μεταξύ των τοπολογιών που προϋποθέτουν την τοπικότητα των αλληλεπιδράσεων και παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο επιλέγουμε να εφαρμόσουμε στο μοντέλο MER πρώτη την τοπολογία των κυψελοειδών αυτομάτων. Υποθέτουμε ότι δύο πράκτορες, ακόμα κι αν έχουν παρόμοια γνώμη, δε θα επικοινωνήσουν αν δεν πληρούν ένα κριτήριο εγγύτητας. Συνεπώς υποθέτουμε την ύπαρξη ενός γεωγραφικού σχήματος αλληλεπίδρασης, ενός είδους «κοινωνικής γεωμετρίας» μεταξύ των πρακτόρων (Klüver, 2004). Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να υποθέσουμε ότι αναφερόμαστε μάλλον σε μεγάλες ομάδες ατόμων ή ακόμη και σε μεγάλες «τεχνητές κοινωνίες» (artificial societies) παρά σε περιορισμένες ομάδες ειδικών, όπως θα μπορούσε να ισχύει για την τοπολογία επικοινωνίας του πλήρους γράφου.

Χρησιμοποιούμε ένα τυχαίο αρχικό προφίλ γνώμων 100 πρακτόρων (το ίδιο αρχικό προφίλ χρησιμοποιείται σε όλες τις προσομοιώσεις της παρούσας διατριβής, εκτός αν δηλώνεται διαφορετικά) που είναι τοποθετημένες σε ένα κυψελοειδές αυτόματο 10x10. Κάθε πράκτορας γνωρίζει τις γνώμες 1 και 2 των πρακτόρων που βρίσκονται στη δική της περιοχή Moore 3x3 (βλέπε σχήμα 9.1) και επηρεάζεται μόνο από αυτές.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Σχήμα 9.1: Κυψελοειδές αυτόματο 10x10 στο οποίο είναι τοποθετημένες οι 100 πράκτορες. Δίνονται ακόμη τρία παραδείγματα περιοχών Moore 3x3 (βλέπε αναλυτική παρουσίαση στο προηγούμενο κεφάλαιο).

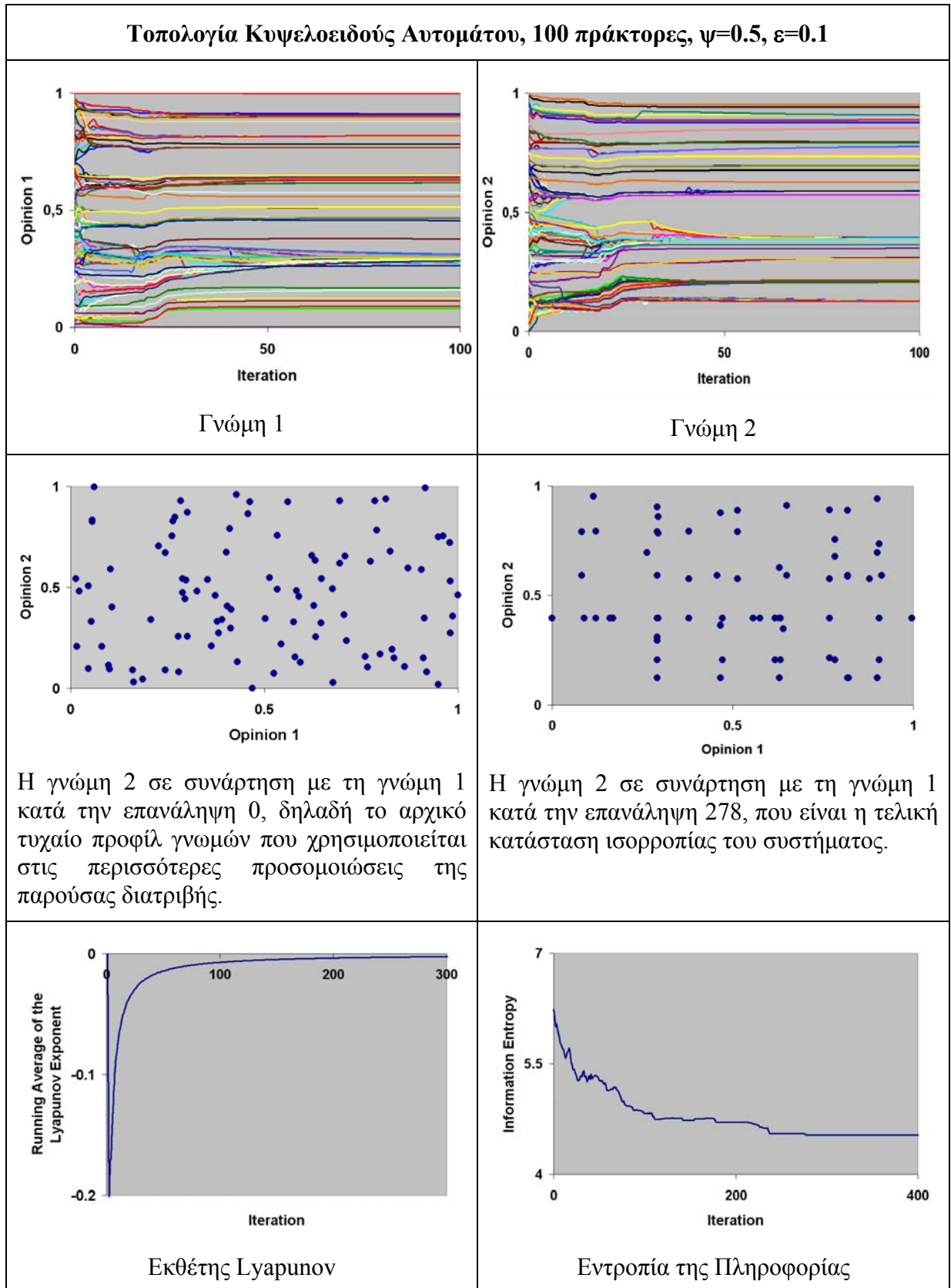
Στη συνέχεια, για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης, ακολουθείται ο αλγόριθμος του Μοντέλου Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών. Στο κεφάλαιο 7 έγινε αναλυτική παρουσίαση του αλγορίθμου, μαζί με δύο συγκεκριμένα παραδείγματα εφαρμογής του και κατά συνέπεια επαναλαμβάνεται μόνο εν συντομία εδώ, για λόγους πληρότητας της παρουσίασης της συγκεκριμένης προσομοίωσης.

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο, κάθε πράκτορας γνωρίζει τις γνώμες μόνο των γειτονικών της πρακτόρων και υπάρχει η δυνατότητα αλληλεπίδρασης με αυτές, μόνο όμως αν η γνώμη τους 1 διαφέρει λιγότερο από το φράγμα εμπιστοσύνης ε (bound of confidence) σε σχέση με τη δική της γνώμη 1. Καμιά πράκτορας δε γνωρίζει τις γνώμες του συνόλου των 100 πρακτόρων, κατά συνέπεια η δυνατότητα αλληλεπίδρασης περιορίζεται σε τοπικό επίπεδο και όχι στο σύνολο των υπολοίπων πρακτόρων, όπως γίνεται όταν ακολουθείται ως τοπολογία επικοινωνίας η τοπολογία του πλήρους γράφου (κεφάλαιο 7). Ακολουθώντας, η πράκτορας υιοθετεί προσωρινά ως γνώμη 1 το μέσο όρο των προαναφερθέντων γνώμων 1. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τη γνώμη 2. Με αυτό τον τρόπο η πράκτορας έχει ισορροπήσει κοινωνικά και είναι σε αρμονία με τη γνώμη των άλλων πρακτόρων. Ανάλογα τότε με τη μεταβολή των δύο γνώμων και σύμφωνα με τον συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ (intra-regulation factor), διορθώνει τη μια από τις δύο γνώμες, αυτή που υπέστη τη μικρότερη μεταβολή. Έτσι η πράκτορας προσπαθεί να ισορροπήσει και ατομικά, είναι δηλαδή ένα σκεπτόμενο ον που δε μπορεί να δεχθεί την επίδραση του κοινωνικού περιβάλλοντος, όταν αυτό προκαλεί μέσα της μια αντίφαση. Η διαδικασία αυτή γίνεται ταυτόχρονα για όλες τις πράκτορες. Στη συνέχεια, αν κάποιες γνώμες βρίσκονται εκτός του διαστήματος $[0,1]$, ακολουθείται η διαδικασία ανακλιμάκωσης, η οποία τροποποιεί όλες τις γνώμες των πρακτόρων, έτσι ώστε αυτές να βρίσκονται στο διάστημα $[0,1]$, χωρίς όμως να μεταβληθεί η δυναμική του συστήματος. Η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή για έναν ικανό αριθμό επαναλήψεων, ώστε το σύστημα να τερματίσει σε μια τελική κατάσταση ή αν είναι χαοτικό να προκύψει μια χαρακτηριστική εικόνα του προς μελέτη. Ο ρόλος του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ και του φράγματος εμπιστοσύνης ε αναλύθηκε διεξοδικά στο κεφάλαιο 5, κατά την αρχική παρουσίαση του μοντέλου. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, χρησιμοποιώντας ως τοπολογία επικοινωνίας αυτή του κυψελοειδούς αυτόματου με περιοχή αλληλεπίδρασης Moore με διάσταση 3×3 (βλέπε σχήμα 9.1) και θα γίνει σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα (για τις ίδιες τιμές των θεμελιωδών παραμέτρων του μοντέλου, του ψ και του ε , που

παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 7 και αφορούσαν στην τοπολογία επικοινωνίας του πλήρους γράφου.

9.2. Αποτελέσματα της Προσομοίωσης για $\psi=0.5$: Η Εφαρμογή της Τοπολογίας του Κυψελοειδούς Αυτομάτου δεν έχει Σημαντική Επίδραση στη Δυναμική του Συστήματος

Στον πίνακα 9.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για $\psi=0.5$ και $\varepsilon=0.1$, με τοπολογία επικοινωνίας αυτή του κυψελοειδούς αυτόματου. Υπενθυμίζεται ότι για τη μικρή αυτή τιμή του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας, η τάση του ατόμου να ισορροπήσει κοινωνικά είναι πιο ισχυρή από την τάση του να ισορροπήσει ατομικά και το άτομο, σε μεγάλο βαθμό, ακολουθεί τη γνώμη των άλλων και μόνο σε μικρό βαθμό διορθώνει τη μια γνώμη, αυτή που υπέστη τη μικρότερη μεταβολή.



Πίνακας 9.1: Αποτελέσματα της προσομοίωσης για το μοντέλο MER, τοπολογία επικοινωνίας κυψελοειδούς αυτόματου, 100 πράκτορες, $\psi=0.5$, $\varepsilon=0.1$.

Στην πρώτη γραμμή του πίνακα 9.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη των γνώμων 1 και 2 των πρακτόρων. Παρατηρούμε ότι οι τροχιές των γνώμων παρουσιάζουν κάποιες μικρές διακυμάνσεις και αυτοοργανώνονται σε ομάδες για ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων και στη συνέχεια, μετά από διακόσιες περίπου επαναλήψεις σταθεροποιούνται σε μια τελική τιμή. Οι γνώμη 1 σε συνάρτηση με τη γνώμη 2 παρουσιάζεται στη δεύτερη γραμμή του πίνακα 9.1 για την αρχική και την τελική κατάσταση του συστήματος. Το σύστημα λοιπόν τερματίζει σε μια σταθερή τελική κατάσταση, όπου οι γνώμες των πρακτόρων έχουν σχηματίσει ένα μεγάλο αριθμό ομάδων, έχουμε δηλαδή κατάτμηση των γνώμων (fragmentation). Αν συγκρίνουμε το αποτέλεσμα αυτό με το αντίστοιχο για την τοπολογία του πλήρους γράφου, που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 7, παρατηρούμε ότι η αλλαγή της τοπολογίας επικοινωνίας των πρακτόρων δεν επηρεάζει σημαντικά τη δυναμική του συστήματος. Με την τοπολογία του κυψελοειδούς αυτομάτου έχουμε απλώς μια μεγαλύτερη κατάτμηση των γνώμων στην τελική κατάσταση, ως συνέπεια του περιορισμού της επικοινωνίας και δυνατότητας αλληλεπίδρασης των πρακτόρων στο τοπικό επίπεδο.

Στην αριστερή στήλη της δεύτερης γραμμής του πίνακα 9.1 παρουσιάζεται η γνώμη 2 σε συνάρτηση με τη γνώμη 1 πριν την έναρξη της προσομοίωσης, κατά την επανάληψη 0. Αυτό το τυχαίο αρχικό προφίλ γνώμων χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή των περισσότερων προσομοιώσεων στην παρούσα διατριβή, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά. Στη δεξιά στήλη παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα για την επανάληψη 278 που αποτελεί και την τελική κατάσταση ισορροπίας που φτάνει το σύστημα. Βεβαίως το σύστημα έχει «σχεδόν» τερματίσει ήδη από την επανάληψη 100, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα της πρώτης γραμμής του πίνακα 9.1. Αυτό σημαίνει ότι οι γνώμες τροποποιούνται μόνο από το τρίτο δεκαδικό ψηφίο και μετά, άρα στην ουσία παραμένουν σταθερές. Οι επιπλέον επαναλήψεις απαιτούνται έτσι ώστε τα σταθερά δεκαδικά ψηφία της κάθε γνώμης να φτάσουν μέχρι το 28^ο δεκαδικό ψηφίο, όπου τελειώνει η ακρίβεια των διενεργούμενων πράξεων του υπολογιστή.

Στο αριστερό διάγραμμα της δεύτερης γραμμής του πίνακα 9.1 απεικονίζονται 100 μπλε κουκίδες, που αντιστοιχούν στις 100 πράκτορες. Οι συντεταγμένες της κάθε κουκίδας αντιστοιχούν στις γνώμες 1 και 2 της αντίστοιχης πράκτορα. Στο δεξί διάγραμμα της ίδιας γραμμής, στην τελική κατάσταση του συστήματος, οι μπλε κουκίδες έχουν γίνει 59, άρα από την αρχική κατάσταση αταξίας των γνώμων των πρακτόρων καταλήγουμε σε μια περιορισμένη οργάνωση των γνώμων των πρακτόρων σε 59 ομάδες, όπου η κάθε ομάδα αποτελείται από 1 ή 2 πράκτορες.

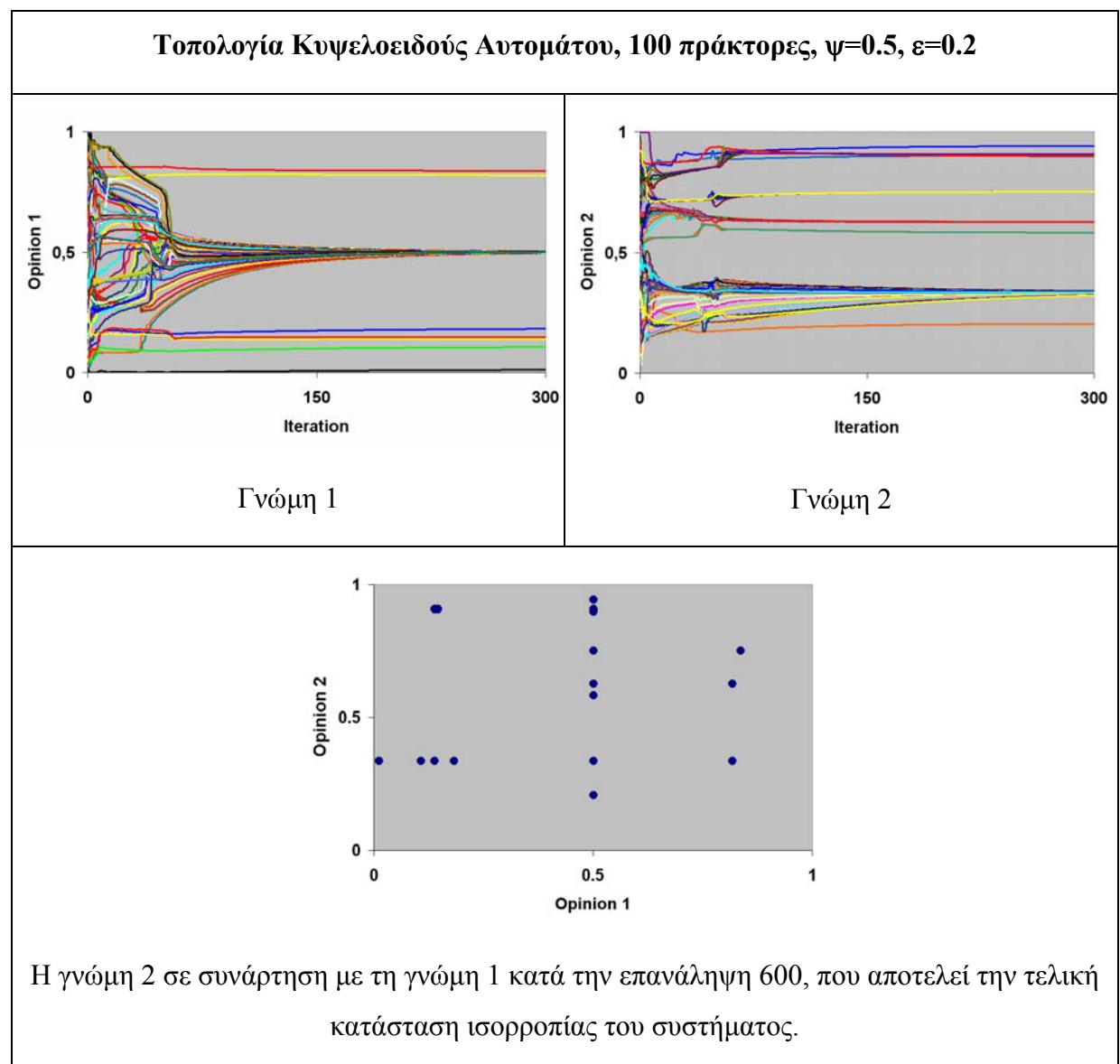
Στην τρίτη γραμμή του πίνακα 9.1 παρουσιάζεται ο εκθέτης Lyapunov και η εντροπία της πληροφορίας. Οι δύο αυτές έννοιες έχουν αναλυθεί διεξοδικά στο κεφάλαιο 7, όπου και υπολογίσθηκαν για την τοπολογία επικοινωνίας του πλήρους γράφου. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται ταυτόχρονα με την εξέλιξη των γνώμων των πρακτόρων για τις τιμές των παραμέτρων ψ και ε που μελετώνται κάθε φορά. Υπενθυμίζουμε ότι αν ο εκθέτης Lyapunov είναι θετικός, αυτό σημαίνει ότι απειροελάχιστα μικρά λάθη αυξάνονται εκθετικά σε κάθε επανάληψη και οι κοντινές τροχιές απομακρύνονται, δηλαδή ότι η παραμικρή διαταραχή του συστήματος μεγαλώνει εκθετικά και η δυνατότητα πρόβλεψης χάνεται, άρα το σύστημα είναι χαοτικό. Αρνητικός εκθέτης Lyapunov σημαίνει ότι οι κοντινές τροχιές έλκονται μεταξύ τους και το λάθος μικραίνει συνεπώς το σύστημα κατασταλάζει σε ένα σταθερό σημείο (fixed point) ή ένα περιοδικό κύκλο (periodic cycle). Μηδενικός Εκθέτης Lyapunov δείχνει μια οριακά σταθερή τροχιά (marginally or neutrally stable orbit).

Η εξέλιξη του εκθέτη Lyapunov του συστήματος παρουσιάζεται στην αριστερή στήλη της τρίτης γραμμής του πίνακα 9.1. Όπως και στην περίπτωση του πλήρους γράφου ο μέσος όρος των τοπικών εκθετών Lyapunov (running average of the Lyapunov exponent) είναι αρνητικός για ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων και τείνει στο μηδέν καθώς το σύστημα φτάνει στην τελική κατάσταση. Άρα ο εκθέτης Lyapunov ισούται με μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι οποιοδήποτε λάθος ή παρέκκλιση εφαρμοστεί σε μια τροχιά, με την πάροδο του χρόνου μικραίνει και τελικά μηδενίζεται, κατά συνέπεια το σύστημα είναι προβλέψιμο.

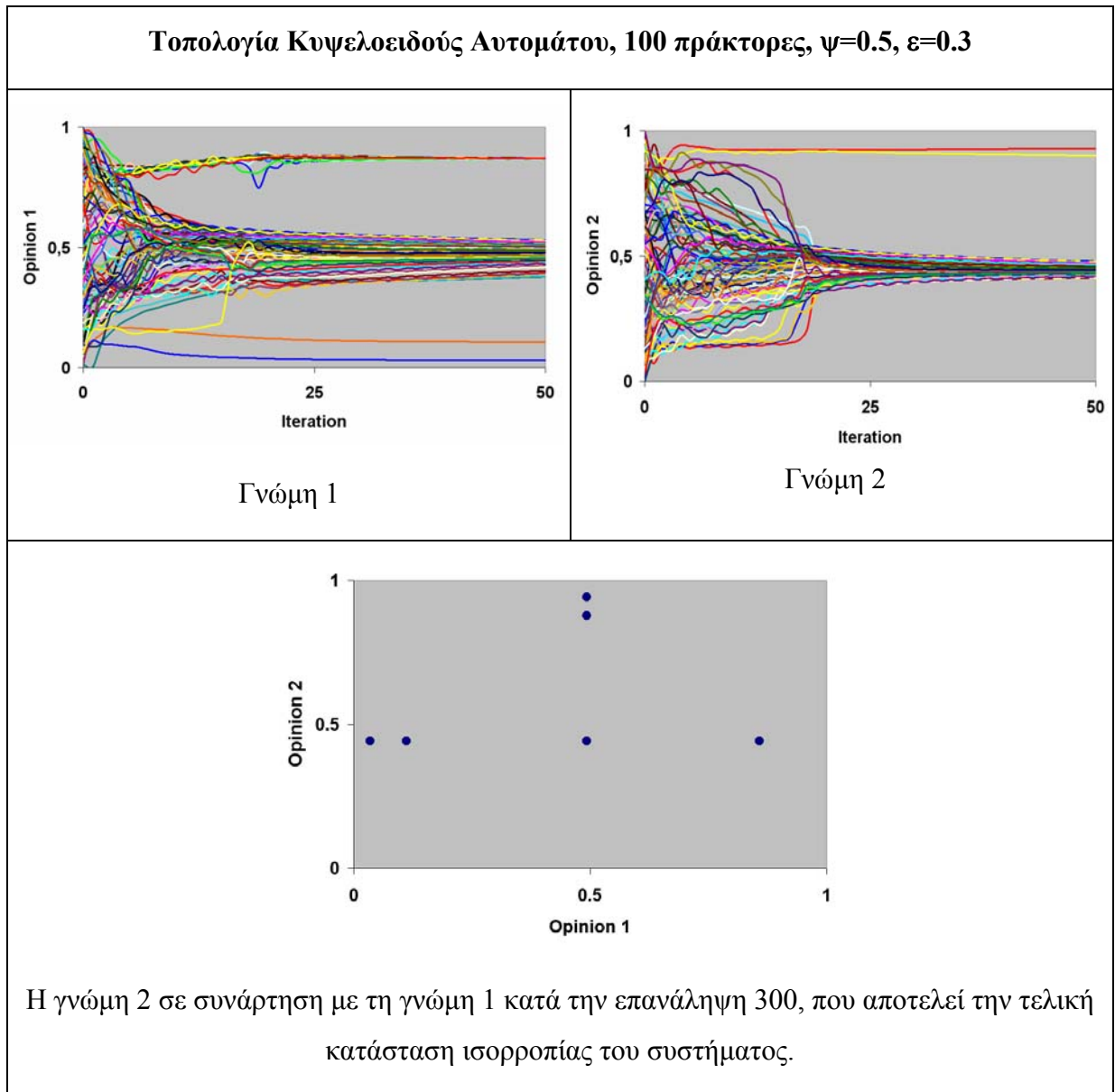
Η εντροπία του συστήματος παρουσιάζεται στη δεξιά στήλη της τρίτης γραμμής του πίνακα 9.1. Πρόκειται για την εντροπία της πληροφορίας (βλέπε ενότητα 7.5). Η εντροπία αποτελεί δείκτη απόκλισης από την ισορροπία και χαοτικής συμπεριφοράς, εκφράζει δηλαδή το μέτρο της αταξίας ενός συστήματος. Όταν η εντροπία της πληροφορίας αυξάνεται, το σύστημα γίνεται λιγότερο ομοιογενές και περισσότερο αποδιοργανωμένο (στο μοντέλο MER αυτό σημαίνει ότι σχηματίζεται ένας μεγάλος αριθμός ομάδων) ενώ όταν μειώνεται το σύστημα γίνεται περισσότερο ομοιόμορφο και οργανωμένο (Lugan, 1993). Η αρχική τιμή της εντροπίας είναι ίση με 6.24 όπως και στις υπόλοιπες προσομοιώσεις που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 7 χρησιμοποιώντας την τοπολογία του πλήρους γράφου, μιας και χρησιμοποιούμε το ίδιο τυχαίο αρχικό προφίλ γνώμων για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων. Παρατηρούμε ότι η εντροπία μειώνεται με γρήγορο ρυθμό για τις πρώτες 100 περίπου επαναλήψεις και στη

συνέχεια συνεχίζει να μειώνεται, με πιο αργό όμως ρυθμό, ως την επανάληψη 278 όπου λαμβάνει την τελική τιμή της 4.53, που αντιστοιχεί στην τελική σταθερή κατάσταση του συστήματος. Η μείωση της εντροπίας είναι σχετικά μικρή και αντιστοιχεί στο μικρό βαθμό αυτοοργάνωσης του συστήματος και την κατάτμηση των γνώμων.

Στη συνέχεια, για να μελετήσουμε την επίδραση του φράγματος εμπιστοσύνης ε στη δυναμική του συστήματος όταν $\psi=0.5$ καθώς και στον αριθμό των σχηματιζομένων ομάδων, παρουσιάζουμε στους πίνακες 9.2 και 9.3 τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για $\varepsilon=0.2$ και $\varepsilon=0.3$ αντίστοιχα.



Πίνακας 9.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, τοπολογία κυψελοειδούς αυτόματου, 100 πράκτορες, $\psi=0.5$, $\varepsilon=0.2$.



Πίνακας 9.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, τοπολογία κυψελοειδούς αυτόματου, 100 πράκτορες, $\psi=0.5$, $\varepsilon=0.3$.

Παρατηρούμε ότι το μέγεθος του φράγματος εμπιστοσύνης ε δε συμβάλει ουσιαστικά στη δυναμική του συστήματος και δεν επηρεάζει τη δυνατότητα πρόβλεψης (όπως συμβαίνει με τον συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ), αλλά καθορίζει τον αριθμό των σχηματιζόμενων ομάδων, όπως συμβαίνει όταν η τοπολογία επικοινωνίας είναι αυτή του πλήρους γράφου (βλέπε κεφάλαιο 7) αλλά και στο Μοντέλο Περιορισμένης Εμπιστοσύνης των Hegselmann και Krause (βλέπε κεφάλαιο 4). Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις το ε συμβάλει ουσιαστικά στην τελική κατάσταση του συστήματος, καθορίζοντας τον τελικό αριθμό των σχηματιζόμενων ομάδων, αν δηλαδή

έχουμε συμφωνία (consensus) για $\varepsilon=0.3$ ή μεγαλύτερο, πόλωση (polarization) για ε περίπου ίσο με 0.2 και κατάτμηση (fragmentation) για ε περίπου ίσο με 0.1. Η τοπολογία του κυψελοειδούς αυτόματου περιορίζει την επικοινωνία σε τοπικό επίπεδο και έτσι επαυξάνει σημαντικά τον περιορισμό της αλληλεπίδρασης που επιβάλλει το φράγμα εμπιστοσύνης ε . Όπως αναφέραμε και προηγούμενα, για $\varepsilon=0.1$ έχουμε κατάτμηση των γνώμων, με το σχηματισμό 59 ομάδων στην τελική κατάσταση (πίνακας 9.1, δεύτερη γραμμή), για $\varepsilon=0.2$ σχηματίζονται 15 ομάδες στην τελική κατάσταση (πίνακας 9.2, δεύτερη γραμμή), ενώ για $\varepsilon=0.3$ σχηματίστηκαν 6 ομάδες (πίνακας 9.3, δεύτερη γραμμή). Βέβαια στην τελευταία περίπτωση μία ομάδα περιλαμβάνει σχεδόν όλους τους πράκτορες. Οι υπόλοιπες ομάδες περιλαμβάνουν ένα ή δύο πράκτορες που λόγω της ιδιότητας της τοπικότητας στην επικοινωνία και της διαφοράς των γνώμων τους με τις γειτονικές πράκτορες απομονώθηκαν ως προς τη μια γνώμη και δε μπόρεσαν να αλληλεπιδράσουν με το σύνολο των υπολοίπων πρακτόρων. Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 7.2.1, για την τοπολογία επικοινωνίας του πλήρους γράφου *δεν υπάρχει ομάδα ή πράκτορας απομονωμένη από τις άλλες*, υπάρχει συνεχής αλληλεπίδραση των ομάδων των πρακτόρων μέχρι και την τελική κατάσταση και δεν σχηματίζονται σύνολα (ομάδες) πρακτόρων που να σταματούν να αλληλεπιδρούν με όλους τους υπόλοιπους πράκτορες. Το συμπέρασμα ισχύει και για την τοπολογία επικοινωνίας του κυψελοειδούς αυτόματου καθώς και για οποιαδήποτε άλλη τοπολογία επικοινωνίας και είναι χαρακτηριστικό για το μοντέλο MER.

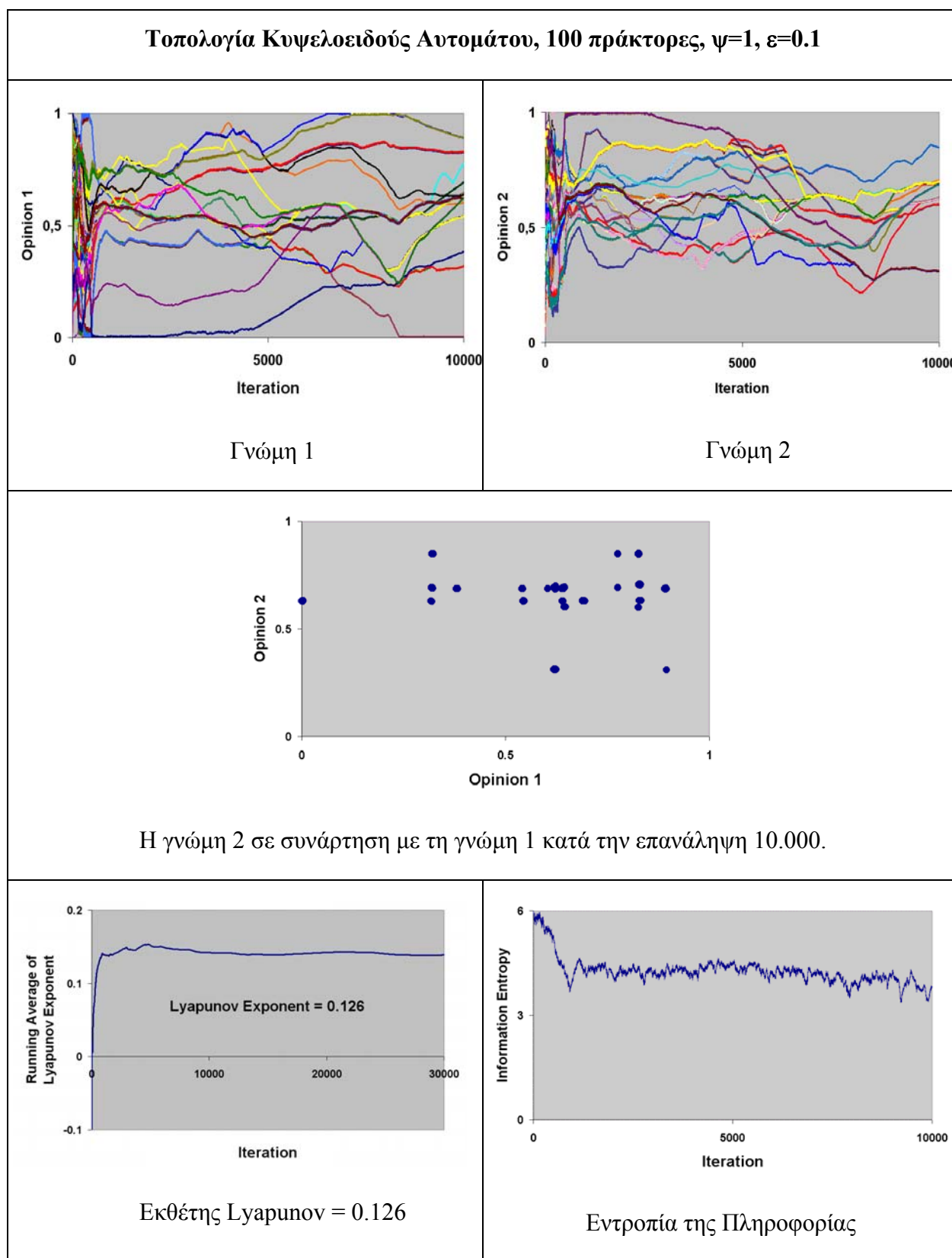
Έχει ελεγχθεί ότι όλες οι προαναφερθείσες ιδιότητες ισχύουν για 10 ακόμη επαναλήψεις της προσομοίωσης με διαφορετικές τυχαίες αρχικές συνθήκες για τις συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων και την τοπολογία επικοινωνίας, άρα είναι χαρακτηριστικά των υποθέσεων του μοντέλου και δεν προέκυψαν μόνο για τη συγκεκριμένη αρχική συνθήκη.

Ο εκθέτης Lyapunov καθώς και η εντροπία της πληροφορίας για $\varepsilon=0.2$ και $\varepsilon=0.3$ δεν παρουσιάζουν διαφορές με την περίπτωση όπου $\varepsilon=0.1$ και για το λόγο αυτό η παρουσίασή τους παραλείπεται.

9.3. Αποτελέσματα της Προσομοίωσης για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$:

Διαταράσσοντας την Περιοδικότητα Οδηγούμαστε στο Χάος

Όπως διαπιστώθηκε στο κεφάλαιο 6, το μοντέλο MER με την τοπολογία του πλήρους γράφου (όλοι οι πράκτορες επικοινωνούν μεταξύ τους και αλληλεπιδρούν) παρουσιάζει περιοδικότητα για $\psi=1$ ανεξάρτητα από την τιμή του φράγματος εμπιστοσύνης ε . Θα μπορούσαμε να πούμε ότι το σύστημα σ' αυτήν την περίπτωση είναι πλήρως ισορροπημένο αλλά όχι ακίνητο. Η περιοδική κίνηση, που προκύπτει σαν τελική κατάσταση των προσομοιώσεων με αυτές τις τιμές των παραμέτρων, είναι ένα εντυπωσιακό αποτέλεσμα, το οποίο δεν έχει παρατηρηθεί σε κανένα άλλο δραστοστρεφές μοντέλο στις κοινωνικές προσομοιώσεις. Η περιοδική αυτή κίνηση συνιστά μια δυναμική ισορροπία του συστήματος που κινείται, έχοντας όμως ισορροπήσει απόλυτα, κάτι μάλλον απίθανο όσον αφορά την κοινωνική πραγματικότητα. Αντιθέτως, για την ίδια τιμή του ψ με την τοπολογία των κυψελοειδών αυτομάτων και $\varepsilon=0.1$ ή $\varepsilon=0.2$ ή $\varepsilon=0.3$ μια ριζική αλλαγή λαμβάνει χώρα στην δυναμική του συστήματος: η περιοδικότητα μεταμορφώνεται σε χάος. Για την τοπολογία επικοινωνίας των κυψελοειδών αυτομάτων και την τιμή του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας $\psi=1$ λαμβάνουμε τα πιο ενδιαφέροντα αποτελέσματα που έχει δώσει, τουλάχιστον ως τώρα, το μοντέλο. Στον πίνακα 9.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$ με την τοπολογία των κυψελοειδών αυτομάτων.



Πίνακας 9.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, τοπολογία επικοινωνίας κυψελοειδούς αυτομάτου, 100 πράκτορες, $\psi=1$, $\varepsilon=0.1$.

Παρατηρούμε στις πρώτες 1000 περίπου επαναλήψεις μια αυτοοργάνωση των γνωμών των 100 πρακτόρων, η οποία έχει παρατηρηθεί και στις προηγούμενες προσομοιώσεις. Αυτό που διαφέρει όμως εδώ είναι ότι οι ομάδες αυτές συνεχίζουν να κινούνται με ένα χαοτικό τρόπο (όπως θα αποδειχθεί και στη συνέχεια), χωρίς ποτέ το σύστημα να κατασταλάζει σε μια τελική κατάσταση. Πρόκειται για μια δυναμική ισορροπία που εξελίσσεται επ' άπειρον. Περιστασιακά δύο ομάδες ενώνονται σε μία ή μια ομάδα διαχωρίζεται σε δύο. Άλλες φορές κάποια πράκτορας εγκαταλείπει μια ομάδα για να προσαρτηθεί σε κάποια άλλη.

Η εικόνα που παρουσιάζεται στην πρώτη γραμμή του πίνακα 9.4 αποτελεί και το πιο εντυπωσιακό ίσως αποτέλεσμα που έχει δώσει, τουλάχιστον ως τώρα, το μοντέλο MER. Κάποιες επίσης από τις ιδιότητές του που θα αναλυθούν στη συνέχεια, όπως η χαοτική συμπεριφορά, η συνεχής κίνηση των πρακτόρων, η μη ταύτιση των γνωμών των πρακτόρων που ανήκουν στην ίδια ομάδα καθώς και η μη ύπαρξη τελικής κατάστασης για το σύστημα δεν έχουν παρατηρηθεί ως τώρα σε κανένα άλλο δραστοστρεφές μοντέλο κοινωνικής προσομοίωσης.

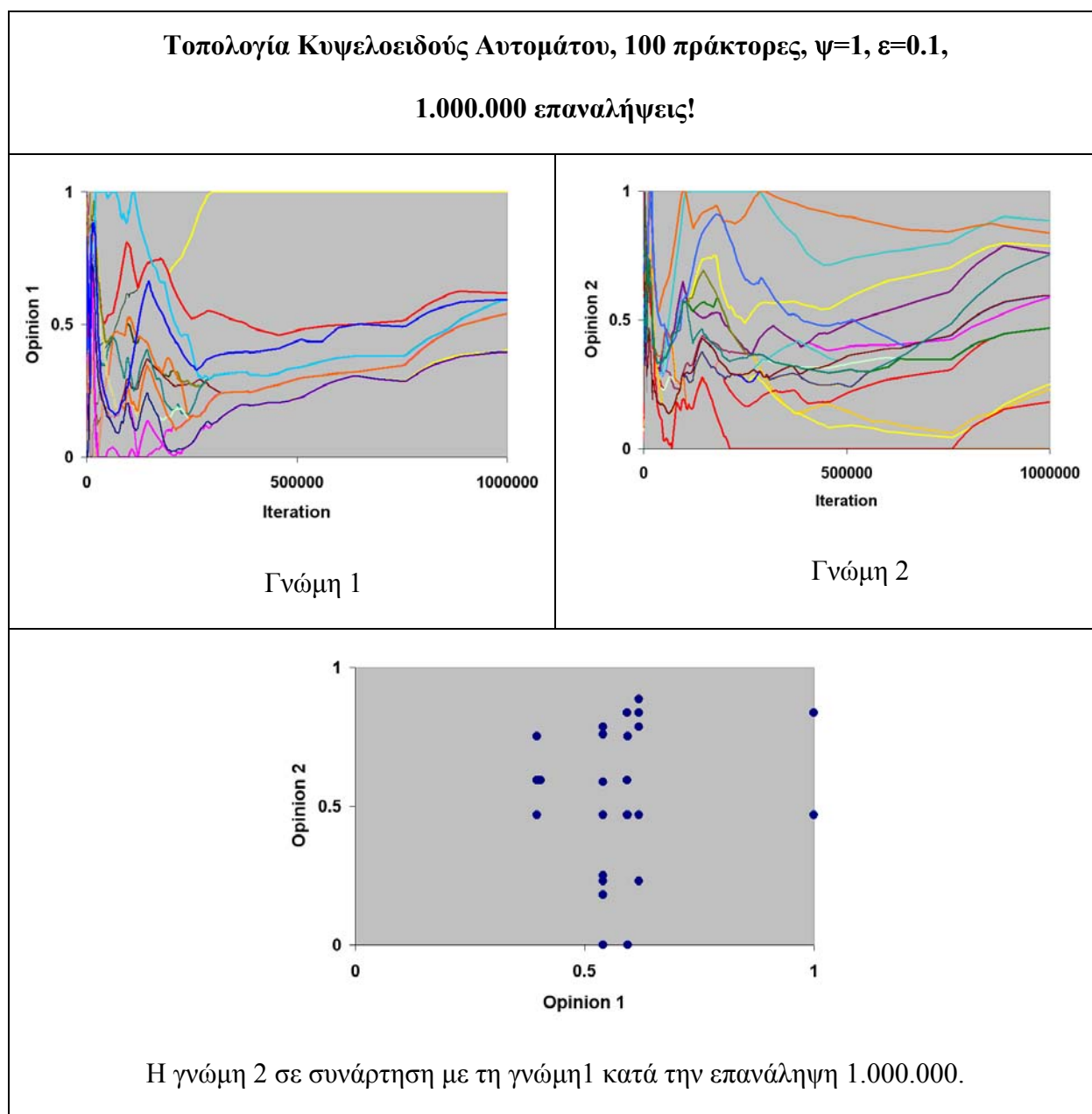
Στη δεύτερη γραμμή του πίνακα 9.4 παρουσιάζεται η γνώμη 2 σε συνάρτηση με τη γνώμη 1. Κάθε τελεία αντιστοιχεί σε μια ομάδα πρακτόρων οι οποίοι έχουν την ίδια γνώμη 1 και 2, αλληλεπιδρούν όμως μόνο ως προς τη μια γνώμη και με πράκτορες άλλων ομάδων, όπως θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα.

Στην τρίτη γραμμή του πίνακα 9.4 παρουσιάζεται ο εκθέτης Lyapunov και η εντροπία της πληροφορίας. Ο εκθέτης Lyapunov είναι θετικός και συγκλίνει στον αριθμό 1.126. Πρόκειται δηλαδή για ένα χαοτικό σύστημα, στο οποίο οποιαδήποτε απόκλιση μεγαλώνει εκθετικά και οποιαδήποτε μακροπρόθεσμη πρόβλεψη είναι αδύνατη. Υπάρχει η δυνατότητα για κάποιες βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, μέσα σε ένα χρονικό ορίζοντα, όπως θα αναλυθεί στην ενότητα 9.8.

Η εντροπία της πληροφορίας αυξομειώνεται επίσης με ένα χαοτικό τρόπο. Μετά τις αρχικές 1000 περίπου επαναλήψεις, όπου η εντροπία μειώνεται με γρήγορο ρυθμό και το σύστημα αυτοοργανώνεται, στη συνέχεια αυξομειώνεται με χαοτικό τρόπο, χωρίς ποτέ να σταθεροποιηθεί σε κάποια τιμή. Άρα το σύστημα οργανώνεται και αποδιοργανώνεται και ο αριθμός των ομάδων των πρακτόρων αυξομειώνεται συνεχώς, δίχως να καταλήξει ποτέ σε κάποια σταθερή τελική κατάσταση. Στη συνέχεια θα διερευνήσουμε τις ιδιότητες του μοντέλου για τις παρούσες τιμές των παραμέτρων.

9.3.1. Το σύστημα δεν τερματίζει για ένα εκατομμύριο επαναλήψεις!

Για να βεβαιωθούμε μάλιστα ότι το σύστημα δεν σταθεροποιείται σε κάποια τελική κατάσταση, επαναλαμβάνουμε την προσομοίωση για 1.000.000 επαναλήψεις²².



Πίνακας 9.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER με την τοπολογία κυψελοειδούς αυτομάτου για ένα εκατομμύριο επαναλήψεις, 100 πράκτορες, $\psi=1$, $\varepsilon=0.1$.

Παρατηρούμε ότι το σύστημα εμφανίζει παρόμοια εικόνα όσον αφορά στη δυναμική του με την παρουσίαση των πρώτων 10.000 επαναλήψεων (πίνακας 9.4).

²² Ο υπολογιστής μας (Pentium(R) 4 με CPU 3.40GHz και 1.00 GB RAM) χρειάστηκε 3 εβδομάδες για να ολοκληρώσει την προσομοίωση αυτή.

Έχουμε επαναλάβει την προσομοίωση αυτή με τρία διαφορετικά αρχικά τυχαία προφίλ γνωμών και λάβαμε σε όλες τις περιπτώσεις το ίδιο αποτέλεσμα. Ακόμη και μετά τον εξωπραγματικό αριθμό του ενός εκατομμυρίου επαναλήψεων, το σύστημα βρίσκεται ακόμη σε κίνηση, γεγονός που αποτελεί ισχυρότατη ένδειξη ότι το σύστημα δεν τερματίζει. Ακόμη όμως κι αν το σύστημα τερματίσει μετά από κάποια δισεκατομμύρια επαναλήψεις, αυτό θα οφείλεται στη διαδικασία ανακλιμάκωσης του μοντέλου MER, η οποία συμπίεζει τις γνώμες και το φράγμα εμπιστοσύνης ϵ . Όταν το ϵ φτάσει να γίνει της τάξης του 10^{-28} δε θα υπάρχει δυνατότητα να πραγματοποιηθούν οι απαιτούμενες πράξεις²³, κατά συνέπεια ο υπολογιστής θα στρογγυλοποιήσει τις γνώμες των πρακτόρων και το σύστημα θα τερματίσει. Το γεγονός αυτό όμως δεν αναιρεί την ύπαρξη αυτής της θεμελιώδους ιδιότητας του συστήματος, το μη τερματισμό του σε μια τελική κατάσταση. Αυτή είναι μια ιδιότητα του μοντέλου ανεξάρτητη από την υπολογιστική δύναμη κατά την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων.

Η μη ύπαρξη τελικής κατάστασης είναι μια ιδιότητα που δεν έχει κανένα άλλο γνωστό δραστοστρεφές μοντέλο στο χώρο των κοινωνικών προσομοιώσεων. Όλα τα γνωστά μοντέλα δυναμικής εξέλιξης των γνωμών, όπως της Πολιτισμικής Διασποράς του Άξελροντ, το Δυναμικό Μοντέλο της Θεωρίας της Κοινωνικής Απήχησης των Nowak και Latané ή το Μοντέλο Περιορισμένης Εμπιστοσύνης των Hegselmann και Krause τερματίζουν μετά από ένα μικρότερο ή μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων. Μεγάλο μέρος από τη μελέτη των μοντέλων αυτών αφορά στην τελική κατάσταση, όπως ο αριθμός των σχηματιζομένων ομάδων στα μοντέλα του Άξελροντ και των Hegselmann και Krause, ή απλώς την επιβίωση της ομάδας με το μικρότερο αριθμό πρακτόρων (της μειοψηφίας) στο μοντέλο των Nowak και Latané. Στο μοντέλο MER κάτι παρόμοιο θα ήταν αδύνατο. Δεν υπάρχει τελική κατάσταση στην οποία θα μπορούσαμε να σταθούμε και να διερευνήσουμε. Είναι δυνατή μόνο η μελέτη της εξέλιξης του αριθμού των ομάδων στο χρόνο (στις επαναλήψεις). Στη συνέχεια θα μελετήσουμε τις ομάδες των πρακτόρων στο μικρό και μεγάλο επίπεδο καθώς και τους μηχανισμούς με τους οποίους οι ομάδες, ενώνονται ή διασπώνται καθώς και το μηχανισμό που οδηγεί μια πράκτορα να εγκαταλείψει μια ομάδα και να προσαρτηθεί σε μια άλλη.

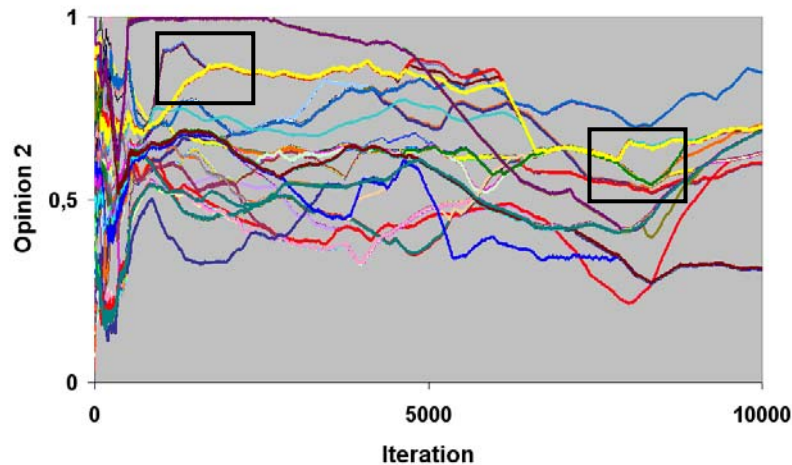
²³ Υπενθυμίζεται ότι η ακρίβεια που έχουν διενεργηθεί οι απαιτούμενες πράξεις είναι 28 δεκαδικά ψηφία.

9.3.2 Μελέτη των Ομάδων των Πρακτόρων στο Μοντέλο MER

Όσον αφορά στο σχηματισμό των ομάδων στο μοντέλο MER έχει γίνει ήδη μια πρώτη διερεύνηση στην ενότητα 7.2.1.1 για την τοπολογία του πλήρους γράφου. Στην παρούσα ενότητα θα μελετηθεί το ίδιο φαινόμενο για την τοπολογία των κυψελοειδών αυτομάτων, όπου όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, η διαφορά στα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι συντριπτική.

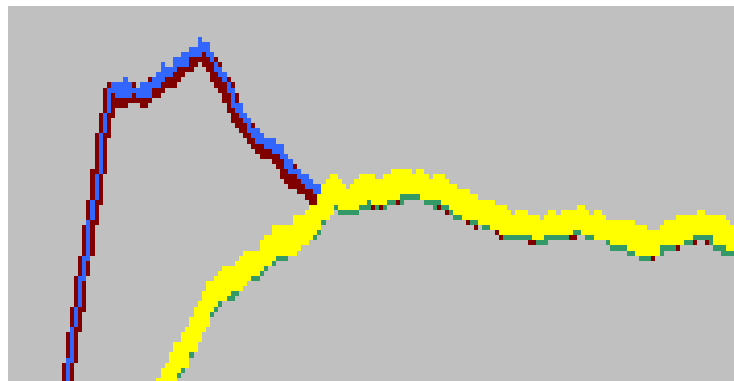
9.3.2.1. Διερεύνηση των Ομάδων στο Μάκρο Επίπεδο

Αρχικά θα γίνει διερεύνηση της συμπεριφορά των γνώμων των πρακτόρων στο μάκρο επίπεδο, όσον αφορά στο σχηματισμό των ομάδων. Η διαδικασία αυτή σχηματισμού των ομάδων και έντονης αυτοοργάνωσης λαμβάνει χώρα κατά τις πρώτες περίπου χίλιες επαναλήψεις. Αυτό φαίνεται και από την πρώτη γραμμή του πίνακα 9.4 που δείχνει την εξέλιξη κάθε γνώμης ξεχωριστά, αλλά και από την τρίτη γραμμή του ίδιου πίνακα, όπου παρουσιάζεται η εξέλιξη της εντροπίας της πληροφορίας του συστήματος. Η εντροπία μειώνεται με γρήγορο ρυθμό κατά τις πρώτες χίλιες επαναλήψεις και στη συνέχεια συνεχίζει να κινείται ακανόνιστα με συνεχείς αυξομειώσεις της τιμής της. Όσες επαναλήψεις κι αν εκτελεσθούν, η τιμή της εντροπίας δε σταθεροποιείται, ούτε καν για δύο διαδοχικές επαναλήψεις, μιας και το σύστημα δεν κατασταλάζει σε μια τελική κατάσταση. Μετά το σχηματισμό τους, οι ομάδες αυτές συνεχίζουν να κινούνται με ένα χαοτικό τρόπο, όπως θα αποδειχθεί και στη συνέχεια. Πρόκειται για μια δυναμική ισορροπία που εξελίσσεται επ' άπειρον. Περιστασιακά δύο ομάδες ενώνονται σε μία ή μια ομάδα διαχωρίζεται σε δύο. Άλλες φορές κάποια πράκτορας εγκαταλείπει μια ομάδα για να προσαρτηθεί σε κάποια άλλη. Στη συνέχεια θα αναλυθούν τα φαινόμενα αυτά καθώς και οι μηχανισμούς που αφορούν το διαχωρισμό ή τη συνένωση δύο τροχιών γνώμων. Στο σχήμα 9.2, παρουσιάσουμε εκ νέου το διάγραμμα της εξέλιξης της γνώμης 2 της πρώτης γραμμής του πίνακα 9.4 και στα σχήματα 9.3 και 9.4 δύο λεπτομέρειες του διαγράμματος αυτού.



Σχήμα 9.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, τοπολογία κυψελοειδούς αυτομάτου, 100 πράκτορες, $\psi=1$, $\varepsilon=0.1$. Παρουσιάζεται η γνώμη 2 για τις πρώτες 10000 επαναλήψεις.

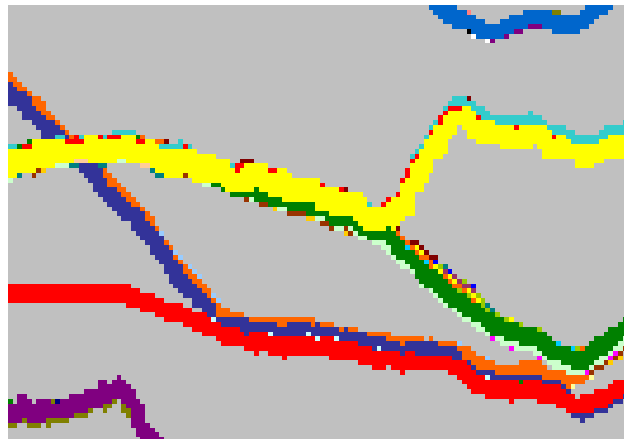
Στο σχήμα 9.2 παρουσιάζουμε την εξέλιξη της γνώμης 2 των 100 πρακτόρων για τις πρώτες 10000 επαναλήψεις. Στο σχήμα 9.3 απεικονίζεται σε μεγέθυνση το πάνω αριστερά ορθογώνιο του σχήματος 9.2.



Σχήμα 9.3: Μεγέθυνση του πάνω αριστερά ορθογώνιου του σχήματος 9.2.

Σ' αυτό το σχήμα παρατηρούμε τη συνένωση δύο τροχιών των γνώμων 2 ενός αριθμού πρακτόρων. Δυστυχώς από το σχήμα δεν είναι δυνατό να διακρίνει κανείς πόσες γνώμες πρακτόρων βρίσκονται κάτω από αυτές τις τροχιές. Μπορούμε να δούμε ότι η τροχιά με το μπλε χρώμα και η σχεδόν ταυτόσημη τροχιά με το καφέ χρώμα αντιστοιχούν σε τουλάχιστον μία πράκτορα η καθεμία. Στην πραγματικότητα πρόκειται για πέντε πράκτορες, με τις τροχιές των υπολοίπων τριών να μην είναι δυνατό να διακριθούν, καθώς καλύπτονται από το μπλε και το καφέ χρώμα. Από το μέσον του

σχήματος και έπειτα όλες αυτές οι τροχιές καλύπτονται από το κίτρινο χρώμα κάποιας άλλης τροχιάς. Μάλιστα στο κάτω μέρος της κίτρινης τροχιάς μπορεί να διακριθεί μια πράσινη τροχιά. Στην πραγματικότητα, αρχικά κάτω από την κίτρινη τροχιά κρύβονταν οι τροχιές τριών άλλων πρακτόρων, (η μια έχει πράσινο χρώμα και διακρίνεται λίγο). Μετά τη συνένωση της κίτρινης με την μπλε τροχιά, η κίτρινη τροχιά κρύβει από κάτω της οκτώ άλλες τροχιές. Το χρώμα που επικρατεί είναι τυχαίο και εξαρτάται από τον αριθμό του πράκτορα κατά την αρχή της προσομοίωσης. Το πρόγραμμα Microsoft Excel, με τη βοήθεια του οποίου έγιναν τα παραπάνω σχήματα, χρωματίζει την τροχιά της κάθε γνώμης με τη σειρά, πρώτα τη γνώμη της πράκτορα 1, μετά της 2 κλπ. Οι αριθμοί δίνονται στους πράκτορες με τη σειρά που εμφανίζονται στο κυψελοειδές αυτόματο, ξεκινώντας από την πάνω αριστερά θέση, όπως είναι σημειωμένοι στο σχήμα 9.1. Κατά συνέπεια, η πράκτορας με το μεγαλύτερο αριθμό καλύπτει με το χρώμα της τροχιάς της τις άλλες πράκτορες που έχουν την ίδια τροχιά. Δυστυχώς δεν υπάρχει τρόπος να γίνει απεικόνιση σε ένα διάγραμμα των τροχιών των πρακτόρων καθώς και του πλήθους των πρακτόρων που περιλαμβάνει η κάθε τροχιά. Στη συνέχεια, στο σχήμα 9.4 παρουσιάζεται η μεγέθυνση του πάνω δεξιά ορθογωνίου του σχήματος 9.2.

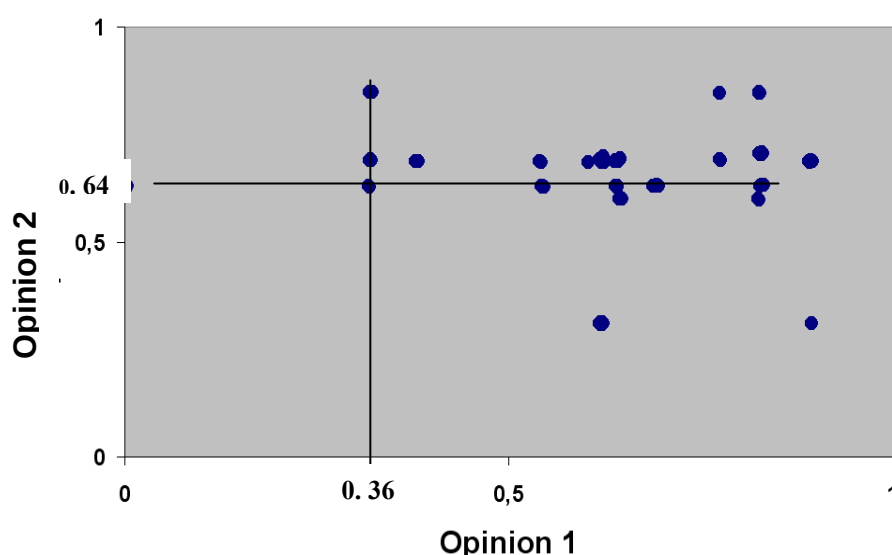


Σχήμα 9.4: Μεγέθυνση του πάνω δεξιά ορθογωνίου του σχήματος 9.2.

Στο σχήμα 9.4 μπορούμε να παρατηρήσουμε κάποιες άλλες ιδιότητες των τροχιών των γνώμων των πρακτόρων. Στην παρούσα παράγραφο θα αναφερόμαστε στην μπλε ή κίτρινη ή πράσινη πράκτορα για λόγους συντομίας και απλότητας, εννοώντας την τροχιά της γνώμης 2 των αντίστοιχων πρακτόρων. Στο αριστερό άκρο του σχήματος 9.4 οι μπλε και πορτοκαλί (διακρίνεται αμυδρά) πράκτορες διασταυρώνονται με την κίτρινη (και όσες κρύβονται κάτω από αυτήν) χωρίς όμως να αλληλεπιδρούν, μιας και βρίσκονται σε διαφορετικά απομακρυσμένα σημεία του κυψελοειδούς αυτομάτου. Η

μπλε και πορτοκαλί πράκτορας ενώνονται με την κόκκινη, η κίτρινη (που αποτελείται από πολλές τροχιές) διασπάται και προκύπτει κίτρινη και πράσινη (και κάποιες ακόμα). Η πορτοκαλί διαχωρίζεται από την μπλε και κόκκινη και ενώνεται με την πράσινη. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι σε αυτές τις ιδιότητες των τροχιών αντιστοιχούν ιδιότητες της εξέλιξης των γνώμων των ατόμων μιας «πραγματικής» κοινωνίας και που για πρώτη φορά κάποιο μοντέλο έχει καταφέρει να αναπαραστήσει τη δυναμική τους εξέλιξη.

Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί διερεύνηση του μηχανισμού που κρύβεται πίσω από τη συμπεριφορά αυτή των πρακτόρων, όσον αφορά στις ομάδες που σχηματίζουν. Για το σκοπό αυτό θα αναλύσουμε παρουσιάσουμε εκ νέου στο σχήμα 9.5 το διάγραμμα της δεύτερης γραμμής του πίνακα 9.4 που μας δίνει τη γνώμη 2 σε συνάρτηση με τη γνώμη 1 κατά την επανάληψη 10000.



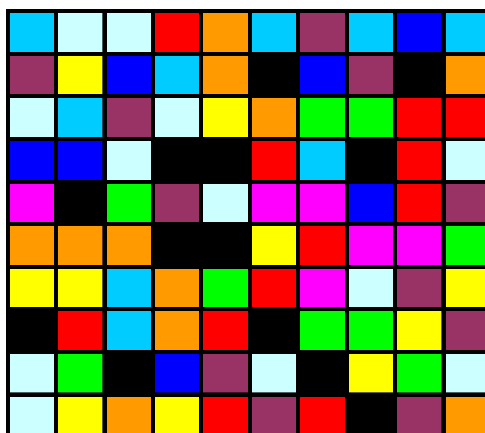
Σχήμα 9.5: Η γνώμη 2 σε συνάρτηση με τη γνώμη 1 κατά την επανάληψη 10000, τοπολογία κυψελοειδούς αυτομάτου, 100 πράκτορες, $\psi=1$, $\varepsilon=0.1$

Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 7, οι πράκτορες που έχουν ίδια γνώμη 1 και 2 θεωρούνται ότι ανήκουν στην ίδια ομάδα. Στο σχήμα 9.5 κατά συνέπεια, κάθε σημείο με μπλε χρώμα αντιστοιχεί σε έναν αριθμό πρακτόρων, οι οποίοι αποτελούν μια ομάδα, καθώς έχουν ταυτόσημες ή σχεδόν ταυτόσημες γνώμες 1 και 2. Δυστυχώς στο σχήμα αυτό δεν είναι δυνατό να εμφανιστεί ο αριθμός των πρακτόρων που απαρτίζουν την κάθε ομάδα. Η τετμημένη (η προβολή στον οριζόντιο άξονα) κάθε σημείου ισούται με τη γνώμη 1 της ομάδας ενώ η τεταγμένη του (η προβολή στον κατακόρυφο άξονα) ισούται με τη γνώμη 2. Υπολογίζοντας τον αριθμό των σημείων του σχήματος 9.5 διαπιστώνουμε ότι οι πράκτορες έχουν αυτοοργανωθεί σε 22 ομάδες. Για παράδειγμα, το σημείο που

βρίσκεται στην τομή των δύο ευθειών, της κατακόρυφης και της οριζόντιας, αντιστοιχεί σε μια ομάδα που αποτελείται από 6 πράκτορες (ο αριθμός των πρακτόρων δε φαίνεται στο σχήμα) και έχει γνώμη 1 ίση με 0.36 και γνώμη 2 ίση με 0.64. Υπάρχουν όμως εκτός από την ομάδα αυτή δύο ακόμη ομάδες που έχουν γνώμη 1 ίση με 0.36 (όσες βρίσκονται πάνω στην ίδια κατακόρυφη γραμμή). Οι πράκτορες και των τριών αυτών ομάδων αλληλεπιδρούν όσον αφορά στη γνώμη 1 δεν αλληλεπιδρούν όμως ως προς τη γνώμη 2. Ακόμη 5 ομάδες έχουν γνώμη 2 ίση με 0.64 και βρίσκονται πάνω στην οριζόντια γραμμή του σχήματος 9.5. Οι πράκτορες που ανήκουν σ' αυτές αλληλεπιδρούν όσον αφορά στη γνώμη 2 αλλά όχι ως προς τη γνώμη 1. Κάθε πράκτορας λοιπόν επικοινωνεί και αλληλεπιδρά και ως προς τις δύο γνώμες του με ένα σύνολο άλλων πρακτόρων που στην ενότητα 7.2.1.1 το ονομάσαμε ομάδα, αλλά επικοινωνεί και αλληλεπιδρά μόνο ως προς τη γνώμη 1 με ένα ευρύτερο σύνολο πρακτόρων και ως προς τη γνώμη 2 με ένα επίσης ευρύτερο, αλλά διαφορετικό από το τελευταίο, σύνολο πρακτόρων. Αξιοσημείωτο είναι ότι **δεν υπάρχει ομάδα απομονωμένη από τις άλλες**, δηλαδή που όλες της οι πράκτορες να μην επικοινωνούν ως προς κάποια γνώμη με πράκτορα άλλης ομάδας. Το φαινόμενο αυτό διαφέρει ουσιαστικά από το αντίστοιχο του Μοντέλου Πολιτισμικής Διασποράς του Άξελροντ, του Δυναμικού Μοντέλου της Θεωρίας Κοινωνικής Απήχησης των Nowak και Latané αλλά και τα υπόλοιπα δραστοστρεφή μοντέλα δυναμικής εξέλιξης των γνωμών. Σε όλα τα μοντέλα που υπάρχουν ως τώρα, οι ομάδες διαχωρίζονται πλήρως μεταξύ τους και σταματά οποιαδήποτε επικοινωνία και αλληλεπίδραση, γι' αυτό και τερματίζουν, κάτι που δεν έχει παρατηρηθεί ποτέ σε μια «πραγματική» κοινωνία. ***Το μοντέλο MER είναι το μοναδικό στη βιβλιογραφία που οι ομάδες των πρακτόρων συνεχίζουν να αλληλεπιδρούν μέχρι και την τελική κατάσταση*** και δε λαμβάνει χώρα σχηματισμός κόσμου γνωμών (opinion world) (Hegselmann & Krause, 2002), όπου σύνολα πρακτόρων σταματούν κάθε αλληλεπίδραση με όλους τους υπόλοιπους πράκτορες.

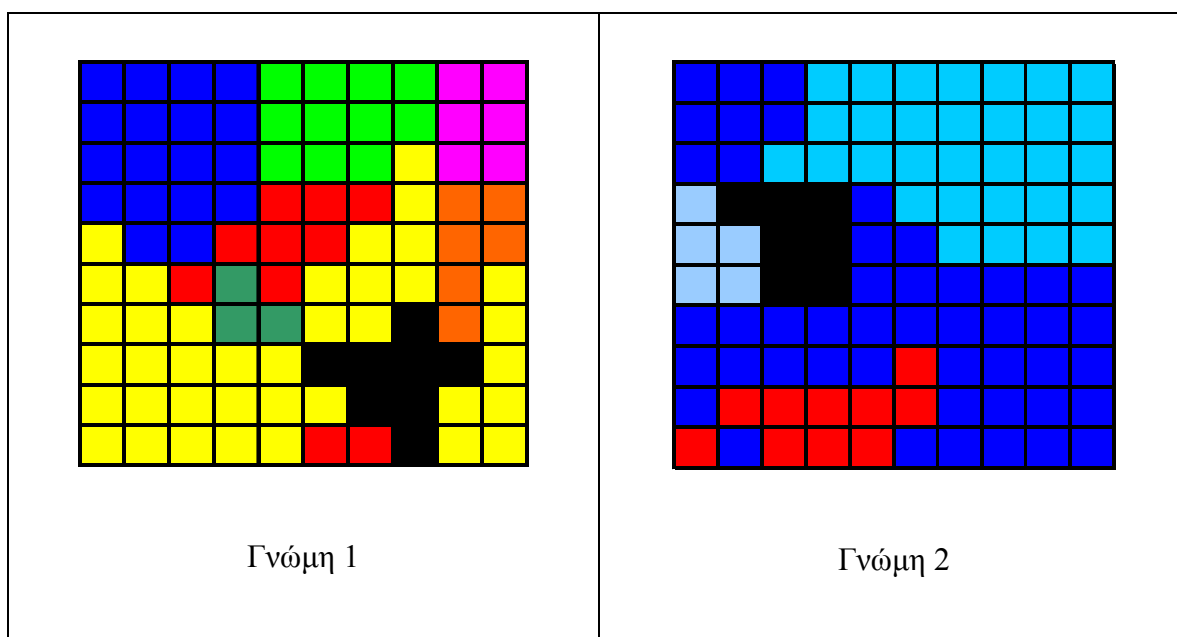
9.3.2.2. Διερεύνηση της Γεωγραφικής Κατανομής των Ομάδων στο Κυψελοειδές Αυτόματο

Στη συνέχεια θα επιχειρήσουμε να διερευνήσουμε τη γεωγραφική κατανομή των ομάδων, όπως αυτές σχηματίζονται πάνω στο κυψελοειδές αυτόματο. Στο σχήμα 9.6 απεικονίζεται η αρχική γνώμη 1 των 100 πρακτόρων, όπως αυτοί είναι τοποθετημένοι στο κυψελοειδές αυτόματο.



Σχήμα 9.6: Η αρχική γνώμη 1 (επανάληψη 0) των 100 πρακτόρων όπως οι πράκτορες είναι τοποθετημένοι στο κυψελοειδές αυτόματο. Τα ανοιχτόχρωμα χρώματα δηλώνουν γνώμες με τιμές κοντά στο 0 ενώ τα πιο σκούρα κοντά στο 1.

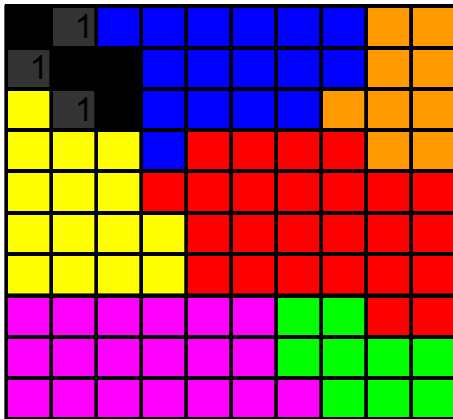
Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε μια διαφορετική ζώνη γνώμων. Τα ανοιχτά χρώματα αντιστοιχούν σε γνώμες που έχουν μικρές τιμές, κοντά στο 0, ενώ τα σκούρα στις γνώμες που είναι πλησιέστερα στον αριθμό 1. Ποιο συγκεκριμένα, το ροζ χρώμα αντιστοιχεί σε γνώμες που ανήκουν στο διάστημα $[0, 0.1]$, το κόκκινο στο $[0.1, 0.2]$, το κίτρινο στο $[0.2, 0.3]$, συνεχίζουμε ομοίως με πορτοκαλί, πράσινο, μπλε και τέλος με το μαύρο που αντιστοιχεί σε γνώμες που ανήκουν στο διάστημα $[0.9, 1]$. Ένα σχήμα αυτής της μορφής επιχειρεί να δείξει τη γεωγραφική διαμόρφωση των ομάδων που σχηματίζονται. Φυσικά, στο αρχικό αυτό προφίλ γνώμων επικρατεί ένα μωσαϊκό χρωμάτων, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο, μιας και οι αρχικές γνώμες έχουν παραχθεί από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών και καμιά ομάδα γνώμων δεν έχει σχηματιστεί. Η γνώμη 2 παρουσιάζει μια παρόμοια εικόνα γι' αυτό και δεν παρουσιάζεται. Στον πίνακα 9.6 όμως παρουσιάζουμε με τον ίδιο τρόπο τις γνώμες 1 και 2 κατά την επανάληψη 10000.



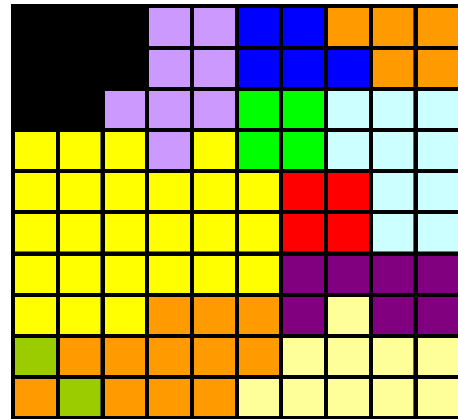
Πίνακας 9.6: Η γνώμες 1 και 2 κατά την επανάληψη 10000 των 100 πρακτόρων όπως οι πράκτορες είναι τοποθετημένοι στο κυψελοειδές αυτόματο. Τα ανοιχτόχρωμα χρώματα δηλώνουν γνώμες με τιμές κοντά στο 0 ενώ τα πιο σκούρα κοντά στο 1.

Εδώ παρατηρούμε ξεκάθαρα ότι οι ομαδοποιήσεις που έχουν λάβει χώρα έχουν μια «γεωγραφική» κατανομή στο κυψελοειδές αυτόματο, που όμως είναι διαφορετική για κάθε γνώμη. Ομάδα πρακτόρων, με την έννοια που αναφέραμε στην αρχή της παραγράφου, όπου δηλαδή οι πράκτορες έχουν ίδια γνώμη 1 και 2 αποτελούν γειτονικοί πράκτορες με το ίδιο χρώμα και στα δύο κυψελοειδή αυτόματα του πίνακα 9.6.

Το φαινόμενο αυτό, η ομαδοποίηση δηλαδή των γνωμών σε ομοιόμορφη γεωγραφική κατανομή έχει παρατηρηθεί και σε άλλα δραστοστρεφή μοντέλα κοινωνικών προσομοιώσεων όπου χρησιμοποιείται η τοπολογία των κυψελοειδών αυτομάτων, όπως στο Μοντέλο Πολιτισμικής Διασποράς του Άξελροντ και στο Δυναμικό Μοντέλο της Θεωρίας της Κοινωνικής Απήχησης των Nowak και Latané. Στον πίνακα 9.7 δίνουμε ακόμη μια «φωτογραφία» του συστήματος, την ομαδοποίηση στις 300000 επαναλήψεις.



Γνώμη 1



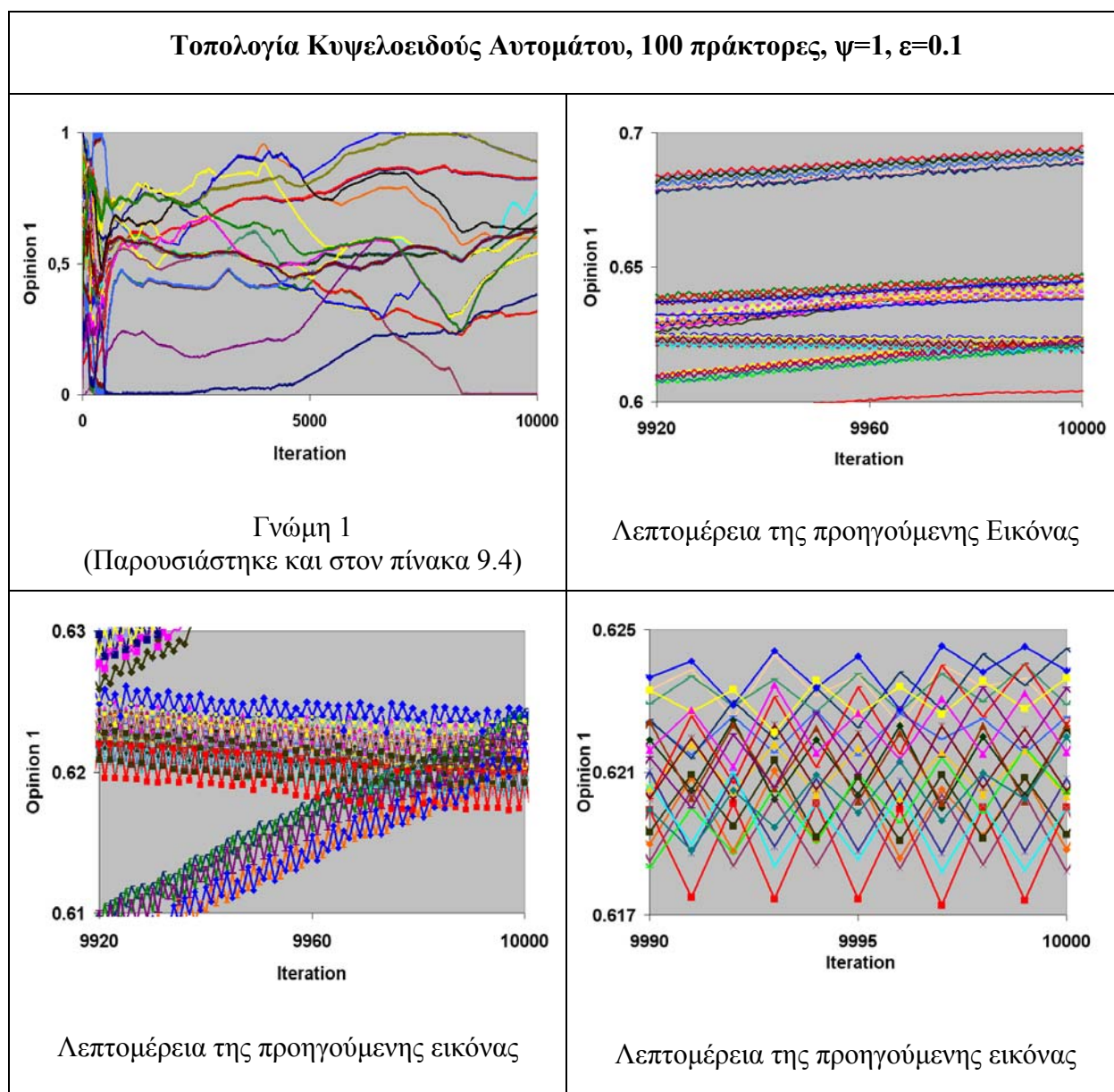
Γνώμη 2

Πίνακας 9.7: Η γνώμες 1 και 2 κατά την επανάληψη 300000 των 100 πρακτόρων, όπως οι πράκτορες είναι τοποθετημένοι στο κυψελοειδές αυτόματο. Τα ανοιχτόχρωμα χρώματα δηλώνουν γνώμες με τιμές κοντά στο 0 ενώ τα πιο σκούρα κοντά στο 1.

Παρατηρούμε ότι ο αριθμός των διαφορετικών χρωμάτων στο κυψελοειδές αυτόματο της γνώμης 2 στον πίνακα 9.7 έχει αυξηθεί, σε σχέση με τον πίνακα 9.6, ενώ παραμένει σταθερός για τη γνώμη 1. Επίσης οι ομαδοποιήσεις έχουν μεταβληθεί ριζικά σε σχέση με την επανάληψη 10000 που παρουσιάστηκε στον πίνακα 9.6. Το σύστημα λοιπόν μεταβάλλεται συνεχώς και οι πράκτορες συνεχίζουν να αλλάζουν ομάδες εξαιτίας των συνεχών αλληλεπιδράσεών τους ως προς τη μια γνώμη με τους πράκτορες των άλλων ομάδων, όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Η επιλογή της παρουσίασης των επαναλήψεων 10000 και 300000 έγινε τυχαία. Παρόμοια μορφή έχουν όλες οι επαναλήψεις μετά τη 1000, που το σύστημα έχει αυτοοργανωθεί επαρκώς. Στις πρώτες 1000 επαναλήψεις ο αριθμός των ομάδων είναι κατά κανόνα μεγαλύτερος. Οποιαδήποτε χρονική επανάληψη μετά τις 1000 πρώτες, όπου έχει ολοκληρωθεί η κυρίως φάση της αυτοοργάνωσης, τα αποτελέσματα θα ήταν παρόμοια, ποσοτικά και ποιοτικά.

9.3.2.3. Διερεύνηση του Εσωτερικού των Ομάδων στο Μίκρο Επίπεδο

Στην προηγούμενη παράγραφο μελετήσαμε το σύστημα και τις ομάδες των πρακτόρων στο μάκρο επίπεδο. Στην προσέγγιση αυτή, μετά τις πρώτες περίπου χίλιες επαναλήψεις, οι τροχιές φαίνεται να κινούνται αργά προς τα πάνω ή προς τα κάτω, με έναν ακανόνιστο τρόπο. Περιστασιακά δύο ομάδες τροχιών ενώνονται σε μία ή μια ομάδα διαχωρίζεται σε δύο. Άλλες φορές η τροχιά κάποιας πράκτορα εγκαταλείπει μια ομάδα τροχιών για να προσαρτηθεί σε κάποια άλλη. Όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, αυτό είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται και στην ίδια την κοινωνία και που δεν έχει παρουσιαστεί σε κάποιο άλλο δραστοστρεφές μοντέλο προσομοίωσης. Στον επόμενο πίνακα 9.8 παρουσιάζουμε το διάγραμμα της εξέλιξης της γνώμης 1 της πρώτης γραμμής του πίνακα 9.4 και εστιάζουμε διαδοχικά σε πιο μικρή κλίμακα, για να διερευνήσουμε το βαθμό της πολυπλοκότητας που κρύβεται στο αρχικό σχήμα.

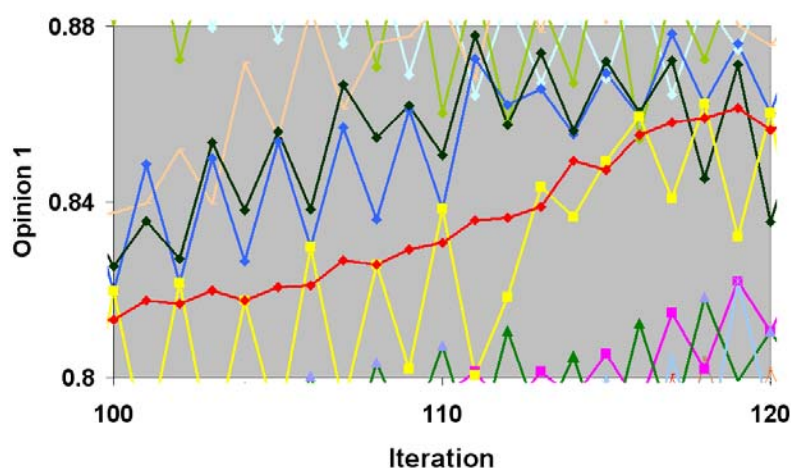


Πίνακας 9.8: Διαδοχικές λεπτομέρειες του πάνω αριστερά διαγράμματος, της εξέλιξης της γνώμης 1 για την τοπολογία κυψελοειδούς αυτομάτου με $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$.

Στο μικρό επίπεδο όμως, τα αποτελέσματα είναι ακόμη πιο εντυπωσιακά. Οι ομάδες τροχιών που ενώνονται ή να διαχωρίζονται αργά, στην πραγματικότητα κρύβουν στο μικρό επίπεδο μια ακόμη μεγαλύτερη δυναμική. Το διάγραμμα της γνώμης 1 στην αριστερή στήλη της πρώτης γραμμής του πίνακα 9.6 έχει παρουσιαστεί και στον πίνακα 9.4. Παρατηρώντας το κάποιος δε θα μπορούσε να υποψιαστεί ότι αν εστιάσει στις λεπτομέρειες κάποιας τροχιάς θα ανακαλύψει μια τέτοια δυναμική. Σε καθένα από τα υπόλοιπα διαγράμματα του πίνακα 9.6 απεικονίζεται μια λεπτομέρεια του προηγούμενου σε μεγαλύτερη κλίμακα. Στα διαγράμματα αυτά, εκτός από τη συνένωση και το

διαχωρισμό των τροχιών των γνώμων, μπορούμε να παρατηρήσουμε τις ταλαντώσεις που πραγματοποιούν οι τροχιές καθώς και το ότι οι ομάδες που θεωρούσαμε ότι αποτελούνται από πράκτορες που έχουν ίδια γνώμη 1 και 2 στην πραγματικότητα στο μικρό επίπεδο δεν υφίστανται. Καμιά πράκτορας δεν έχει ακριβώς την ίδια γνώμη με κάποια άλλη. Κάποιες γνώμες μπορεί να βρίσκονται στην ίδια περιοχή του διαστήματος $[0,1]$ και στο μακρό επίπεδο φαίνονται ως να είναι ίσες, όμως σε καμία περίπτωση δεν ταυτίζονται. Η αργή κίνηση προς τα πάνω ή προς τα κάτω, είτε ακόμη κάποιες φορές η ίδια σταθερή πορεία των τροχιών, ο διαχωρισμός ή η συνένωση των τροχιών μπορεί να παρατηρηθεί και στα διαγράμματα του πίνακα 9.6, μόνο που η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα με την συνεχή ταλάντωση που η κάθε τροχιά διενεργεί μόνη της, δίχως να ταυτίζεται με τις άλλες τροχιές. Η δυναμική ισορροπία του συστήματος επιτυγχάνεται από αυτή την αέναη μικρο κίνηση (ανά επανάληψη) σε συνδυασμό με την επίσης αέναη μακρο κίνηση (το σύστημα δεν τερματίζει). Όλες οι γνώμες των πρακτόρων ακολουθούν τροχιές που κινούνται συνεχώς πάνω κάτω, «ταλαντώνονται» εναλλάξ, μία προς τα πάνω και μια προς τα κάτω. Αν σε μια επανάληψη η τροχιά της γνώμης 1 ενός πράκτορα κινηθεί προς τα πάνω, στην επόμενη θα κινηθεί οπωσδήποτε προς τα κάτω και αντίθετα θα συμβεί με την τροχιά της γνώμης 2 της ίδιας πράκτορα, δηλαδή στην πρώτη επανάληψη θα κινηθεί προς τα κάτω και στην επόμενη προς τα πάνω. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει μετά τις πρώτες χίλιες επαναλήψεις, αφού το σύστημα έχει εισέλθει στον ελκυστή του.²⁴ Μόνο κατά τις πρώτες χίλιες περίπου επαναλήψεις, για τις τιμές των παραμέτρων που εξετάζουμε σ' αυτή την ενότητα, μπορεί οι τροχιές κάποιων γνώμων να κινηθούν για κάποιο μικρό αριθμό επαναλήψεων συνεχώς προς τα πάνω, όπως συμβαίνει με τις τροχιές με κόκκινο και κίτρινο χρώμα στο σχήμα 9.7.

²⁴ Η έννοια του ελκυστή θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα.



Σχήμα 9.7: Λεπτομέρεια κάποιων τροχιών των γνωμών των πρακτόρων που ανήκουν στο διάστημα $[0.8, 0.88]$ για τις επαναλήψεις 100 ως 120. Οι τροχιές με το κόκκινο και το κίτρινο χρώμα δεν κινούνται εναλλάξ πάνω κάτω σε κάθε επανάληψη αλλά κάποιες φορές κινούνται συνεχόμενα προς τα πάνω για περισσότερες από μία επαναλήψεις. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σπάνια και μόνο κατά τις πρώτες περίπου χίλιες επαναλήψεις, πριν το σύστημα αυτοοργανωθεί και εισέλθει στον ελκυστή του.

Κατά συνέπεια το σύστημα, μετά τις πρώτες περίπου χίλιες επαναλήψεις όπου αυτοοργανώνεται, έχει ένα είδος χαοτικής ισορροπίας, ισορροπεί με το να είναι σε μια διαρκή δυναμική μικρο και μακρο κίνηση των γνωμών όλων των πρακτόρων, χωρίς ποτέ να τερματίζει σε μια σταθερή κατάσταση.

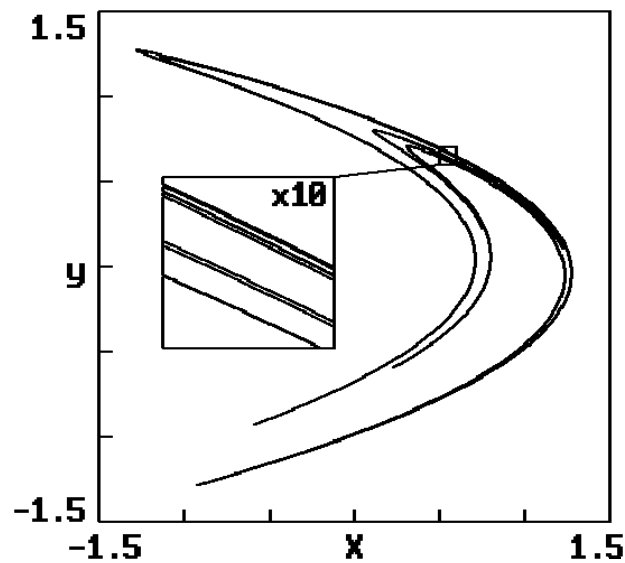
Εντούτοις, ο όρος δυναμική ισορροπία, που χρησιμοποιήσαμε για το μοντέλο MER χρησιμοποιείται επίσης και σε ένα δημοφιλή κλάδο της κοινωνικής ψυχολογίας, ο οποίος περιέχει επίσης τον όρο "δυναμικό": πρόκειται για τη δυναμική των ομάδων (group dynamics) ή αλλιώς δυναμική των μικρών ομάδων (small group dynamics)²⁵. Αυτό σημαίνει ότι κάθε κοινωνικό σύστημα αντιμετωπίζεται ως ένα αλληλένδετο σύνολο αλληλεπιδράσεων μεταξύ στοιχειωδών οντοτήτων (τις πράκτορες). Σύμφωνα με το μοντέλο MER ο όρος δυναμικός είναι παρών σε όλες τις κλίμακες της (αναπαριστώμενης) κοινωνικής πραγματικότητας: το σύστημά απεικονίζει μια συνεχώς μεταβαλλόμενη τεχνητή κοινωνία, όπου οι πράκτορες και οι ομάδες των πρακτόρων αλληλεπιδρούν σε πολλαπλά επίπεδα. Είναι εμφανές ότι η δυναμική της κάθε πράκτορα

²⁵ Συνήθως ο πρώτος τίτλος συνεπάγεται μια ολιστική κοινωνιολογική οπτική ενώ ο δεύτερος μια ψυχολογική, αναγωγική οπτική. Ο Farr (1993) ισχυρίζεται ότι όσον αφορά στην κοινωνική ψυχολογία, στην ηπειρωτική Ευρώπη υιοθετείται κυρίως η πρώτη οπτική γωνία ενώ η Αγγλοσαξονική σχολή υιοθετεί κυρίως τη δεύτερη.

δημιουργεί τη δυναμική ομάδας αλλά συγχρόνως και η δυναμική της ομάδας υποκινεί τη δυναμική της πράκτορα, υπάρχει μια αδιάσπαστη ενότητα του ατομικού και του κοινωνικού.

9.3.3. Αδυναμία Μελέτης του Χαοτικού Ελκυστή του Μοντέλου MER

Όπως έχει αναφερθεί στο τέταρτο κεφάλαιο της διατριβής, όπου έγινε μια σύντομη παρουσίαση της επιστήμης των δυναμικών συστημάτων και του χάους, μετά από μια αρχική αυτοοργάνωση κάθε χαοτικό σύστημα εισέρχεται σε ένα ελκυστή. Έτσι και το μοντέλο MER, μετά την πάροδο των χιλίων περίπου αρχικών επαναλήψεων, ως χαοτικό σύστημα εισέρχεται σε κάποιον ελκυστή. Δυστυχώς, ο προσδιορισμός της φύσης του ελκυστή αυτού καθώς και η μελέτη του παρουσιάζει πολύ μεγάλη δυσκολία. Η δυσκολία αυτή οφείλεται στο ότι το χαοτικό αυτό σύστημα του μοντέλου MER, για την τοπολογία επικοινωνίας του κυψελοειδούς αυτόματου, για $\psi=1$ και όλες σχεδόν τις τιμές του φράγματος εμπιστοσύνης ε ανήκει στο χώρο των 200 διαστάσεων. Τα πιο γνωστά χαοτικά συστήματα, των οποίων οι ελκυστές έχουν μελετηθεί επαρκώς, έχουν δύο, τρεις ή το πολύ τέσσερις διαστάσεις. Κάποια λιγότερο γνωστά χαοτικά συστήματα έχουν διάσταση λίγο μεγαλύτερη, κανένα όμως πάνω από 10. Δεν υπάρχει μοντέλο στη διεθνή βιβλιογραφία είτε των κοινωνικών είτε όμως και των θετικών επιστημών που να έχει διάσταση παρόμοια με το Μοντέλο MER. Οι γνωστότεροι ελκυστές, όπως του Lorenz ή του Hénon, έχουν μελετηθεί διεξοδικά, αλλά τα μαθηματικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν δε μπορούν να εφαρμοστούν σε χώρο με διάσταση ίση με 200. Μια ισχυρότατη ένδειξη για τη φύση του ελκυστή στο μοντέλο MER θα ήταν η διεξαγωγή μιας προσομοίωσης με 10000 πράκτορες ή και περισσότερους. Σε μια τέτοια προσομοίωση, πολύ πιθανόν κάποιες τροχιές ομάδων πρακτόρων αν μεγεθυνόταν μπορεί να διαπιστώναμε ότι αποτελούνται από τρεις ή τέσσερις μικρότερες τροχιές, οι οποίες πριν τη μεγέθυνση θα εμφανίζονταν ως μια. Μια από τις τελευταίες αν μεγεθυνόταν θα μπορούσε να παρουσιάσει το ίδιο φαινόμενο, να αποτελείται από περισσότερες τροχιές. Αυτό σημαίνει ότι ο ελκυστής παρουσιάζει την ιδιότητα της αυτοομοιότητας (self similarity) και άρα είναι παράξενος ελκυστής (strange attractor) (Ruelle & Takens, 1971). Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται σε όλους τους χαοτικούς ελκυστές, όπως για παράδειγμα στον ελκυστή του Hénon, που παρουσιάζεται στο σχήμα 9.8.

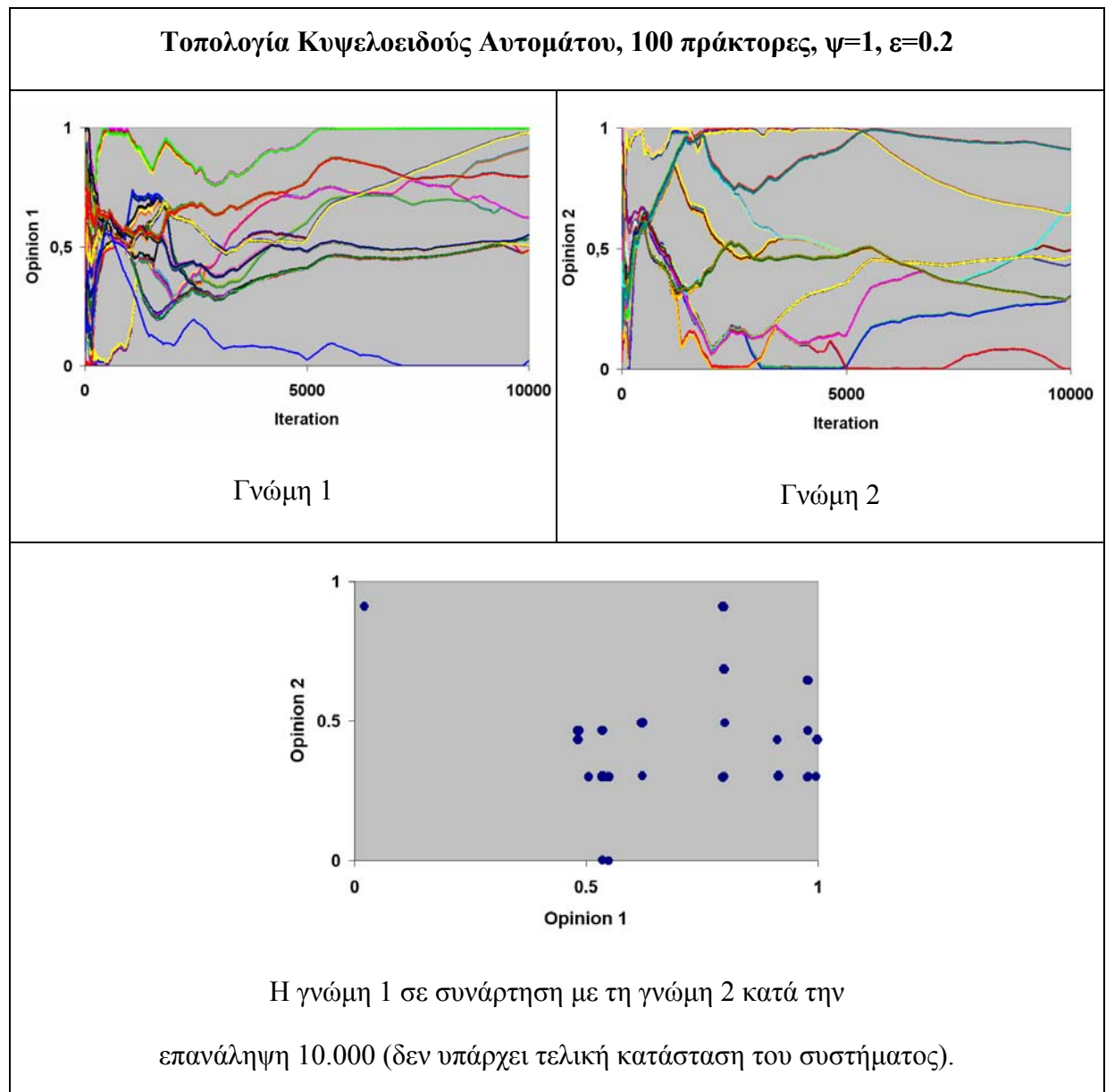


Σχήμα 9.8: Ο ελκυστής του Hénon και η ιδιότητα της αυτοομοιότητας (από το διαδίκτυο, <http://sprott.physics.wisc.edu/chaos/henongp.htm>) Ενώ στο αρχικό μικρό τετράγωνο φαίνονται τρεις γραμμές, η μεγέθυνση δείχνει ότι κάθε μια αποτελείται από περισσότερες. Το ίδιο θα συμβεί αν μεγεθύνουμε οποιαδήποτε γραμμή του μικρότερου τετραγώνου. Μπορούμε μάλιστα να επαναλάβουμε τη μεγέθυνση θεωρητικά άπειρες φορές, δίχως να μειωθεί ο βαθμός της πολυπλοκότητας του σχήματος. Την ιδιότητα της αυτοομοιότητας ίσως διαθέτει και το μοντέλο MER, είναι όμως αδύνατο προς το παρόν να πραγματοποιηθεί μια τέτοια διερεύνηση.

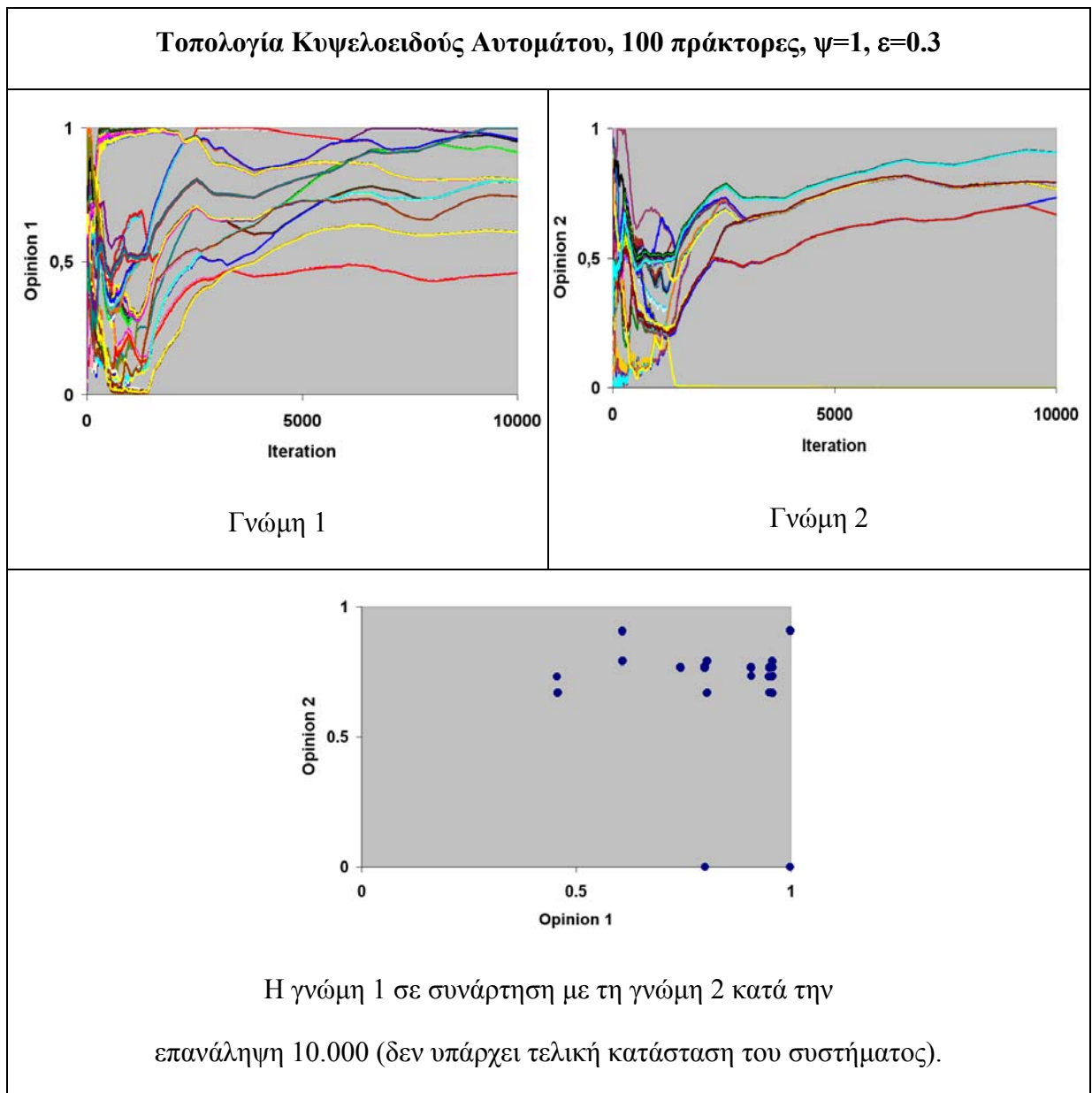
Δυστυχώς η διεξαγωγή μιας τέτοιας προσομοίωσης, με έναν τόσο μεγάλο αριθμό πρακτόρων, παρότι θα παρουσίαζε εξαιρετικό ενδιαφέρον, είναι προς το παρόν αδύνατη με την υπολογιστική δύναμη ακόμη και των ισχυρότερων υπολογιστών που είναι σήμερα διαθέσιμοι.

9.4. Αποτελέσματα της Προσομοίωσης για $\psi=1$ σε συνδυασμό με $\varepsilon=0.2$ και $\varepsilon=0.3$: Ο Ρόλος του Φράγματος Εμπιστοσύνης ε

Στη συνέχεια, για να μελετηθεί η επίδραση του φράγματος εμπιστοσύνης ε στη δυναμική του χαοτικού συστήματος του μοντέλου καθώς και στον αριθμό των σχηματιζόμενων ομάδων, στους πίνακες 9.9 και 9.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για $\psi=1$ σε συνδυασμό με $\varepsilon=0.2$ και $\varepsilon=0.3$ αντίστοιχα.



Πίνακας 9.9: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, τοπολογία κυψελοειδούς αυτόματου, 100 πράκτορες, $\psi=1$, $\varepsilon=0.2$.



Πίνακας 9.10: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, τοπολογία κυψελοειδούς αυτόματου, 100 πράκτορες, $\psi=1$, $\varepsilon=0.2$.

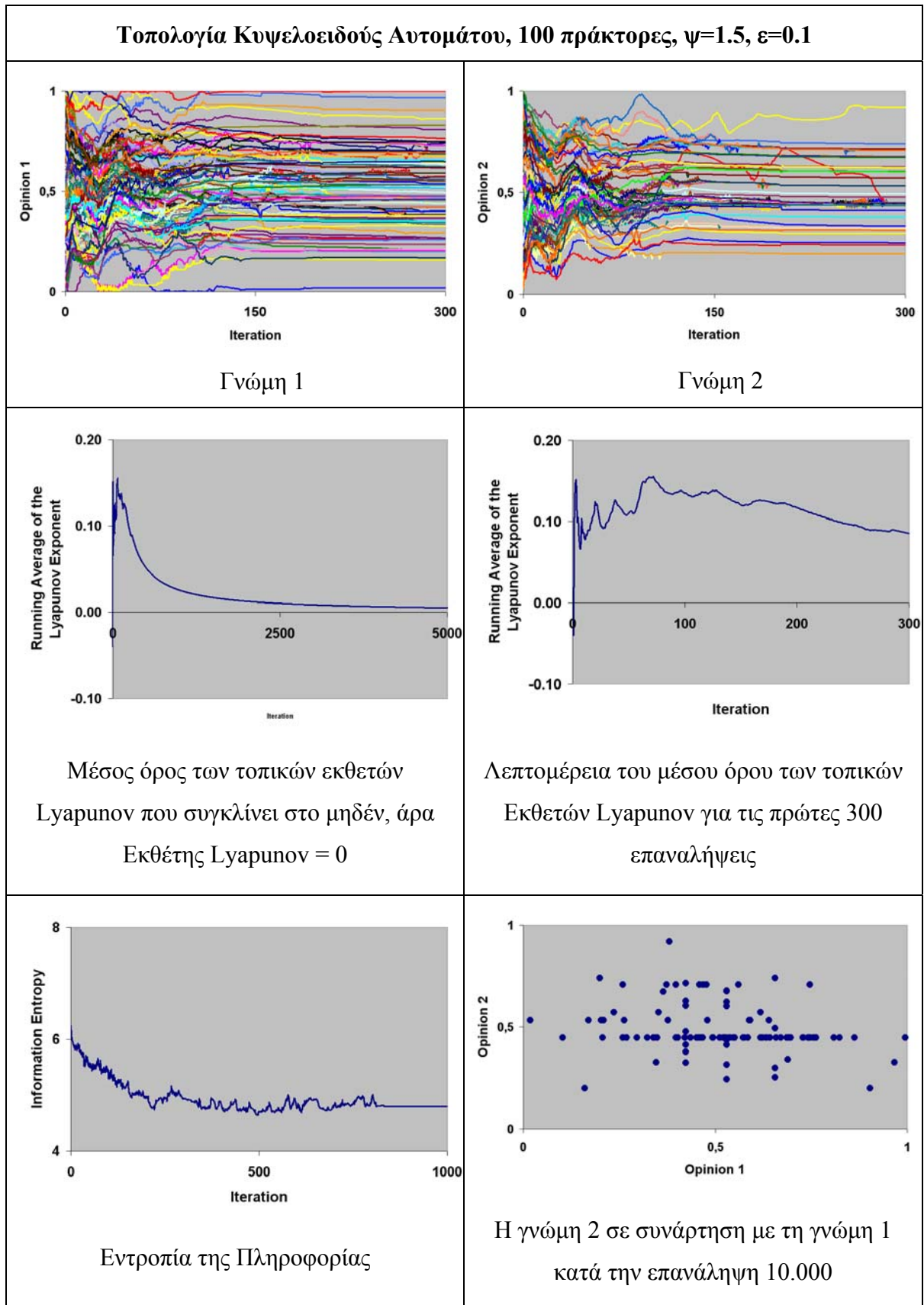
Από τους πίνακες 9.9 και 9.10 διαπιστώνουμε ότι για συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας $\psi=1$ η επίδραση του φράγματος εμπιστοσύνης ε είναι σχεδόν αμελητέα. Ο αριθμός των ομάδων που σχηματίζονται είναι σχεδόν ίδιος και για τις τρεις τιμές του ε που έχουμε μελετήσει. Είναι εύκολο να ερμηνεύσουμε το φαινόμενο αυτό αν θυμηθούμε την επίδραση που έχει το φράγμα εμπιστοσύνης ε καθώς και η τοπολογία του κυψελοειδούς αυτόματου. Υπενθυμίζουμε ότι το φράγμα εμπιστοσύνης ε περιορίζει την επικοινωνία και διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στον σχηματισμό των ομάδων, όσον

αφορά στο μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης των Hegselmann και Krause καθώς και στο μοντέλο MER. Η τοπολογία των κυψελοειδών αυτομάτων που εφαρμόσαμε όμως περιορίζει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό την επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων, κατά συνέπεια είναι αυτή υπεύθυνη για τον κατακερματισμό ή όχι των γνώμων. Όσο και να μεγαλώσει το φράγμα εμπιστοσύνης ϵ , δεν μπορεί να αυξήσει αρκετά την επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων. Η τοπολογία των κυψελοειδών αυτομάτων, που επιτρέπει μόνο τοπικές αλληλεπιδράσεις, περιορίζει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό την επικοινωνία των πρακτόρων, άρα η αύξηση του φράγματος εμπιστοσύνης δε μπορεί να οδηγήσει το σύστημα στο σχηματισμό λιγότερων ομάδων.

Στη συνέχεια θα διερευνηθεί η συμπεριφορά του συστήματος για συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας $\psi=1.5$ σε συνδυασμό με την τοπολογία των κυψελοειδών αυτομάτων.

9.5. Αποτελέσματα της Προσομοίωσης για $\psi=1.5$: Ένα πιο Ισχυρό Εφήμερο Χάος και Μετατροπή και της Δεύτερης Γνώμης σε Κατάτμηση

Υπενθυμίζουμε ότι με την τοπολογία του πλήρους γράφου, για $\psi=1.5$, το μοντέλο MER παρουσιάζει ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες και είναι μη προβλέψιμο, τερματίζει όμως σε μια τελική σταθερή κατάσταση. Το σύστημα αυτό ονομάζεται στη βιβλιογραφία εφήμερο χάος (transient chaos) ή ευαισθησία στην τελική κατάσταση (final state sensitivity). Στη συνέχεια θα μελετήσουμε το μοντέλο για την τιμή του $\psi=1.5$, εισάγοντας την τοπικότητα στην επικοινωνία με την τοπολογία ενός κυψελοειδούς αυτομάτου.



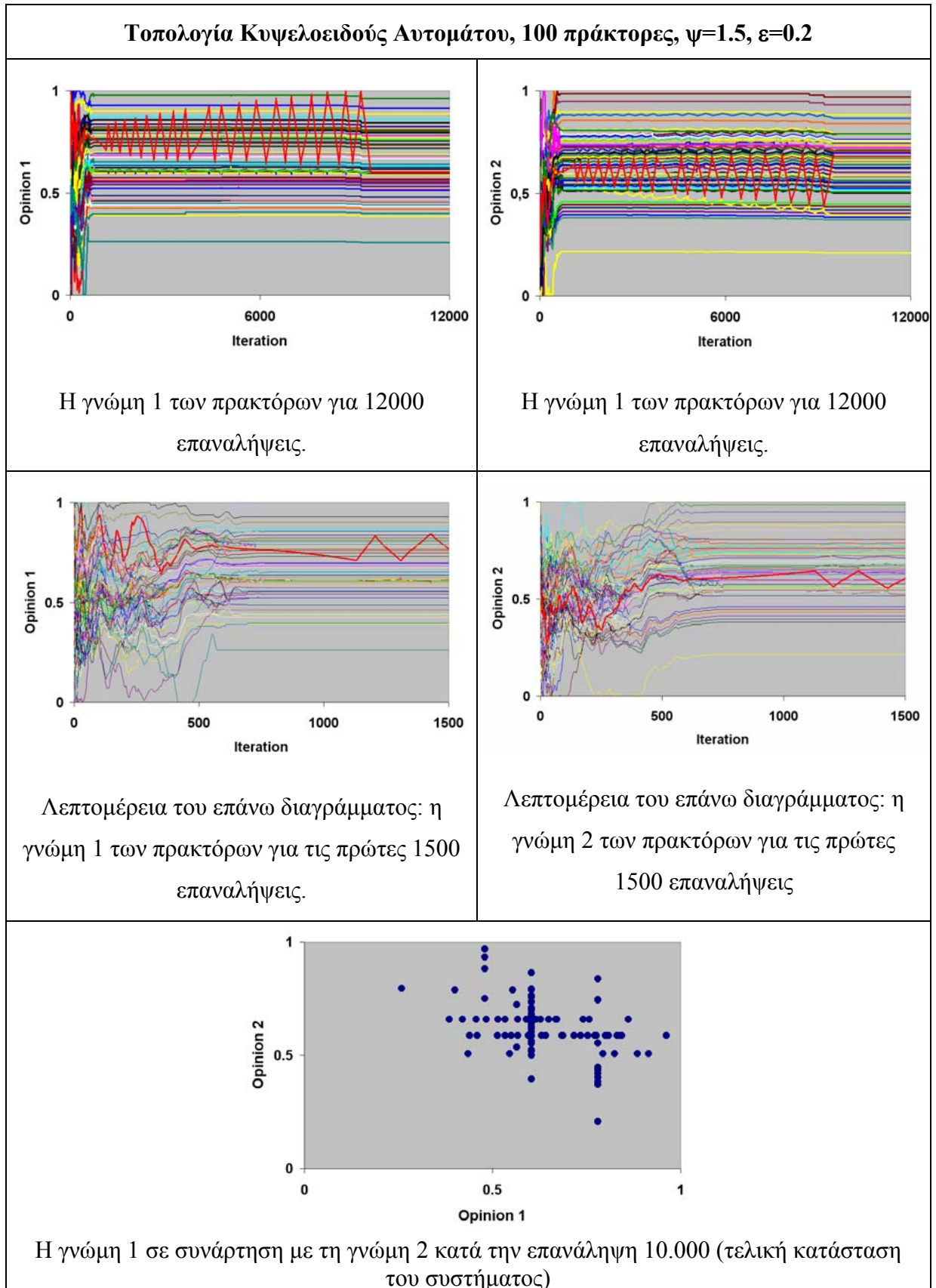
Πίνακας 9.11: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, τοπολογία κυψελοειδούς αυτομάτου, 100 πράκτορες, $\psi=1.5$, $\varepsilon=0.1$.

Η εφαρμογή των κυψελοειδών αυτομάτων, ως τοπολογίας επικοινωνίας, τροποποιεί σημαντικά το αποτέλεσμα της προσομοίωσης από το αντίστοιχο για την τοπολογία του πλήρους γράφου (βλέπε ενότητα 7.3). Εκεί υπήρχε μια ισχυρότατη διαφοροποίηση στη δυναμική εξέλιξη των δύο γνώμων. Σε όλες τις προσομοιώσεις για $\psi=1.5$ η μία γνώμη κατέληγε σε συμφωνία ενώ η άλλη σε κατάτμηση. Ταυτόχρονα οι τροχιές των γνώμων των πρακτόρων ήταν πολύ ταραχώδεις. Με την παρούσα τοπολογία και οι δύο γνώμες καταλήγουν σε κατάτμηση και οι τροχιές των πρακτόρων γίνονται ακόμη πιο ταραχώδεις. Παρατηρούμε ακόμη ότι το σύστημα τερματίζει μετά από 300 περίπου επαναλήψεις. Ο αριθμός των επαναλήψεων που χρειάζεται το σύστημα για να τερματίσει δεν είναι χαρακτηριστικό των παραμέτρων αλλά συμβαίνει μόνο για τη συγκεκριμένη αρχική συνθήκη. Υπάρχουν άλλες αρχικές συνθήκες, για τις οποίες οι τροχιές των πρακτόρων είναι πολύ πιο ταραχώδεις και τερματίζουν μετά από αρκετά μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων. Ακόμη, για κάποιες αρχικές συνθήκες εμφανίζεται κάποια πράκτορας που η τροχιά κάποιας γνώμης της ακολουθεί «τρελή» πορεία, όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

Στη δεύτερη γραμμή του πίνακα 9.11 μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι ο μέσος όρος των τοπικών εκθετών Lyapunov είναι θετικός και μετά από τις χίλιες επαναλήψεις σταδιακά συγκλίνει στο μηδέν. Οι θετικοί τοπικοί εκθέτες Lyapunov, κατά τις αρχικές επαναλήψεις της προσομοίωσης, φανερώνουν ότι το σύστημα αυξάνει εκθετικά την παραμικρή απόκλιση οποιασδήποτε τροχιάς και κατά συνέπεια είναι ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες. Στη συνέχεια το σύστημα ισορροπεί σε μια τελική σταθερή κατάσταση, κατά συνέπεια οι τοπικοί εκθέτες Lyapunov είναι ίσοι με μηδέν. Προστιθέμενοι αυτοί οι τοπικοί εκθέτες στο μέσο όρο έχουν ως αποτέλεσμα τη σύγκλισή του στο μηδέν. Άρα ο καθολικός εκθέτης Lyapunov είναι ίσος με μηδέν και το σύστημα, όπως και στην περίπτωση του πλήρους γράφου για τις ίδιες τιμές των παραμέτρων, παρουσιάζει εφήμερο χάος ή αλλιώς ευαισθησία στην τελική κατάσταση.

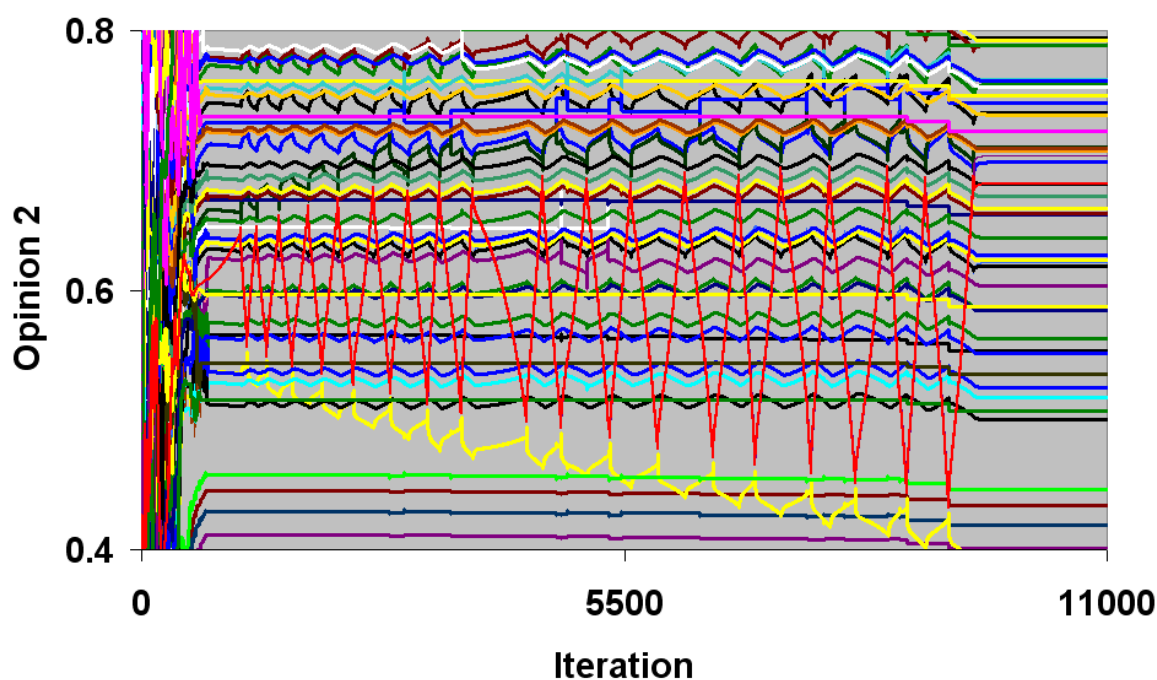
Στην αριστερή στήλη της τρίτης γραμμής του πίνακα 9.11 παρουσιάζεται η εντροπία του συστήματος. Παρατηρούμε ότι η εντροπία μειώνεται, άρα το σύστημα αυτοοργανώνεται σε ομάδες. Επειδή ο αριθμός των ομάδων παραμένει σχετικά μεγάλος, ο βαθμός μείωσης της εντροπίας είναι μικρότερος από τις προηγούμενες περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν. Ο αριθμός των ομάδων που σχηματίστηκαν φαίνεται στη δεξιά στήλη της τρίτης γραμμής του πίνακα 9.11. Παρατηρούμε, όπως αναφέραμε και προηγούμενα, ότι ο αριθμός τους είναι μεγάλος, γεγονός που οφείλεται στην μεγάλη τιμή του

συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ , στην μεγαλύτερη δηλαδή τάση των πρακτόρων για ενδοατομική ισορροπία. Στη συνέχεια, στον πίνακα 9.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για $\varepsilon=0.2$.



Πίνακας 9.12: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, τοπολογία κυψελοειδούς αυτομάτου, 100 πράκτορες, $\psi=1.5$, $\varepsilon=0.2$.

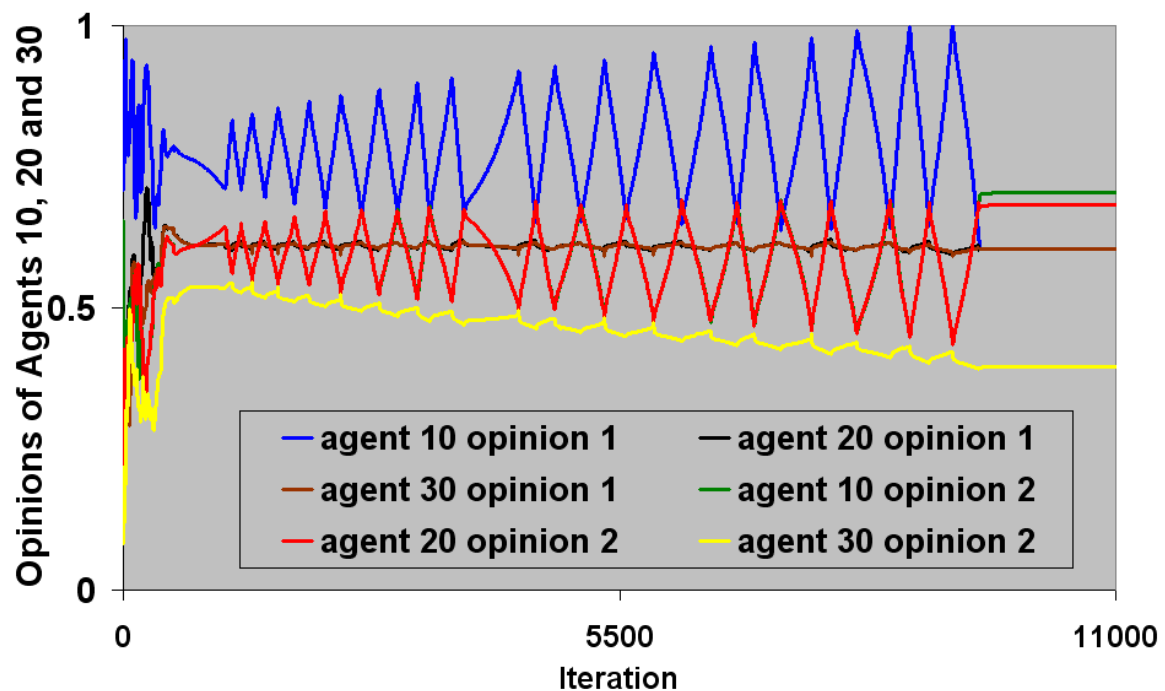
Για $\varepsilon=0.2$, στην πρώτη γραμμή του πίνακα 9.12, παρατηρούμε ότι το σύστημα τερματίζει μετά από περίπου 11000 επαναλήψεις. Ο αριθμός αυτός είναι πολύ μεγαλύτερος από τις 400 επαναλήψεις που τερμάτισε το σύστημα για $\varepsilon=0.1$. Είναι η πρώτη φορά που στο μοντέλο MER εμφανίζεται μια τέτοια διαφορά στη δυναμική του συστήματος που να οφείλεται στη μεταβολή του φράγματος εμπιστοσύνης ε . Αν προσέξουμε όμως τις τροχιές των γνώμων θα διαπιστώσουμε ότι αυτές μεταβάλλονται αρκετά στις πρώτες 700 επαναλήψεις (δεύτερη γραμμή του πίνακα 9.12, όπου παρουσιάζονται μόνο οι πρώτες 1500 επαναλήψεις της προσομοίωσης), ενώ στη συνέχεια κάποιες γνώμες παραμένουν σταθερές και κάποιες άλλες παρουσιάζουν μικρές αυξομειώσεις όμοιες με κυματισμούς, ιδιαίτερα στο διάγραμμα της γνώμης 2, όπως φαίνεται καλύτερα στο σχήμα 9.9.



Σχήμα 9.9: Λεπτομέρεια της τροχιάς των γνώμων 2, τοπολογία κυψελοειδούς αυτομάτου, 100 πράκτορες, $\psi=1.5$, $\varepsilon=0.2$. Παρουσιάζονται μόνο οι γνώμες 2 που ανήκουν στο διάστημα $[0.4, 0.8]$.

Το σύστημα όμως δεν τερματίζει στις 700 επαναλήψεις, γεγονός που οφείλεται στην παρουσία τριών «τρελών» τροχιών, των γνώμων 1 και 2 της πράκτορα 10 και της γνώμης 2 της πράκτορα 20. Οι δύο αυτές γνώμες (σημειώνονται με κόκκινο χρώμα στα διαγράμματα της πρώτης και δεύτερης γραμμής του πίνακα 9.12 για να είναι πιο

ευδιάκριτες) παρότι δεν παρουσιάζουν κάποια διαφορά στις τροχιές τους από αυτές των υπολοίπων πρακτόρων κατά τις αρχικές 1000 επαναλήψεις, στη συνέχεια παρουσιάζουν μια τελείως διαφορετική εξέλιξη: οι αυξομειώσεις τους είναι πάρα πολύ μεγάλες αντίθετα με τις τροχιές των υπολοίπων πρακτόρων που έχουν σχεδόν ακινητοποιηθεί. Την «τρελή» πορεία της γνώμης 1 της πράκτορα 10 ακολουθεί και η πράκτορας 20, με τη γνώμη 2 όμως να παρουσιάζει λίγο μικρότερες αυξομειώσεις. Έχουμε δηλαδή δύο «τρελές» πράκτορες, την 10 που ακολουθεί τρελή πορεία ως προς τις δύο γνώμες και την 20 της οποίας μόνο η γνώμη 2 ακολουθεί «τρελή» πορεία. Σημειώνουμε εδώ ότι οι δύο πράκτορες αυτές είναι γειτονικές στο κυψελοειδές αυτόματο και αλληλεπιδρούν. Υπάρχουν ακόμη κάποιες γειτονικές πράκτορες που οι τροχιές τους συναντώνται με τις προηγούμενες όπως η πράκτορας 30. Οι τροχιές των γνώμών των τριών αυτών πρακτόρων παρουσιάζονται εκ νέου στο σχήμα 9.10.

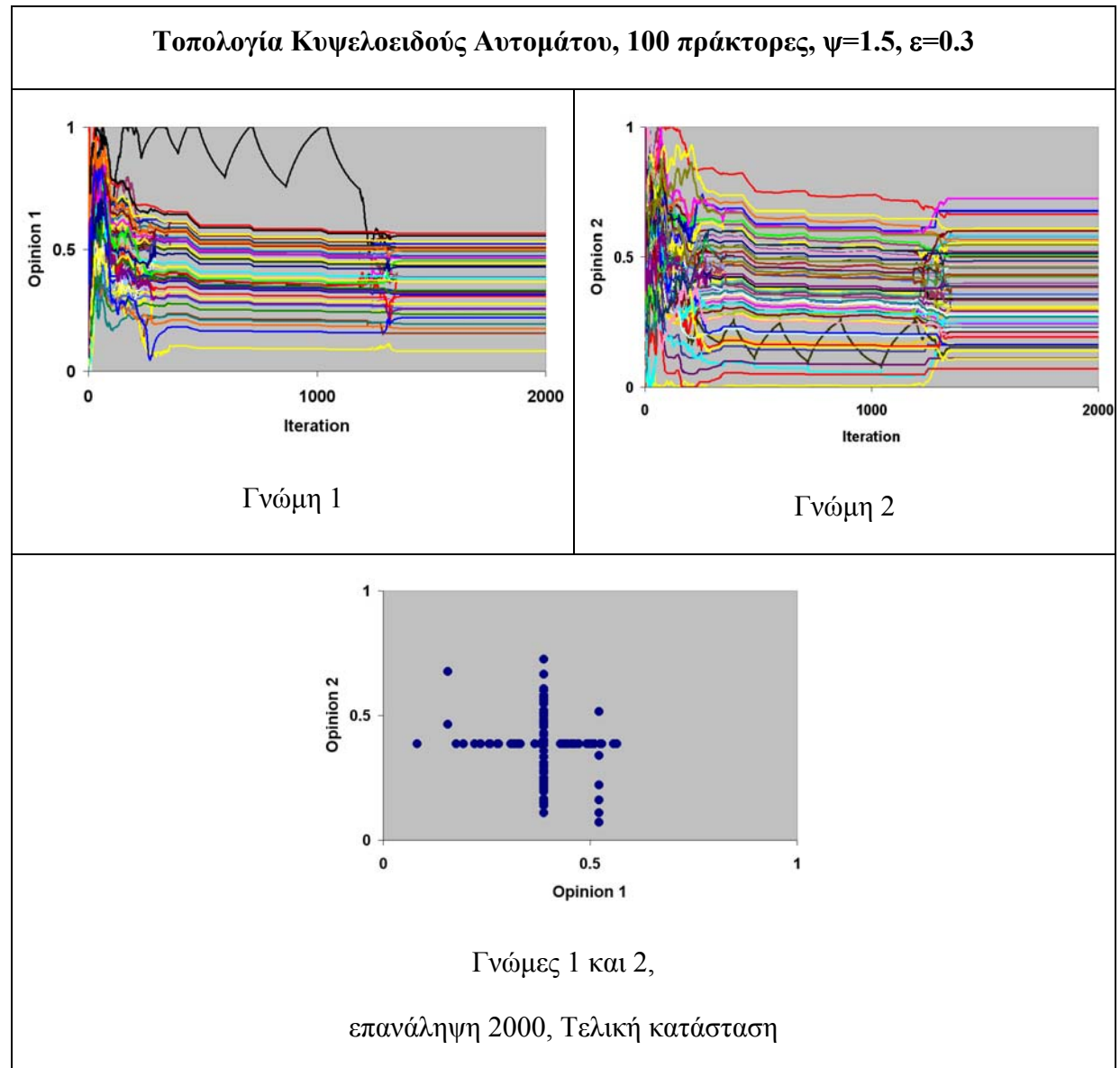


Σχήμα 9.10: Η τροχιά των δύο γνώμών των πρακτόρων 10, 20 και 30. Η πράσινη τροχιά είναι κρυμμένη πίσω από την κόκκινη και η μαύρη πίσω από την καφέ, για τις επαναλήψεις 1000 ως 10000 περίπου.

Η τροχιά της γνώμης 2 της πράκτορα 30 (σημειώνεται με κίτρινο χρώμα στο σχήμα 9.10) συνεχώς πλησιάζει και απομακρύνεται από τις τροχιές των γνώμών 2 των πρακτόρων 10 και 20. Ξαφνικά, στην επανάληψη 10500 οι γνώμες των τριών αυτών

πρακτόρων σταθεροποιούνται και όλο το σύστημα τερματίζει σε μια σταθερή τελική κατάσταση ισορροπίας.

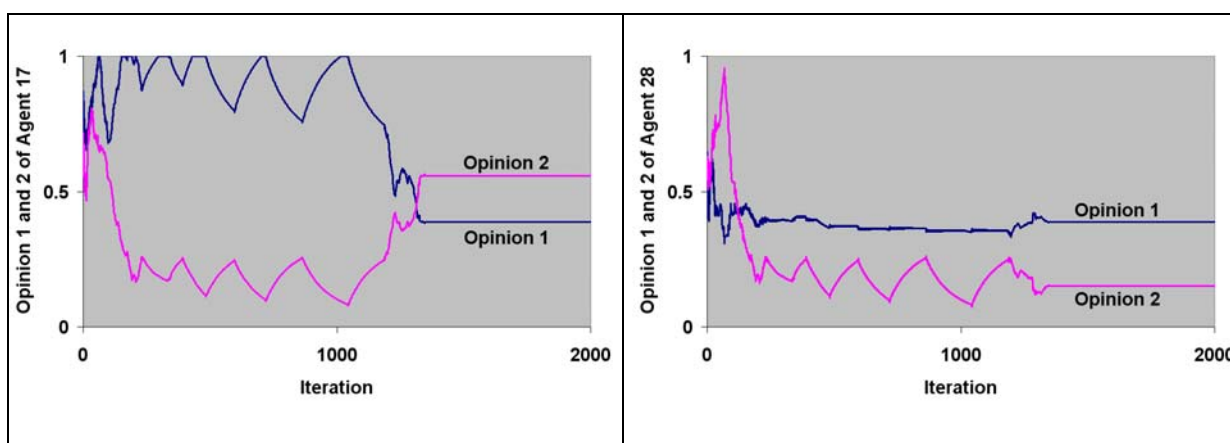
Στη συνέχεια, στον πίνακα 9.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όταν το φράγμα εμπιστοσύνης ε είναι ίσο με 0.3.



Πίνακας 9.13: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο MER, τοπολογία κυψελοειδούς αυτομάτου, 100 πράκτορες, $\psi=1.5$, $\varepsilon=0.3$.

Αυτή τη φορά το σύστημα τερματίζει στις 1500 επαναλήψεις, κάτι που είναι σύνηθες και για άλλες αρχικές συνθήκες. Ακόμη, όπως και στην περίπτωση του φράγματος εμπιστοσύνης $\varepsilon=0.2$, εμφανίζονται τροχιές που παρουσιάζουν αυξομειώσεις πολύ μεγάλου μεγέθους, οι οποίες έχουν τροχιές με εντελώς διαφορετική εξέλιξη από όλες τις υπόλοιπες. Στη περίπτωση του $\varepsilon=0.3$ πρόκειται για τις τροχιές των δύο γνωμών

της πράκτορα 17 και την τροχιά της γνώμης 2 της πράκτορα 28, οι οποίες παρουσιάζονται εκ νέου στον πίνακα 9.14.



Πίνακας 9.14: Η τροχιά των δύο γνώμων των πρακτόρων 17 (αριστερά) και 28 (δεξιά).

Παρατηρούμε ότι οι τροχιές των γνώμων 2 των πρακτόρων 17 και 28 ταυτίζονται για τις επαναλήψεις από 100 ως 1100 περίπου. Η γνώμη 1 του πράκτορα 17 ταλαντώνεται σε μεγάλη απόσταση από όλες τις γνώμες 1 των υπολοίπων πρακτόρων και δεν αλληλεπιδρά μαζί τους. Η ταλάντωση οφείλεται στη διόρθωση που κάνει η πράκτορας 17 λόγω της μεταβολής της γνώμης 2. Από την επανάληψη 300 ως περίπου την επανάληψη 1300 όλες οι τροχιές των γνώμων έχουν σχεδόν σταθεροποιηθεί, εκτός των δύο πρακτόρων 17 και 28. Γύρω στην επανάληψη 1300, η γνώμη 1 της πράκτορα 17 φτάνει σε απόσταση από τις υπόλοιπες γνώμες 1 μικρότερη του φράγματος εμπιστοσύνης και αλληλεπιδρά. Το γεγονός αυτό προκαλεί μια «μίνι κρίση» στο σύστημα. Όλες οι γνώμες των υπολοίπων πρακτόρων αναταράσσονται για περίπου 100 επαναλήψεις και στη συνέχεια το σύστημα κατασταλάζει στην τελική του κατάσταση ισορροπίας. Και στις δύο περιπτώσεις, φαίνεται ότι μία και μόνο πράκτορας που χαρακτηρίζεται από μια μη φυσιολογική συμπεριφορά μπορεί να μεταβάλλει τη δυναμική ολόκληρου του συστήματος. Τονίζουμε ότι η συγκεκριμένη πράκτορας αρχικά δε διέφερε από τις υπόλοιπες, καθώς δεν υποθέσαμε ότι έχει οποιαδήποτε επιπλέον ιδιότητα. Στην ντετερμινιστική αυτή τεχνητή κοινωνία, όπου όλες οι πράκτορες ακολουθούν ακριβώς τους ίδιους κανόνες, μπορεί μια από αυτές να διαγράψει μια τρελή πορεία, χωρίς απαραίτητα να έχει κάτι το διαφορετικό, απλά και μόνο επειδή οι γνώμες όλων των πρακτόρων «οδήγησαν» το σύστημα σε αυτή την εξέλιξη. Αξιοσημείωτο είναι ότι η παραμικρή αλλαγή στην αρχική γνώμη κάποιας πράκτορα, ακόμη και της τάξης του

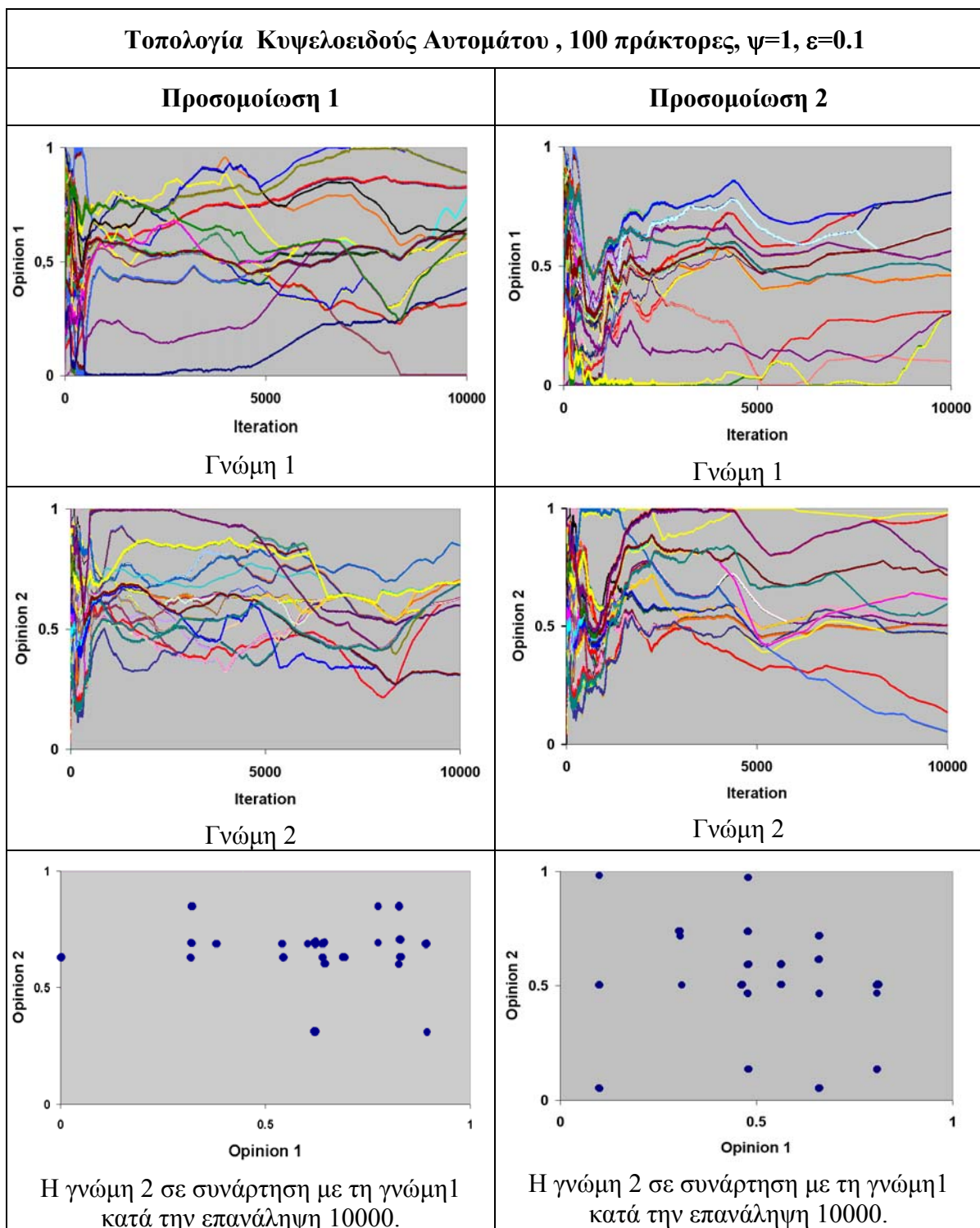
10^{-10} , είναι ικανή να εξαφανίσει μια «τρελή» πορεία κάποιας πράκτορα ή να εμφανίσει μια τρελή πορεία εκεί που πριν δεν υπήρχε, όπως θα δειχθεί στην επόμενη ενότητα.

9.6. Διερεύνηση της Ιδιότητας της Ευαισθησίας στις Αρχικές Συνθήκες για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$

Η ιδιότητα της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες σημαίνει ότι και η παραμικρή παρέκκλιση από τις αρχικές συνθήκες αυξάνεται εκθετικά²⁶ και κατά συνέπεια, μετά από έναν ικανό αριθμό επαναλήψεων, το σύστημα ακολουθεί μια εντελώς διαφορετική πορεία από την προηγούμενη. Για να εξετάσουμε αν το σύστημα είναι ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες, διενεργούμε και πάλι, με μια μικρή παραλλαγή όμως, την προσομοίωση, της οποίας τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στον πίνακα 9.4 (προσομοίωση 1). Τη νέα προσομοίωση την ονομάζουμε προσομοίωση 2. Στην προσομοίωση 2 χρησιμοποιούμε τις ίδιες τιμές των παραμέτρων και «σχεδόν» τις ίδιες αρχικές τιμές με την 1. Δηλαδή όλοι οι πράκτορες έχουν αρχικά τις ίδιες ακριβώς γνώμες 1 και 2 στις προσομοιώσεις 1 και 2 εκτός από τη γνώμη 1 του πράκτορα 1. Η πράκτορας αυτή στην προσομοίωση 1 είχε αρχική γνώμη 1 ίση με 0.7055475 ενώ στην προσομοίωση 2 έχει αρχική γνώμη 1 ίση με 0.7055475001. Η διαφορά των δύο αυτών γνωμών ισούται με $10^{-10}=0.0000000001$. Το λάθος αυτό είναι προφανώς άνευ νοήματος στην κοινωνιοψυχολογική έρευνα, όπου τα αναμενόμενα λάθη μέτρησης στη συλλογή των δεδομένων είναι εξαιρετικά μεγαλύτερα. Υπενθυμίζουμε εδώ ότι κάθε αριθμός που αντιστοιχεί σε μια αρχική γνώμη έχει πέντε δεκαδικά ψηφία και παράχθηκε από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Στη συνέχεια, σύμφωνα με τον αλγόριθμο, διενεργούνται όλων των ειδών οι πράξεις, ακόμη και διαιρέσεις. Η ακρίβεια των διενεργούμενων πράξεων φτάνει μέχρι το τριακοστό δεκαδικό ψηφίο, άρα κάθε γνώμη που προκύπτει σε οποιαδήποτε επανάληψη μετά την αρχική φτάνει σε ακρίβεια τα τριάντα δεκαδικά ψηφία. Η διερεύνηση του τι συμβαίνει αν η ακρίβεια αυτή ισούται με 100, 200 ή και 1, 2, 3 ή 4 δεκαδικά ψηφία υπερβαίνει τα όρια της παρούσας διατριβής.

Στις περιπτώσεις όπου έχουμε $\psi=0.5$ δεν παρατηρείται καμιά διαφοροποίηση μεταξύ των δύο προσομοιώσεων, που διαφέρουν κατά 10^{-10} στην αρχική γνώμη 1 της πράκτορα 1. Για $\psi=1$ και $\psi=1.5$ τα αποτελέσματα είναι πολύ διαφορετικά, παρά την ασημαντότητα της διαφοράς στις αρχικές συνθήκες των δύο προσομοιώσεων. Στον πίνακα 9.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$.

²⁶ Η έννοια της εκθετικής αύξησης αναλύθηκε στην ενότητα 7.4.



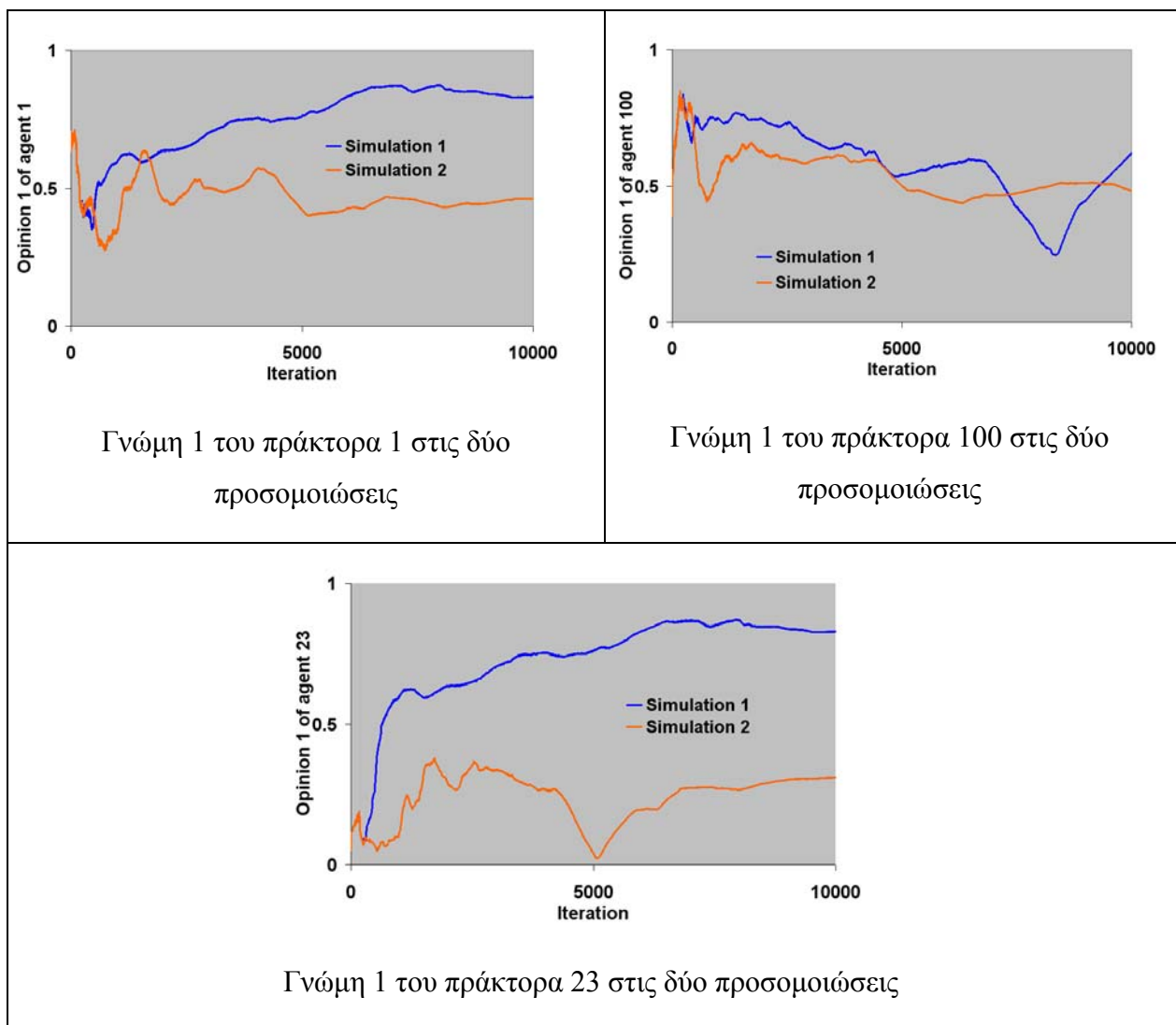
Πίνακας 9.15: Παρουσίαση του Μοντέλου MER με μια απειροελάχιστα μικρή παραλλαγή στις αρχικές συνθήκες. Η προσομοίωση 1, στην αριστερή στήλη παρουσιάστηκε και μελετήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Στην προσομοίωση 2 μοναδική αλλαγή σε σχέση με την προσομοίωση 1 είναι η ελάχιστη μεταβολή, κατά 10^{-10} , στην αρχική γνώμη 1 της πράκτορα 1. Οι ατομικές τροχιές των πρακτόρων καθώς και η τελική διαμόρφωση του

συστήματος είναι διαφορετικές, εξαιτίας της ιδιότητας της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες.

Η εικόνα που λαμβάνουμε στις δύο προσομοιώσεις παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες καθώς επίσης και κάποιες διαφορές. Η σημαντικότερη διαφορά είναι ότι οι τροχιές των γνωμών όλων των πρακτόρων είναι εντελώς διαφορετικές. Κάποιες ιδιότητες του συστήματος όμως παραμένουν σταθερές, όπως ο αριθμός των σχηματιζόμενων ομάδων και η μάκρο εικόνα του συστήματος, η οποία είναι παρόμοια στις δύο προσομοιώσεις, καθώς εμφανίζεται παρόμοια και για άλλες αρχικές συνθήκες, για τις ίδιες τιμές των παραμέτρων ψ και ε και την τοπολογία επικοινωνίας των κυψελοειδών αυτομάτων. Στη συνέχεια θα διερευνήσουμε τη διαφορά που υπάρχει στις ατομικές τροχιές των πρακτόρων κατά τις δύο προσομοιώσεις.

9.6.1. Επίδραση στις Ατομικές Τροχιές των Πρακτόρων

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικά οι ατομικές τροχιές της γνώμης 1 τριών πρακτόρων στις δύο προσομοιώσεις.



Πίνακας 9.16: Η τροχιά της γνώμης 1 (η προσωπική ιστορία) για τους πράκτορες 1, 100 και 23 στις προσομοιώσεις 1 και 2.

Παρουσιάζουμε την τροχιά του πράκτορα 1, η οποία έχει διαφορετική αρχική τιμή στις δύο προσομοιώσεις, έστω και απειροελάχιστη, του πράκτορα 100 που είναι ο πιο απομακρυσμένος από τον 1 στο κυψελοειδές αυτόματο και του πράκτορα 23, του οποίου η γνώμη 1 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των δύο προσομοιώσεων, τουλάχιστον κατά τις αρχικές δέκα χιλιάδες επαναλήψεις. Η προσωπική ιστορία του κάθε πράκτορα είναι διαφορετική στις δύο τεχνητές κοινωνίες, παρότι ξεκίνησαν όλοι με τις ίδιες αρχικές γνώμες (εκτός του πράκτορα 1) και ακολουθήθηκαν ακριβώς οι ίδιοι νόμοι. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζουμε την εξέλιξη της γνώμης 1 του πράκτορα 100

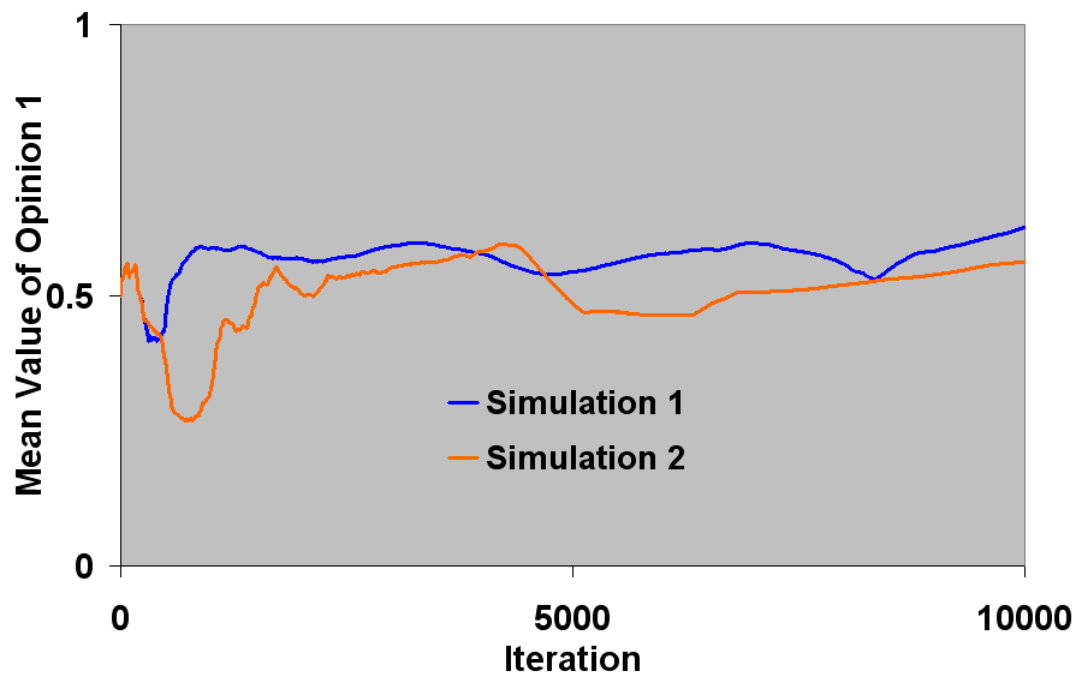
Επαναλήψεις	Πράκτορας 100, γνώμη 1, προσομοίωση 1	Πράκτορας 100, γνώμη 1, προσομοίωση 2	Διαφορά της γνώμης 1 του πράκτορα 100 στις δύο προσομοιώσεις
0	0.390292	0.390292	0
1	0.390574	0.390574	0
2	0.434567	0.434567	0
3	0.469148	0.469148	0
4	0.51461	0.514610	0
5	0.543467	0.543467	0
6	0.546105	0.546105	0
7	0.554347	0.554347	$-8.1 \cdot 10^{-14}$
8	0.542563	0.542563	$-1.4 \cdot 10^{-13}$
100	0.721104	0.721104	$-1.7 \cdot 10^{-12}$
300	0.761712	0.740134	0.021577
771	0.737392	0.443623	0.293769

Πίνακας 9.17: Οι αριθμητικές τιμές της γνώμης 1 του πράκτορα 100 κατά τις προσομοιώσεις 1 και 2.

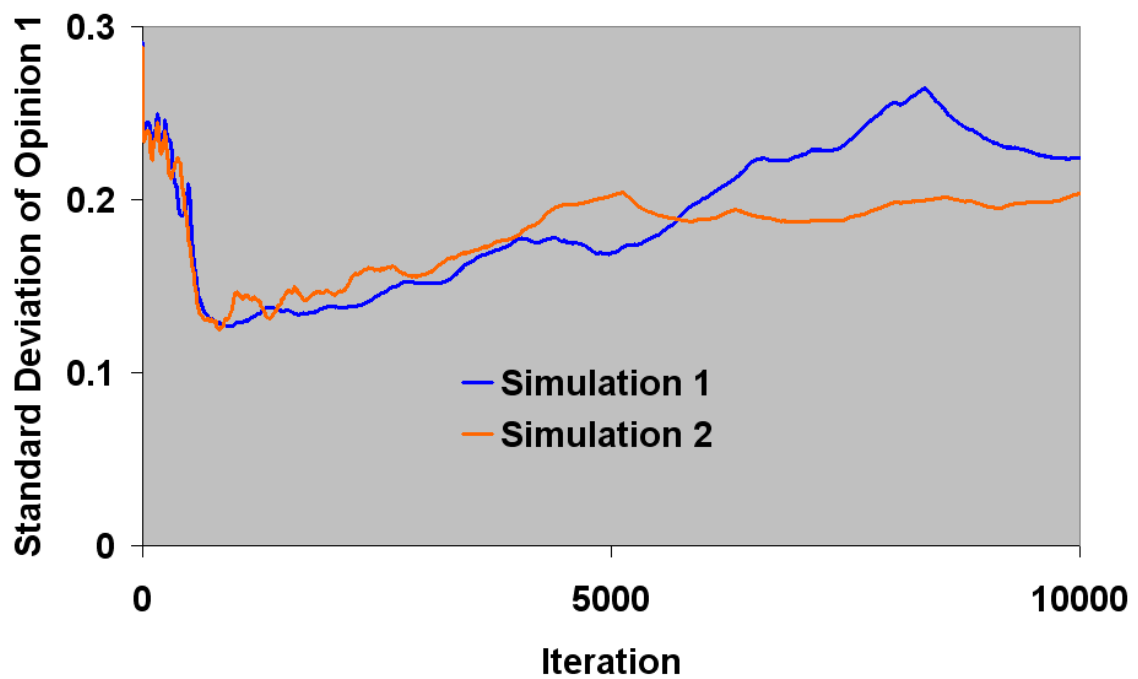
Κατά τις πρώτες 6 επαναλήψεις, η διαταραχή του συστήματος που προκλήθηκε στη γνώμη 1 του πράκτορα 1 δεν έχει φτάσει στην άλλη άκρη του κυψελοειδούς αυτομάτου. Στην έβδομη επανάληψη, η διαταραχή στη γνώμη του πράκτορα 100 είναι της τάξης του 10^{-14} . Στη συνέχεια η διαταραχή αυτή μεγαλώνει και φτάνει να έχει, μετά από μερικές εκατοντάδες επαναλήψεις, την ίδια τάξη μεγέθους με τις γνώμες. Συγκεκριμένα, στην επόμενη επανάληψη η διαφορά των γνώμών στις δύο προσομοιώσεις γίνεται της τάξης του 10^{-13} , έπειτα από 88 επαναλήψεις φτάνει το 10^{-12} και στην επανάληψη 771 φτάνει τη μέγιστη τιμή της, τουλάχιστον κατά τις 10000 πρώτες επαναλήψεις, και γίνεται ίση με 0.29. Παρόμοια είναι η εικόνα για όλους τους υπόλοιπους πράκτορες καθώς και για τη γνώμη 2.

9.6.2. Επίδραση στους Στατιστικούς Δείκτες του Συστήματος

Η ανίχνευση των προσωπικών ιστοριών των πρακτόρων, μολονότι ενδιαφέρουσα, δε συνάδει με τη συνηθισμένη ερευνητική πρακτική των κοινωνικών επιστημών. Συνήθως λαμβάνονται υπόψη τα στατιστικά μέτρα της κεντρικής τάσης και διασποράς, τα οποία οφείλουν να υποδείξουν την ύπαρξη κάποιου αιτιώδους νόμου. Κατά συνέπεια, οι αλλαγές που αφορούν ένα και μόνο το πρόσωπο, μεταξύ των άλλων, θεωρούνται μικρού ενδιαφέροντος και η ερευνητική πρακτική εστιάζει περισσότερο σε περισσότερο «κοινωνικούς» δείκτες, οι οποίοι «πρέπει» να απεικονίσουν τη σταθερότητα του συστήματος, παρά τις «βασανισμένες» προσωπικές ιστορίες. Η μέτρηση στο επίπεδο του ενός ατόμου δεν μας δίνει πολύτιμες πληροφορίες σε σχέση με τις πληροφορίες που αφορούν μια ομάδα ατόμων. Στις περιπτώσεις αυτές γίνεται η σιωπηρή υπόθεση ότι οι ιδιότητες της ομάδας «απορροφούν» τις διακυμάνσεις στην πορεία ενός μεμονωμένου ατόμου, τις οποίες αντιμετωπίζουν, λίγο πολύ, σαν «ενοχλητικό θόρυβο». Αντίθετα, στο μοντέλο MER, και η παραμικρή αλλαγή στη γνώμη ενός μεμονωμένου πράκτορα, όπως αυτή της προσομοίωσης 2 σε σχέση με την προσομοίωση 1, έχει δραματική επίδραση και στους στατιστικούς δείκτες του συστήματος. Στο σχήμα 9.11 παρουσιάζεται η εξέλιξη της μέσης τιμής της γνώμης 1 στις δύο προσομοιώσεις, και στο σχήμα 9.12 η αντίστοιχη εξέλιξη της τυπικής απόκλισης. Παρόμοια διαφορά στην εξέλιξη έχουν και οι υπόλοιποι στατιστικοί δείκτες κεντρικής τάσης και διασποράς, καθώς και οι αντίστοιχοι δείκτες για τη γνώμη 2.



Σχήμα 9.11: Η εξέλιξη της μέσης τιμής της γνώμης 1 για το σύνολο των 100 πρακτόρων κατά τις προσομοιώσεις 1 και 2 για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$.



Σχήμα 9.12: Η εξέλιξη της τυπικής απόκλισης της γνώμης 1 για το σύνολο των 100 πρακτόρων κατά τις προσομοιώσεις 1 και 2 για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$.

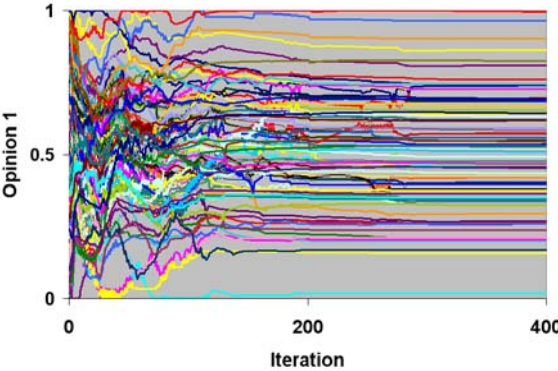
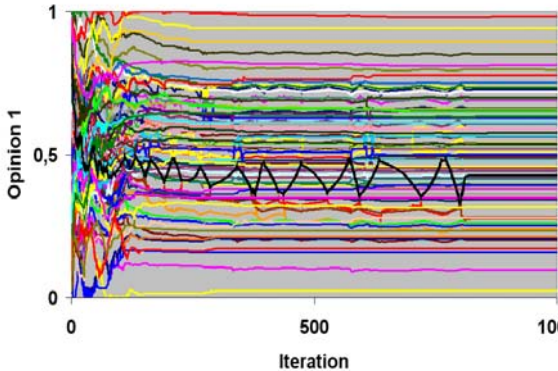
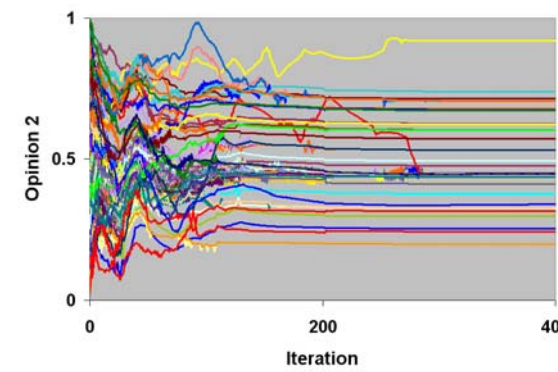
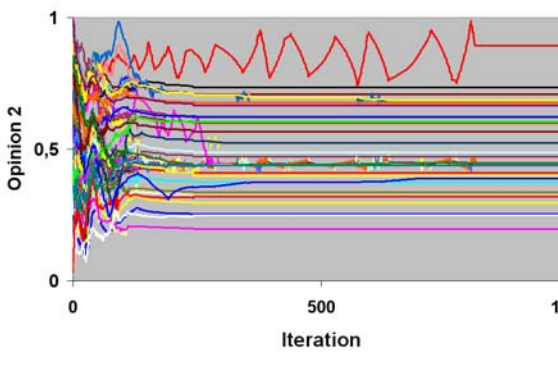
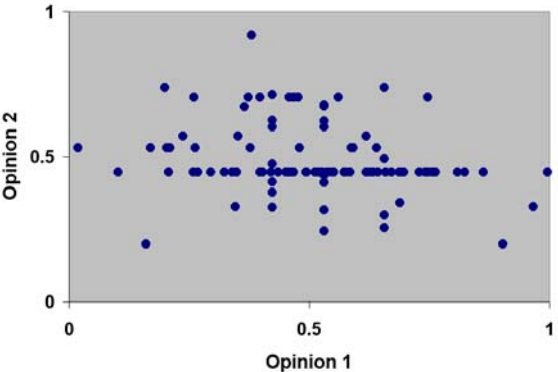
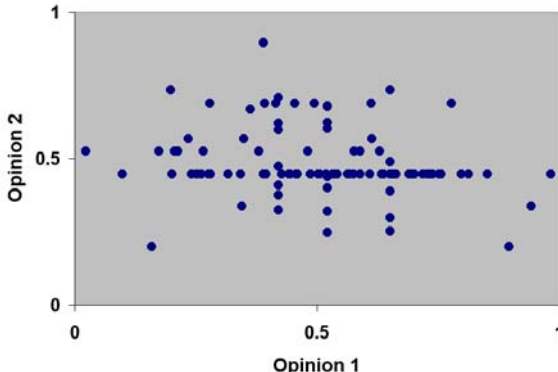
Η διαφορά της γνώμης 1 του πράκτορα 1 κατά 10^{-10} μετέβαλε ριζικά την εξέλιξη των στατιστικών δεικτών του συστήματος. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η μέγιστη διαφορά στη μέση τιμή της γνώμης 1 κατά τις προσομοιώσεις 1 και 2, κατά τις πρώτες 10000 επαναλήψεις, λαμβάνει χώρα στην επανάληψη 865 και είναι ίση με 0.31. Η αντίστοιχη μέγιστη διαφορά για την τυπική απόκλιση λαμβάνει χώρα κατά την επανάληψη 8390 και είναι ίση με 0.06.

Είναι προφανές ότι για μια τέτοιου είδους κοινωνία, κάποια κοινωνική έρευνα που θα μετρούσε τους στατιστικούς δείκτες μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, θα αδυνατούσε να συλλάβει τη δυναμική εξέλιξη του συστήματος καθώς και να πραγματοποιήσει οποιαδήποτε μακροπρόθεσμη πρόβλεψη. Στη συνέχεια θα μελετήσουμε την ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες του συστήματος για $\psi=1.5$ και $\varepsilon=0.1$

9.7. Διερεύνηση της Ιδιότητας της Ευαισθησίας στις Αρχικές

Συνθήκες για $\psi=1.5$ και $\varepsilon=0.1$

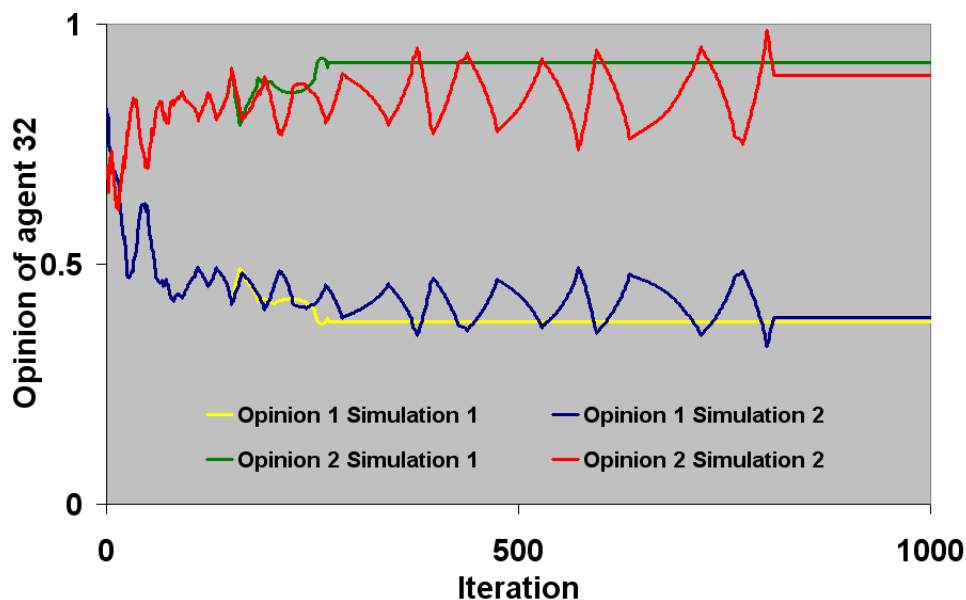
Στον πίνακα 9.18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης 1 και 2 (όπου η γνώμη 1 του πράκτορα 1 έχει τροποποιηθεί κατά 10^{-10}) για $\psi=1.5$ και $\varepsilon=0.1$ με τοπολογία επικοινωνίας αυτή των κυψελοειδών αυτομάτων.

Τοπολογία Κυψελοειδούς Αυτομάτου , 100 πράκτορες, $\psi=1.5$, $\epsilon=0.1$	
Προσομοίωση 1	Προσομοίωση 2
 Γνώμη 1	 Γνώμη 1
 Γνώμη 2	 Γνώμη 2
 Η γνώμη 2 σε συνάρτηση με τη γνώμη1 στην 1.000η επανάληψη.	 Η γνώμη 2 σε συνάρτηση με τη γνώμη1 στην 1.000η επανάληψη.

Πίνακας 9.18: Παρουσίαση του Μοντέλου MER με μια απειροελάχιστα μικρή παραλλαγή στις αρχικές συνθήκες. Η προσομοίωση 1, στην αριστερή στήλη παρουσιάστηκε και

μελετήθηκε σε προηγούμενη ενότητα. Στην Προσομοίωση 2 μοναδική αλλαγή σε σχέση με την προσομοίωση 1 είναι η ελάχιστη μεταβολή, κατά 10^{-10} , στη αρχική γνώμη 1 του πράκτορα 1. Οι ατομικές τροχιές των ατόμων καθώς και η τελική διαμόρφωση του συστήματος είναι διαφορετικές, εξαιτίας της ιδιότητας της Ευαισθησίας στις Αρχικές Συνθήκες.

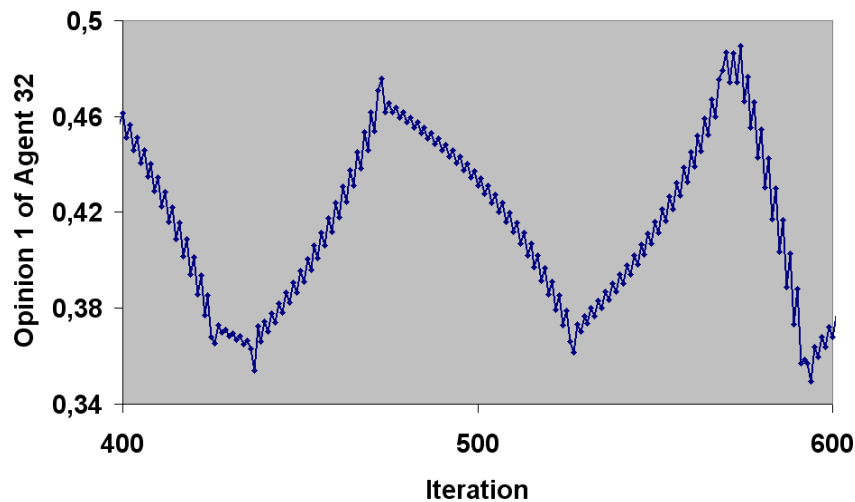
Παρατηρούμε και πάλι ότι λόγω της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες, οι τροχιές των γνώμων όλων των πρακτόρων είναι εντελώς διαφορετικές στις δύο προσομοιώσεις. Επιπροσθέτως όμως υπάρχει και άλλη μια σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο προσομοιώσεων. Η μεταβολή στη αρχική γνώμη της πράκτορα 1 προκάλεσε όχι μόνο την αλλαγή στην τροχιά όλων των πρακτόρων αλλά επιπροσθέτως την εμφάνιση δύο «τρελών» τροχιών γνώμων στην προσομοίωση 2, ενώ στην προσομοίωση 1 δεν είχε εμφανιστεί το φαινόμενο αυτό. Πρόκειται για την τροχιά της γνώμης 1 της πράκτορα 32 (με μαύρο χρώμα στη δεξιά στήλη της πρώτης γραμμής του πίνακα 9.18) και γνώμης 2 των πρακτόρων 32 και 41 (με κόκκινο χρώμα στη δεξιά στήλη της δεύτερης γραμμής του πίνακα 9.18). Στο σχήμα 9.13 παρουσιάζονται οι τροχιές της γνώμης 1 και 2 της πράκτορα 32 στις δύο προσομοιώσεις.



Σχήμα 9.13: Η τροχιά των γνώμων 1 και 2 της πράκτορα 32 στις προσομοιώσεις 1 και 2.

Παρατηρούμε ότι η εξέλιξη των γνώμων στην προσομοίωση 2 έχει εντελώς διαφορετική μορφή από την αντίστοιχη εξέλιξη κατά την προσομοίωση 1. Η κίνηση της τροχιάς, εκτός από τη συνεχή ταλάντωση (παρουσιάζεται σε μεγέθυνση στο σχήμα 9.12

για τη γνώμη 1 κατά την προσομοίωση 2) παρουσιάζει πολύ μεγάλες αυξομειώσεις στην τιμή της, ώσπου να ισορροπήσει ξαφνικά στην επανάληψη 850, στην οποία και τερματίζει όλο το σύστημα.



Σχήμα 9.14: Λεπτομέρεια της τροχιάς της γνώμης 1 του πράκτορα 32 κατά την προσομοίωση 2.

Αξιοσημείωτο επίσης είναι ότι, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.14, η μεγάλη μεταβολή των τροχιών των γνώμων της πράκτορα 32 προς τα πάνω και προς τα κάτω γίνεται με ταυτόχρονες συνεχείς ταλαντώσεις, όπως αναλύθηκε και στην παράγραφο 9.3.2.3 για την τιμή του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας $\psi=1$.

Ένα ακόμη ενδιαφέρον συμπέρασμα είναι ότι η τελική τιμή των γνώμων 1 και 2 διαφέρει πολύ λίγο κατά τις δύο προσομοιώσεις. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 9.13 για την πράκτορα 32, αλλά και στην τρίτη γραμμή του πίνακα 9.18, όπου παρουσιάζονται οι ομάδες που έχουν σχηματιστεί κατά την τελική κατάσταση του συστήματος. Τα διαγράμματα αυτά είναι σχεδόν ίδια. Το φαινόμενο αυτό εμφανίστηκε σε 10 ακόμη προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε με τις ίδιες τιμές των παραμέτρων και διαφορετικές αρχικές συνθήκες. Είναι αξιοσημείωτο το ότι οι τροχιές των πρακτόρων τερματίζουν σε παρόμοιες τελικές τιμές παρότι ακολουθούν διαφορετικές πορείες.

Ακόμη η ύπαρξη της τρελής τροχιάς καθυστερεί και το σύστημα από το να τερματίσει, μιας και στην προσομοίωση 1 το σύστημα φτάνει σε μια τελική σταθερή κατάσταση έπειτα από 350 επαναλήψεις, ενώ για την προσομοίωση 2 ύστερα από 850 επαναλήψεις.

9.8. Αδυναμία Πρόβλεψης και Ορίζοντας Προβλεψιμότητας

Μολονότι στα χαοτικά συστήματα είναι αδύνατο να πραγματοποιηθούν μακροπρόθεσμες προβλέψεις, εξαιτίας της ιδιότητας της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί μαθηματικά εργαλεία που επιτρέπουν την πραγματοποίηση βραχυπρόθεσμων προβλέψεων ή ακόμη κάποιες φορές και μεσοπρόθεσμων, στις περιπτώσεις όπου η ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες δεν είναι πολύ ισχυρή. Οι προβλέψεις αυτές δεν είναι απόλυτα ακριβείς, όμως μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι το μέγεθος του λάθους δεν υπερβαίνει ένα όριο, το οποίο τίθεται πριν την πραγματοποίηση της πρόβλεψης. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του λάθους, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο ορίζοντας προβλεψιμότητας και αντίστροφα, αν επιθυμούμε το λάθος να είναι πολύ μικρό, τότε μικραίνει και ο χρόνος για τον οποίο είναι δυνατό να προβλεφθεί η εξέλιξη του χαοτικού συστήματος. Τα μαθηματικά εργαλεία που παρέχουν τη δυνατότητα πραγματοποίησης βραχυπρόθεσμων προβλέψεων στα χαοτικά συστήματα, ανήκουν στο χώρο των δυναμικών συστημάτων και της επιστήμης του χάους και είναι οι εκθέτες Lyapunov, που έχουν παρουσιαστεί στην παράγραφο 7.4, καθώς και ο χαρακτηριστικός χρόνος, έννοια που θα παρουσιαστεί και αναλυθεί στη συνέχεια.

Προκειμένου να γνωρίσουμε την τροχιά ενός αιτιοκρατικού (ντετερμινιστικού) συστήματος αρκεί να ξέρουμε την αρχική του θέση. Σε δύο διαφορετικές αρχικές θέσεις αντιστοιχούν δύο διαφορετικές τροχιές. Ένα σύστημα είναι χαοτικό αν ενισχύει έστω και ελάχιστα τις αρχικές αποκλίσεις, αν δηλαδή είναι ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες. *Χαρακτηριστικός χρόνος (characteristic time)* ενός χαοτικού συστήματος είναι ο χρόνος όπου ένα πολύ μικρό λάθος σε κάποια μεταβλητή γίνεται δέκα φορές μεγαλύτερο (Ekeland, 1995). Στα χαοτικά συστήματα, εξαιτίας του ντετερμινιστικού τους χαρακτήρα, αν η απόσταση ανάμεσα σε δύο τροχιές είναι d κάποια χρονική στιγμή γίνεται $10d$, μετά την παρέλευση ενός χρόνου T , ο οποίος είναι σταθερός για το σύστημα, όταν αυτό έχει εισέλθει στον ελκυστή του (όχι δηλαδή στις πρώτες επαναλήψεις) και ονομάζεται χαρακτηριστικός χρόνος του συστήματος. Στη συνέχεια η απόκλιση μεγαλώνει, μετά δηλαδή από την παρέλευση χρόνου ίσου με $2T$, το μέγεθος της απόκλισης ισούται με $100d$, μετά από $3T$ με $1000d$, μετά από $4T$ με $10000d$, μετά $5T$ με $100000d$ και ούτω καθ' εξής. Υπάρχουν κάθε φορά τόσα μηδενικά όσα και οι μονάδες του παρελθόντος χρόνου. Η ενίσχυση των αποκλίσεων βέβαια δεν μπορεί να συνεχιστεί επ' άπειρο. Διαφορετικά, μετά από χρονική διάρκεια ίση με σαράντα φορές επί τον χαρακτηριστικό χρόνο, θα έχουμε διατρέξει την τεσσαρακοστή δύναμη του 10

και θα έχουμε βγει έξω από τα όρια του γνωστού σύμπαντος (Ekeland, 1995). Μετά την παρέλευση κάποιου χρόνου το φαινόμενο αυτό της ενίσχυσης της απόκλισης παύει να υφίσταται. Τότε η αρχική απειροελάχιστη απόκλιση έχει ίδιο μέγεθος με τις τροχιές. Στην περίπτωση του μοντέλου MER, ένα αρχικό λάθος της τάξης του 10^{-10} μεγαλώνει και μπορεί να γίνει ίσο, για παράδειγμα, με 0.7, ενώ οι γνώμες ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$. Αντί μια γνώμη λοιπόν να ισούται με 0.1 μετά από 200 επαναλήψεις, εμείς βρίσκουμε ότι είναι ίση με 0.8, ο υπολογισμός μας λοιπόν (η πρόβλεψη αυτή) δεν έχει κανένα νόημα. Από εκεί και έπειτα το λάθος δεν μπορεί να μεγαλώσει άλλο, αντιθέτως αυξομειώνεται, γίνεται πχ ίσο με 0.3, με 0.5 κλπ. Ένα χαοτικό σύστημα λοιπόν ενισχύει τις μικρές αποκλίσεις και μόνο τις μικρές, μεταφέρει τα μικροσκοπικά φαινόμενα σε μακροσκοπική κλίμακα.

Όσον αφορά στα φυσικά συστήματα είναι αδύνατο να τους δώσουμε την ίδια ακριβώς θέση, θα υπάρχει πάντοτε μια απόκλιση, τουλάχιστον ίση με το πάχος ενός ατόμου της ύλης. Η πρώτη διατύπωση αυτού του γεγονότος έγινε από τον Ηράκλειτο, όταν είπε ότι δε μπορούμε να διασχίσουμε δύο φορές τον ίδιο ακριβώς ποταμό. Φυσικά την εποχή εκείνη δεν ήταν δυνατό να γίνουν κατανοητές οι συνέπειες αυτού του γεγονότος, δηλαδή ότι απόκλιση ίση με το πλάτος ενός ατόμου μπορεί μετά την παρέλευση δεκαπλάσιου χρόνου από τον χαρακτηριστικό σε ένα χαοτικό σύστημα γίνεται απόκλιση ενός μέτρου (Ekeland, 1995). *Με τον τρόπο αυτό μπορεί να προκύψουν, στα πλαίσια ντετερμινιστικών συστημάτων, μακροσκοπικά φαινόμενα τα οποία αποδίδονται στην τύχη, μιας και τα αίτιά τους φαίνονται ακατανόητα.*

Η έννοια του χαρακτηριστικού χρόνου σχετίζεται με τον εκθέτη Lyapunov, ο οποίος μετρά την αύξηση του λάθους σε κάθε στοιχειώδη χρονική στιγμή, δηλαδή σε κάθε επανάληψη του συστήματος. Αν για παράδειγμα ο εκθέτης Lyapunov ισούται με $\ln 2$, τότε ο αριθμός Lyapunov ισούται με 2 και έπειτα από μία επανάληψη η απόσταση ανάμεσα σε δύο τροχιές του συστήματος (το λάθος της μέτρησης) διπλασιάζεται, έπειτα από δύο επαναλήψεις τετραπλασιάζεται, έπειτα από τρεις οκταπλασιάζεται, έπειτα από δέκα επαναλήψεις το λάθος έχει γίνει $2^{10} = 1024$ φορές μεγαλύτερο.

Ορίζουμε λοιπόν ως *ορίζοντα προβλεψιμότητας (predictability horizon)* το χαρακτηριστικό χρόνο T , τον αριθμό δηλαδή των επαναλήψεων που χρειάζονται για να γίνει ένα αρκετά μικρό λάθος στον υπολογισμό μιας τροχιάς δέκα φορές μεγαλύτερο. Για το Μοντέλο MER με 100 πράκτορες, όπως δείχθηκε προηγούμενα, για συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας $\psi=1$ και φράγμα εμπιστοσύνης $\varepsilon=0.1$, ο εκθέτης Lyapunov

ισούται με **0.126**. Αυτό σημαίνει ότι οποιοδήποτε απειροελάχιστο λάθος στις αρχικές συνθήκες θα αυξηθεί κατά $e^{0.126}=1.138$ φορές σε κάθε επανάληψη, δηλαδή η μέση εκθετική αύξηση του λάθους ανά επανάληψη ισούται με **1.138**. Κατά συνέπεια, μετά από **T** επαναλήψεις, το μέγεθος του λάθους θα ισούται με $(1.138)^T$. Για να υπολογίσουμε το χαρακτηριστικό χρόνο **T** εξισώνουμε το μέγεθος του λάθους με το 10 και έχουμε

$$(1.138)^T = 10$$

Για τον υπολογισμό του **T** λύνουμε την απλή αυτή εκθετική εξίσωση και έχουμε

$$(1.138)^T = 10 \Leftrightarrow \log(1.138)^T = \log 10 \Leftrightarrow T \log(1.138) = \log 10 \Leftrightarrow$$

$$T = \frac{\log 10}{\log(1.138)} = \frac{1}{\log(1.138)} = 17.81$$

όπου οι προηγούμενοι λογάριθμοι έχουν βάση το 10. Συνεπώς ο χαρακτηριστικός χρόνος, άρα και ο ορίζοντας προβλεψιμότητας, για τις προαναφερθέντες τιμές των παραμέτρων, ισούται με 18 επαναλήψεις περίπου. Αν λοιπόν έχουμε κάποια κατά το δυνατόν ακριβή μέτρηση των δύο γνωμών των 100 πρακτόρων για κάποια συγκεκριμένη επανάληψη, θα μπορούσαμε να διεξάγουμε την προσομοίωση και να προβλέψουμε τις γνώμες όλων των πρακτόρων ως και έπειτα από 18 επαναλήψεις, γνωρίζοντας ότι ένα πιθανό απειροελάχιστο μικρό λάθος της αρχικής μέτρησης έχει γίνει «μόνο» 10 φορές μεγαλύτερο. Κατά συνέπεια, το ζήτημα της πρόβλεψης από «υπολογίζοντας ακριβείς τιμές» μετατρέπεται σε «ελέγχοντας το μέγεθος του λάθους σε μη ακριβείς τιμές».

Για $\psi=1.5$ δε μπορούμε να ορίσουμε τον χαρακτηριστικό χρόνο ή τον ορίζοντα προβλεψιμότητας, επειδή ο Εκθέτης Lyapunov ισούται με μηδέν και οι τοπικοί εκθέτες Lyapunov για τις πρώτες επαναλήψεις που έχουν θετικές τιμές δεν είναι σταθεροί. Όταν εξάλλου το σύστημα εισέλθει στον ελκυστή, ο οποίος για $\psi=1.5$ είναι ένα σημείο του χώρου R^{200} , το σύστημα έχει φτάσει και στη σταθερή τελική κατάσταση, άρα οι τροχιές δεν αποκλίνουν και οποιοδήποτε λάθος στη μέτρηση δε μεγαλώνει.

Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνουμε και με την τοπολογία της ευθείας γραμμής, του κυκλικού γράφου αλλά και τυχαίου γράφου ο οποίος δεν πλησιάζει τον πλήρη γράφο, έχει δηλαδή έναν μικρό αριθμό ατόμων που δεν επικοινωνούν μεταξύ

τους. Η τοπικότητα στην επικοινωνία λοιπόν παράγει ποιοτικά όμοια και ποσοτικά με μικρές διαφορές αποτελέσματα, με αυτά της τοπολογίας των κυψελοειδών αυτομάτων που παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο παρόν κεφάλαιο.

9.9. Συμπεράσματα

Το μεγαλύτερο μέρος της γνωστικής ψυχολογίας έχει αναλωθεί στην προσπάθεια να αποκαλύψει τους κανόνες που ακολουθεί η «κοινωνική σκέψη». Για κάποιους κοινωνικούς ψυχολόγους, αυτή η προσπάθεια περιλαμβάνει τους δεοντολογικούς κανόνες που θα έπρεπε να ακολουθούνται ώστε η σκέψη να προχωρά επιτυχημένα ενώ άλλοι κοινωνικοί ψυχολόγοι δεν ενδιαφέρονται τόσο για τους κανόνες που *πρέπει* να ακολουθούνται, αλλά για αυτούς τους κανόνες που οι συνηθισμένοι άνθρωποι ακολουθούν. Έχει υποστηριχθεί ότι υπάρχει ένα έλλειμμα και στους δύο αυτούς τρόπους λειτουργίας της κοινωνικής σκέψης (Katerelos & Koulouris, 2004b). Δεν είναι ούτε ότι οι κοινωνικοί ψυχολόγοι στηρίζονται σε θεωρίες που πραγματοποιούν λανθασμένες προβλέψεις, ούτε ότι τα πειραματικά αποτελέσματά έχουν προκύψει από μεθοδολογικά λανθασμένες διαδικασίες. Αυτό που λείπει είναι μια αίσθηση της δυναμικής φύσης της κοινωνικής σκέψης. Ακόμη, μολονότι και οι δύο προσεγγίσεις αποδέχονται το συμβατικό έλεγχο υποθέσεων της στατιστικής επιστήμης, υπολείπονται στη δυνατότητα να κατανοήσουν και να αναπαραστήσουν την κοινωνική δράση που λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα στο μικρό και στο μακρο επίπεδο (Katerelos & Koulouris, 2004b).

Στη τεχνητή κοινωνική πραγματικότητα του μοντέλου MER, η αρχική θέση των πρακτόρων είναι γνωστή με ακρίβεια η οποία είναι αδύνατο να επιτευχθεί κατά την κοινωνιοψυχολογική ερευνητική πρακτική: είναι σημαντικό εντούτοις ότι ακόμη και αν επιτευχθεί αυτή η ακρίβεια στην κοινωνιοψυχολογική έρευνα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη διερεύνηση του μοντέλου MER, απειροελάχιστα μικρά λάθη στις μετρήσεις των γνώμων των πρακτόρων μπορούν να ενισχυθούν σε ένα δυσανάλογο βαθμό και να ακυρώσουν οποιαδήποτε πρόβλεψη. Η ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες είναι ένα χαρακτηριστικό του ίδιου του συστήματος και όχι αποτέλεσμα του εφαρμοζόμενου εργαλείου μέτρησης.

Η εισαγωγή των τοπολογιών επικοινωνίας που περιορίζουν την επικοινωνία και τις αλληλεπιδράσεις μόνο στο τοπικό επίπεδο έχει καθοριστική επίδραση σε μια

σειρά ιδιοτήτων του μοντέλου, με σημαντικότερη τη δυνατότητα πρόβλεψης. Οι τοπολογίες αυτές μετατρέπουν τη συμπεριφορά του συστήματος με έναν αξιοσημείωτο τρόπο: από την περιοδικότητα το μοντέλο οδηγείται στο «καθαρό» χάος. Η επιβληθείσες τοπολογίες φαίνεται να δημιουργούν μικρο-επικοινωνιακές ανωμαλίες στον κοινωνικό ιστό του μακρο-κόσμου των πρακτόρων, οι οποίες αρχικά οδηγούν στο σχηματισμό ομάδων και στη συνέχεια στη χαοτική εξέλιξη των τροχιών των ατόμων αλλά και των ομάδων. Αυτό σημαίνει ότι είναι όχι μόνο αδύνατο να πραγματοποιηθούν μακροπρόθεσμες προβλέψεις, αλλά επιπλέον το σύστημα δεν κατασταλάζει ποτέ σε μια τελική σταθερή κατάσταση. Υπάρχει μόνο η δυνατότητα για βραχυπρόθεσμες, μη ακριβείς προβλέψεις, μέσα σε ένα χρονικό ορίζοντα προβλεψιμότητας, όπου το μέγεθος του λάθους είναι ελεγχόμενο και δεν ξεπερνά κάποια συγκεκριμένη τιμή.

Καθώς το σύστημα βρίσκεται πάντα σε κίνηση και επιπλέον είναι ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες, τα στιγμιότυπα, οι στατικές φωτογραφικές μετρήσεις για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι άνευ νοήματος, δεδομένου ότι αδυνατούν να συλλάβουν τη δυναμική του συστήματος έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η πραγματοποίηση προβλέψεων. Με τον υπολογισμό του ορίζοντα προβλεψιμότητας, δηλαδή του χαρακτηριστικού χρόνου του συστήματος, ο κοινωνικός επιστήμονας είναι σε θέση να πραγματοποιήσει μια βραχυπρόθεσμη, μη ακριβή πρόβλεψη όσον αφορά στη μελλοντική εξέλιξη του συστήματος και να οδηγηθεί στην εξαγωγή συμπερασμάτων, δίχως την καταφυγή σε μια δεοντολογική λογική της συμμόρφωσης και του κοινωνικού ελέγχου: σύμφωνα με τον Benzecri (1992) το μοντέλο πρέπει να ταιριάζει με τα εμπειρικά δεδομένα και όχι αντίστροφα τα εμπειρικά δεδομένα με το μοντέλο. Με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για το μοντέλο πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών και παρά την προφανή έλλειψη τους στον τομέα της λειτουργικότητας, υπογραμμίζεται η ανάγκη να εστιάσει η κοινωνιοψυχολογική έρευνα περισσότερο στη μελέτη και διερεύνηση της κοινωνικής δυναμικής παρά της στατικής οπτικής πτυχής των κοινωνικών φαινομένων.

Ανάμεσα σε πολλούς κοινωνικούς ερευνητές επικρατεί η πεποίθηση ότι αν καταφέρουμε να ελέγξουμε το λάθος στις μετρήσεις μας ή ακόμη και να το εξαλείψουμε, τότε θα είμαστε σε θέση να κάνουμε ακριβείς προβλέψεις σχετικά με την ανθρώπινη συμπεριφορά και θα αποκτήσουμε μια θέση δίπλα στην επιστημονική ελίτ των θετικιστών (Aldridge, 1999). Το μοντέλο MER όμως υποδεικνύει ότι κάθε προσπάθεια για την εφεύρεση τεχνικών συλλογής δεδομένων που να είναι απαλλαγμένα από οποιοδήποτε λάθος είναι ματαιοπονία, ακόμη κι αν καταστεί δυνατό ένα τέτοιο

επίτευγμα. Είτε θα προσπαθούμε να μηδενίσουμε το λάθος στις μετρήσεις είτε θα δεχθούμε ότι κάθε τέτοια απόπειρα μέτρησης είναι ουτοπική (Katerelos & Koulouris, 2004a).

Παρά την ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες όμως, παρατηρούμε ότι, για σταθερές τιμές των παραμέτρων, η μάκρο περιγραφή του συστήματος παραμένει η ίδια για οποιοδήποτε αρχικό προφίλ γνώμων, μολονότι στο μικρο επίπεδο οι γνώμες της κάθε πράκτορα είναι τελείως διαφορετικές. Στο μάκρο επίπεδο, ο εκθέτης Lyapunov, που μετρά τη δυνατότητα πρόβλεψης, η εντροπία της πληροφορίας, που μετρά την αυτοοργάνωση του συστήματος, και ο αριθμός των σχηματιζόμενων ομάδων παραμένουν αναλλοίωτοι. Δηλαδή οι σημαντικότερες μάκρο-ιδιότητες του συστήματος, άρα και η γενικότερη εικόνα που παρουσιάζει το σύστημα, όταν το μελετούμε και το παρατηρούμε συνολικά, δεν επηρεάζεται από την ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες. Στο μικρο επίπεδο αντίθετα κάθε πράκτορας ακολουθεί διαφορετική πορεία κατά τη διεξαγωγή οποιασδήποτε προσομοίωσης, παρά τις σχεδόν ταυτόσημες αρχικές συνθήκες.

Οι τεχνητές κοινωνίες επιτρέπουν ακόμη την επέκταση των θεωρητικών μοντέλων δικτύων στις δυναμικές προσομοιώσεις, ανασκευάζοντας τη συχνή κριτική, σύμφωνα με την οποία η ανάλυση δικτύων είναι υπερβολικά στατική και δομική (Burke, 1997). Σε ένα μεγάλο αριθμό τεχνητών κοινωνιών οι δομές αποτελούν δίκτυα επικοινωνίας και μπορούν να προκύψουν από τις τοπικές αλληλεπιδράσεις και τις ενέργειες των πρακτόρων, όπως για παράδειγμα η ανάδυση συστάδων πρακτόρων με την ίδια γνώμη στο μοντέλο διασποράς των γνώμων των Nowak & Latané (1994), στο μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης των Hegselmann & Krause (2002) και στο μοντέλο πολιτισμικής διαφοράς του Axelrod (1997a). Στις τεχνητές αυτές κοινωνίες η δομή (οι ομάδες που σχηματίζονται) προκύπτει από τις μεμονωμένες ενέργειες και τις αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων και κατόπιν αναπαράγεται μέσω των ίδιων δυναμικών διαδικασιών.

Το σύστημα του μοντέλου MER με την τοπολογία επικοινωνίας των κυψελοειδών αυτομάτων είναι πολύπλοκο (complex), αυτό-οργανώνεται και αυτό-αποδιοργανώνεται και έχει αναδυόμενη (emergent) δυναμική. Καμιά πράκτορας δεν έχει συνολική άποψη της τεχνητής κοινωνίας. Καθεμιά επηρεάζεται και ως προς τις δύο γνώμες της από μερικά από τα μέλη της ομάδας της, αλλά επηρεάζεται επίσης μόνο ως προς τη γνώμη 1 από μερικές ακόμη πράκτορες και ως προς τη γνώμη 2 από μερικές άλλες. Όλες οι πράκτορες είναι απληροφόρητες για τον αριθμό των ομάδων που έχουν σχηματιστεί, δεν γνωρίζουν αν υπάρχουν άλλες ομάδες με γνώμη που να διαφέρει λίγο

περισσότερο από το φράγμα εμπιστοσύνης ή αν οι γνώμες όλων των υπολοίπων ομάδων διαφέρουν κατά πολύ ως προς τη δική τους, αν υπάρχουν ομάδες με γνώμη κοντινή με τη δική τους που κινούνται προς το μέρος τους και άρα, μετά από έναν μικρό αριθμό επαναλήψεων, πρόκειται να αλληλεπιδράσουν με αυτές ή να απομακρυνθούν. Όλες οι υποθέσεις του μοντέλου MER, όπως άλλωστε και των περισσότερων δραστοστρεφών μοντέλων κοινωνικών προσομοιώσεων αφορούν τη μεμονωμένη συμπεριφορά των πρακτόρων και ακολουθούν μια ατομικιστική (individualistic) προσέγγιση στην κοινωνιοψυχολογική θεωρία εκτός από την τοπολογία επικοινωνίας που επιβάλλεται στο σύστημα.

Η μάκρο ιδιότητα της τοπολογίας της επικοινωνίας αποτέλεσε το αίτιο για την αλλαγή των κάτωθεν διαδικασιών της ανάπτυξης ενός κοινωνικού κανόνα, στην προσομοίωση του Axtell που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 7.2, ενώ στο μοντέλο MER της ανάπτυξης ενός χαοτικού, μη προβλέψιμου συστήματος που δεν τερματίζει σε πεπερασμένο χρόνο. Η εμφάνιση μιας μάκρο ιδιότητας, όπως αυτή της τοπολογίας επικοινωνίας, ως αιτίου για την αλλαγή των μηχανισμών της δυναμικής εξέλιξης και της ανάπτυξης ενός άλλου μάκρο κοινωνικού φαινομένου, όπως του κανόνα της πρόωρης συνταξιοδότησης ή της χαοτικής εξέλιξης και της αδυναμίας πρόβλεψης, έρχεται σε αντίθεση με κάποιες θεωρητικές απόψεις, όπως για παράδειγμα του Giddens (1984), ότι οι κοινωνικές δομές και τα συστήματα δεν μπορούν να υπάρξουν, εκτός και αν τα άτομα έχουν *εξαιρετική γνώση (sophisticated knowledge)* των κοινωνικών δραστηριοτήτων, τις οποίες ο Giddens αποκάλεσε *πρακτική συνείδηση (practical consciousness)*. Ο Giddens υποστήριξε ότι η δομή δεν έχει ύπαρξη ανεξάρτητη της γνώσης που οι πράκτορες έχουν για αυτό που κάνουν στην καθημερινή τους δραστηριότητα και ρητά απέρριψε την άποψη ότι οι αντικειμενικές κοινωνικές δομές θα μπορούσαν να αναδυθούν από τη ατομική δράση. Αντ' αυτού υποστήριξε ότι η δομή δεν είναι κάτι εξωτερικό των ατόμων και οι κοινωνικές πρακτικές είναι υπό μια ορισμένη έννοια περισσότερο εσωτερικές παρά εξωτερικές.

Αντιθέτως, στις δύο προαναφερθέντες προσομοιώσεις, καθώς και σε ένα μεγάλο αριθμό άλλων δραστοστρεφών προσομοιώσεων, οι πράκτορες έχουν τη δυνατότητα να αλληλεπιδρούν, δίχως όμως να διαθέτουν κάποια εσωτερική αναπαράσταση για οποιοδήποτε φαινόμενο της τεχνητής τους κοινωνίας. Σε αντίθεση με τις θέσεις του Giddens, οι τεχνητές κοινωνίες αλληλεπιδρώντων πρακτόρων καταδεικνύουν την δυνατότητα ανάπτυξης και αναπαραγωγής μιας κοινωνικής δομής, ακόμα κι αν οι πράκτορες δεν διαθέτουν καμία εσωτερική αναπαράσταση για την

κοινωνία που «ζουν» (Sawyer, 2003). Σύμφωνα με την άποψη του Cohen (1989) για τη θεωρία της δομοποίησης, ένας προσανατολισμός προς τις κοινωνικές πρακτικές ανασκευάζει το σύνολο των επιχειρημάτων υπέρ της ανάδυσης των κοινωνικών σχημάτων και κατά συνέπεια οι στερεότυπες επαναλήψεις των θεσμοποιημένων τρόπων αλληλεπίδρασης μεταξύ των πρακτόρων δεν είναι κάτι εκτός των κοινωνικών σχημάτων που διαμορφώνουν. Οι αντικειμενικές δομές μπορούν να αναδυθούν και η ύπαρξη τους μπορεί να περιορίσει τους μεμονωμένους πράκτορες (μέσω των αλλαγών στην τοπολογία της επικοινωνίας των πρακτόρων και κατά συνέπεια των τοπικών αλληλεπιδράσεων), ακόμα και όταν οι πράκτορες δε διαθέτουν καμία εσωτερική αναπαράσταση. Ο Sawyer (2003) υποστηρίζει ακόμη ότι η θεωρία της δομοποίησης θα μπορούσε να τροποποιηθεί και να καταστεί συμβατή με τέτοιες δραστοστρεφείς προσομοιώσεις, αφού τελικά και στις τεχνητές κοινωνίες η προκύπτουσα κοινωνική δομή παράγεται και αναπαράγεται, σύμφωνα με τη θεωρία της δομοποίησης, από τις συνεχείς δράσεις των πρακτόρων, ακόμη κι αν η δομή περιορίζει τους ίδιους τους πράκτορες που την παρήγαγαν. Μια τέτοια επέκταση της θεωρίας δομοποίησης θα έπρεπε να γίνει περισσότερο αντικειμενοστραφής (objectivist), ώστε να περιορίζει την έμφαση στην πρακτική γνώση του ατόμου, αναγνωρίζοντας συγχρόνως κάποιο θεωρητικό ρόλο για την αναδυόμενη κοινωνική δομή (Layder, 1987).

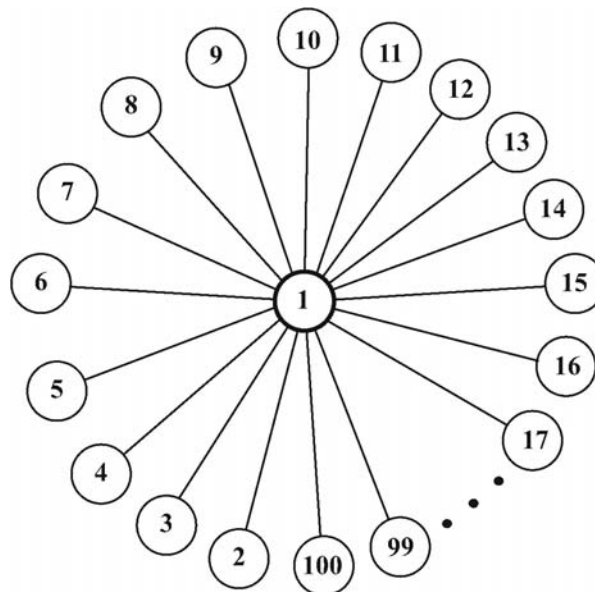
Στην κοινωνική πραγματικότητα οι ομάδες δεν ακολουθούν πάντοτε το «συμφέρον» τους στις σχέσεις που συνάπτουν με τις άλλες ομάδες ή τις άλλες κοινωνικές κατηγορίες και τα άτομα, όταν εντάσσονται, έστω συμβολικά και για περιορισμένο χρονικό διάστημα, στα πλαίσια των διομαδικών σχέσεων, δεν συμπεριφέρονται ούτε σκέπτονται πάντοτε με τον ορθολογικό τρόπο που υποτίθεται ότι τα χαρακτηρίζει στην καθημερινή τους ζωή. Αντίθετα οι πράκτορες του μοντέλου MER, εκτός του ότι κινούνται σε δύο επίπεδα, είναι απόλυτα ορθολογιστές. Κάθε μεταβολή που λαμβάνει χώρα οφείλεται σε ένα ντετερμινιστικό αλγόριθμο και σε αριθμητικούς υπολογισμούς. Παρά την απλότητα αυτής της τεχνητής κοινωνίας, η εξέλιξή της είναι μη προβλέψιμη. Προφανώς η μη προβλεψιμότητα της κοινωνικής εξέλιξης έχει αποδοθεί σε μια σειρά λόγους, όπως η πολυπλοκότητα της κοινωνίας, της τυχαιότητας κάποιων γεγονότων που λαμβάνουν χώρα, της ταυτόχρονης λειτουργίας πολλών μηχανισμών και σε πολλά επίπεδα ή σε όλα τα ανωτέρω. Για το μοντέλο MER τίποτε από όλα αυτά δεν είναι απαραίτητο για το σχηματισμό μιας μη προβλέψιμης κοινωνίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΑΣΤΡΟ

10.1. Παρουσίαση της Τοπολογίας

Μετά την εξέταση της πιο χαρακτηριστικής μάκρο τοπολογίας, του Πλήρους Γράφου και κάποιων τοπολογιών που εισάγουν την τοπικότητα στην επικοινωνία και άρα στη δυνατότητα αλληλεπίδρασης, όπως την τοπολογία του κυψελοειδούς αυτόματου και την τοπολογία της ευθείας γραμμής, συνεχίζουμε τη διερεύνηση του μοντέλου πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών με μια τοπολογία που επιτρέπει την καθολική επικοινωνία για ένα πράκτορα και περιορίζει τους υπόλοιπους 99 σε τοπική επικοινωνία. Στο σχήμα 10.1 παρουσιάζεται η τοπολογία άστρο. Κάθε κόμβος του γράφου συμβολίζει ένα πράκτορα και κάθε ακμή του γράφου δηλώνει επικοινωνία και αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο πρακτόρων/κόμβων.



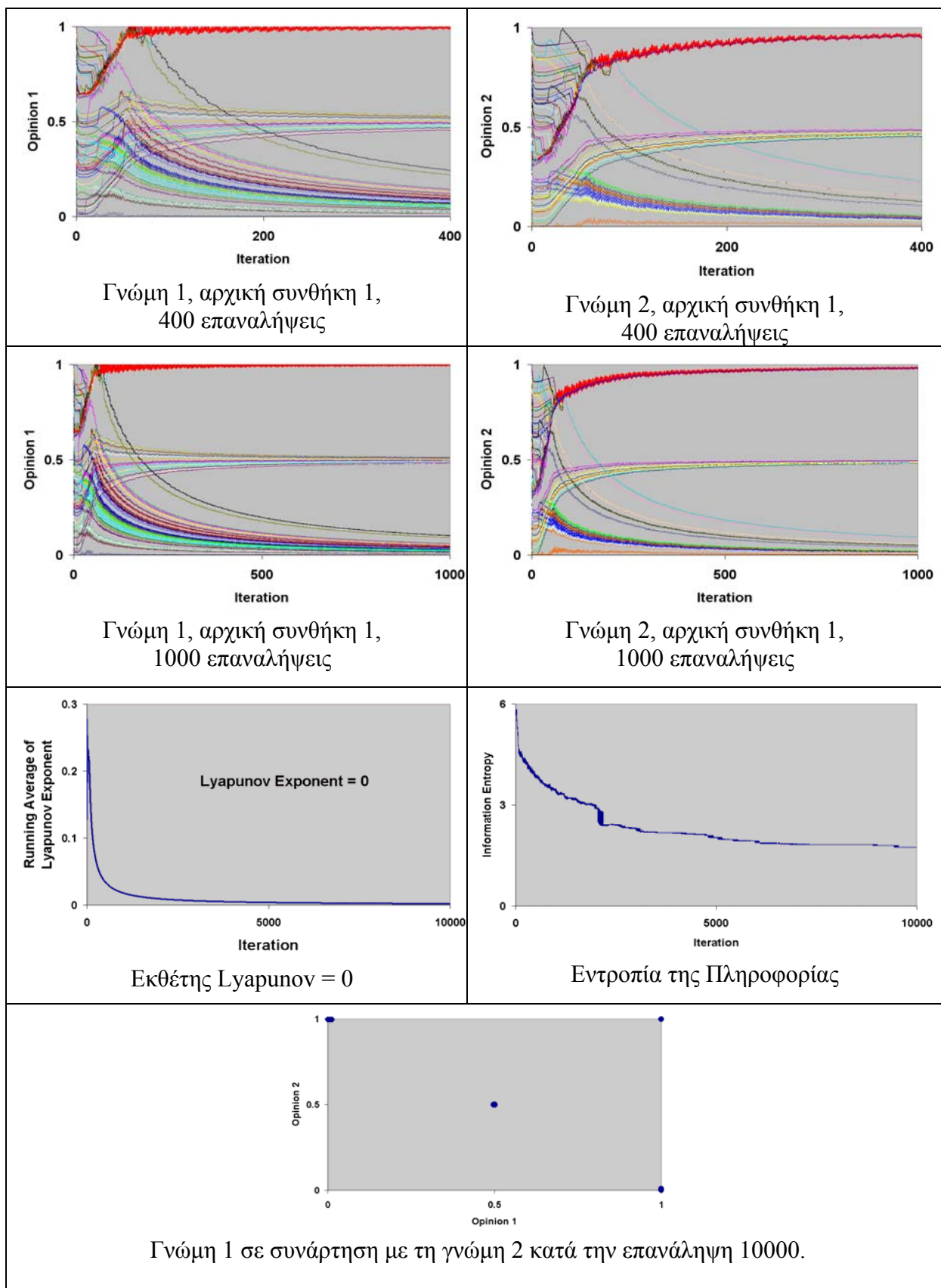
Σχήμα 10.1: Τοπολογία άστρο με 100 κόμβους-πράκτορες.

Όπως είναι προφανές από το σχήμα, υπάρχει μόνο μια πράκτορας, η πράκτορας με τον αριθμό 1, που επικοινωνεί και κατά συνέπεια γνωρίζει τις γνώμες 1 και 2 όλων των άλλων πρακτόρων (έχει καθολική γνώση της τεχνητής κοινωνίας), ενώ

όλες οι υπόλοιπες γνωρίζουν, επικοινωνούν και αλληλεπιδρούν, με βάση τον αλγόριθμο του μοντέλου MER μόνο με τις δύο γνώμες αυτής της «κεντρικής», όσον αφορά στην επικοινωνία, πράκτορα.

10.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την τοπολογία επικοινωνίας άστρο και για συντελεστή ενδοατομικής επικοινωνίας $\psi=1$ και φράγμα εμπιστοσύνης $\varepsilon=0.1$ παρουσιάζονται στον πίνακα 10.1. Ως αρχικές γνώμες των πρακτόρων χρησιμοποιείται η αρχική συνθήκη 1, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί σε όλες της προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της διατριβής. Με κόκκινο έντονο χρώμα είναι σημειωμένες οι τροχιές των γνώμών της κεντρικής πράκτορα 1.



Πίνακας 10.1: Το μοντέλο MER, όπου και στις δύο γνώμες οι πράκτορες επικοινωνούν σύμφωνα με την τοπολογία «άστρο», για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$

Στην πρώτη γραμμή του πίνακα 10.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη των γνωμών των πρακτόρων για τις πρώτες 400 επαναλήψεις και στη δεύτερη γραμμή για τις πρώτες 1000, όπου διαφαίνεται καλύτερα και η τελική κατάσταση στην οποία τείνει το σύστημα ασυμπτωτικά. Και στις δύο γνώμες παρατηρείται ένας γρήγορος σχηματισμός τριών ομάδων γνωμών (ως προς την κάθε γνώμη ξεχωριστά), όπου οι τιμές τους τείνουν να γίνουν ίσες με 0, 0.5 και 1 περίπου. Παρόλα αυτά μόνο 4 ομάδες (ως προς και τις δύο γνώμες) πρακτόρων έχουν σχηματιστεί (πίνακας 10.1, τέταρτη γραμμή). Καμιά πράκτορας δεν έχει τερματίσει και με τις δύο του γνώμες ίσες με 0 ή τη μια ίση με 0.5 και την άλλη ίση με 1 ή τη μια ίση με 0.5 και την άλλη ίση με 0.

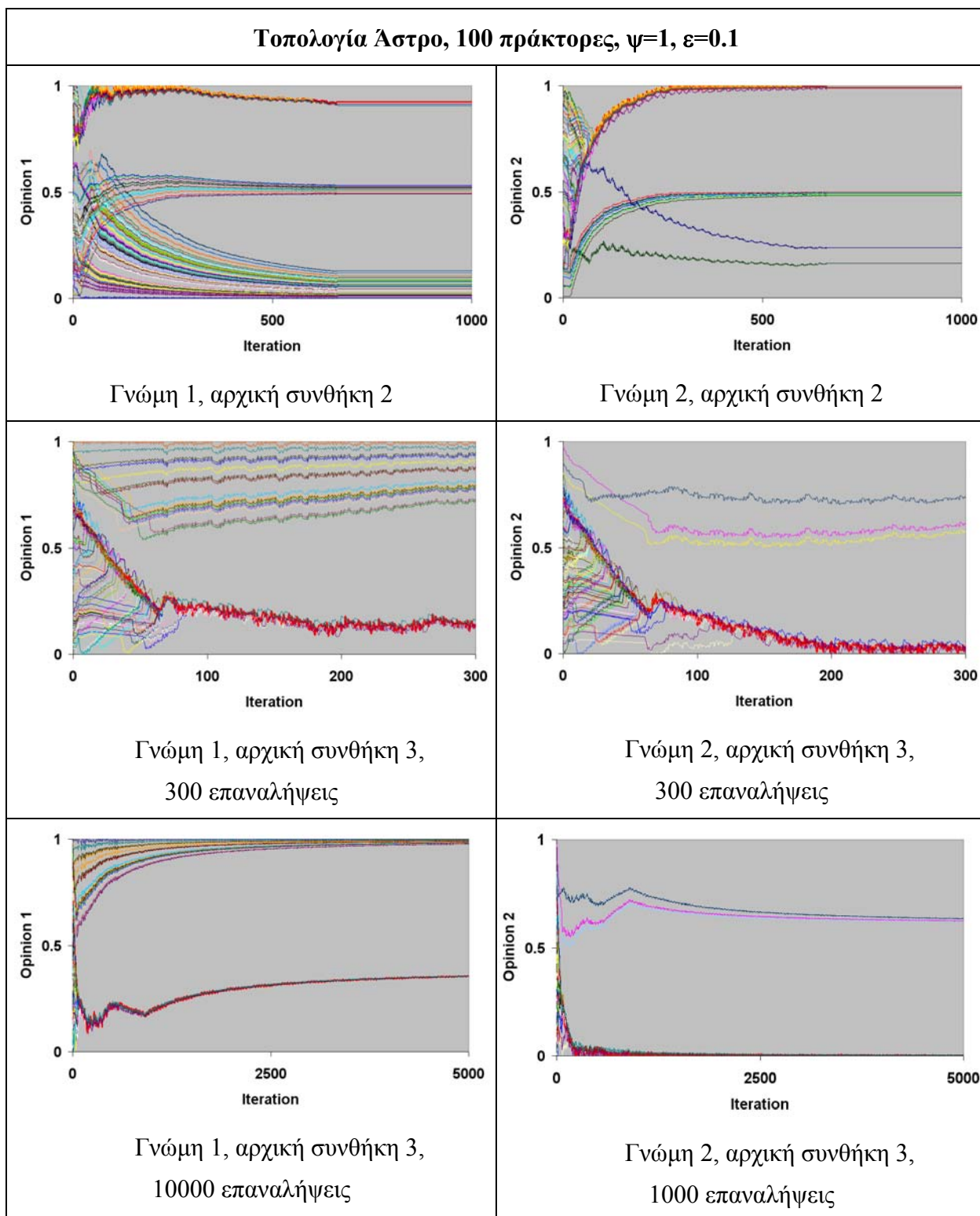
Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι λίαν εντυπωσιακό όσον αφορά τη θεμελιώδη ιδιότητα του μοντέλου, τη δυνατότητα πρόβλεψης. Ο εκθέτης Lyapunov είναι θετικός για ένα πολύ μικρό αριθμό επαναλήψεων (πίνακας 10.1, τρίτη γραμμή). Λόγω του πολύ μικρού αριθμού αρχικών επαναλήψεων με θετικό εκθέτη Lyapunov, καθώς και του γεγονότος ότι ο εκθέτης δε λαμβάνει μεγάλες αριθμητικές τιμές, *το σύστημα δεν παρουσιάζει ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες*. Το συνηθισμένο απειροελάχιστο μικρό λάθος 10^{-10} σε μια γνώμη ενός πράκτορα, που χρησιμοποιούμε για να ελέγξουμε την προαναφερθείσα ιδιότητα, μολονότι αυξάνει, παραμένει στην ίδια τάξη του 10^{-10} ή το πολύ γίνεται 10^{-9} , όσες φορές κι αν επαναλάβουμε την προσομοίωση, κρατώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους και την αρχική συνθήκη σταθερές. Αν το λάθος αφορά μία από τις δύο γνώμες του «κεντρικού» πράκτορα 1, τότε το λάθος μεγαλώνει λίγο περισσότερο, μπορεί να φτάσει ως 10^{-7} ή 10^{-6} . Σε καμία προσομοίωση από τις 20 που πραγματοποιήσαμε δεν έφτασε να εξισωθεί με την τάξη μεγέθους των γνωμών. Αν το λάθος στη μια γνώμη οποιουδήποτε πράκτορα ισούται με 0.1 και κρατήσουμε όλες τις υπόλοιπες γνώμες ίδιες, τότε λαμβάνουμε μια εντελώς διαφορετική πορεία για οποιονδήποτε πράκτορα. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα διαθέτει μια ασθενή ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες, όμως υπάρχει η δυνατότητα πρόβλεψης της εξέλιξης του συστήματος για οποιαδήποτε δεδομένη αρχική συνθήκη. Η πρόβλεψη αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί κατόπιν διεξαγωγής της προσομοίωσης και μπορεί να έχει πολύ μεγάλη ακρίβεια.

Υπενθυμίζουμε η αποτελεσματικότητα της ερευνητικής μεθόδου των δραστοστρεφών μοντέλων προσομοίωσης εξαρτάται και από την αξιοπιστία (robustness) των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Σε καμία περίπτωση το «τρέξιμο» του μοντέλου μία και μοναδική φορά δεν παρέχει οποιουδήποτε είδους εχέγγυα για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και δεν αποτελεί οριστική λύση. Η έκβαση κάθε προσομοίωσης

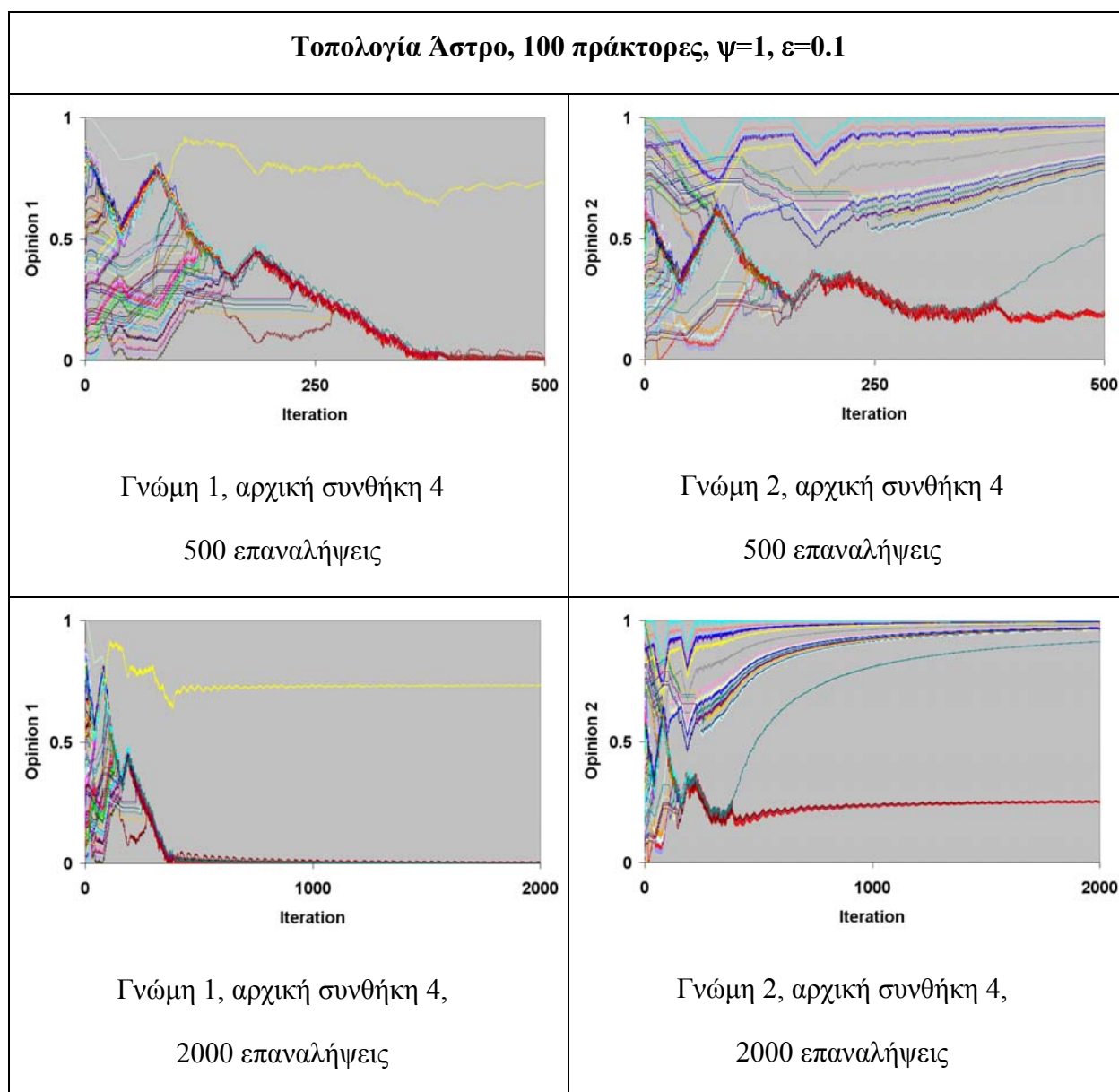
χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα λόγω των ποικίλων αλληλεπιδράσεων των πρακτόρων. Είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση μεγάλου αριθμού επαναλήψεων της προσομοίωσης και ακολούθως αξιολόγηση του συνόλου των αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας συγκριτικές στατιστικές μεθόδους, ώστε να γίνει δυνατός ο καθορισμός της σταθερότητας ή της αστάθειας της λύσης ισορροπίας ή των πολλαπλών ισορροπιών που ενδεχομένως παρουσιάζει το μοντέλο²⁷. Στη συγκεκριμένη περίπτωση διεξήγαμε συνολικά 20 προσομοιώσεις με διαφορετικές αρχικές συνθήκες για τις παραπάνω τιμές των παραμέτρων ώστε να βεβαιωθούμε ότι όλα τα προαναφερθέντα συμπεράσματα είναι έγκυρα.

Για την τοπολογία άστρο, αντίθετα με τις άλλες τοπολογίες, που η δυναμική του συστήματος ήταν ανεξάρτητη από την αρχική συνθήκη, τις αρχικές δηλαδή τιμές των ατόμων, υπάρχουν κάποιες μικρές διαφορές στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όσον αφορά στη διαμόρφωση των τροχιών των γνωμών των πρακτόρων, στις ομάδες γνωμών που σχηματίζονται καθώς και στην τελική κατάσταση ισορροπίας του συστήματος. Για το λόγο αυτό παρουσιάζουμε στους πίνακες 10.2 και 10.3 τρεις επιπλέον προσομοιώσεις από τις 20 που διεξήχθησαν επίσης με την τοπολογία άστρο καθώς και τις τιμές των παραμέτρων $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$ για διαφορετικές αρχικές τυχαίες συνθήκες, οι οποίες είναι αντιπροσωπευτικές των υπολοίπων. Κάποιες από τις βασικές ιδιότητες της δυναμικής του συστήματος παρέμειναν ίδιες, υπήρχαν όμως και κάποιες διαφορές.

²⁷ Σε κάποιες περιπτώσεις μάλιστα, τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων δίνονται με τη μορφή κατανομών πιθανοτήτων που ακολουθούν οι αναμενόμενες εκβάσεις των προσομοιώσεων, ανεξάρτητα από τις αρχικές συνθήκες



Πίνακας 10.2: Γνώμη 1 και 2 για δύο επιπλέον διαφορετικές αρχικές τυχαίες συνθήκες, τοπολογία επικοινωνίας άστρο, $\psi=1$, $\varepsilon=0.1$. Με έντονο κόκκινο χρώμα είναι σημειωμένες οι τροχιές των γνώμων της κεντρικής πράκτορα 1.



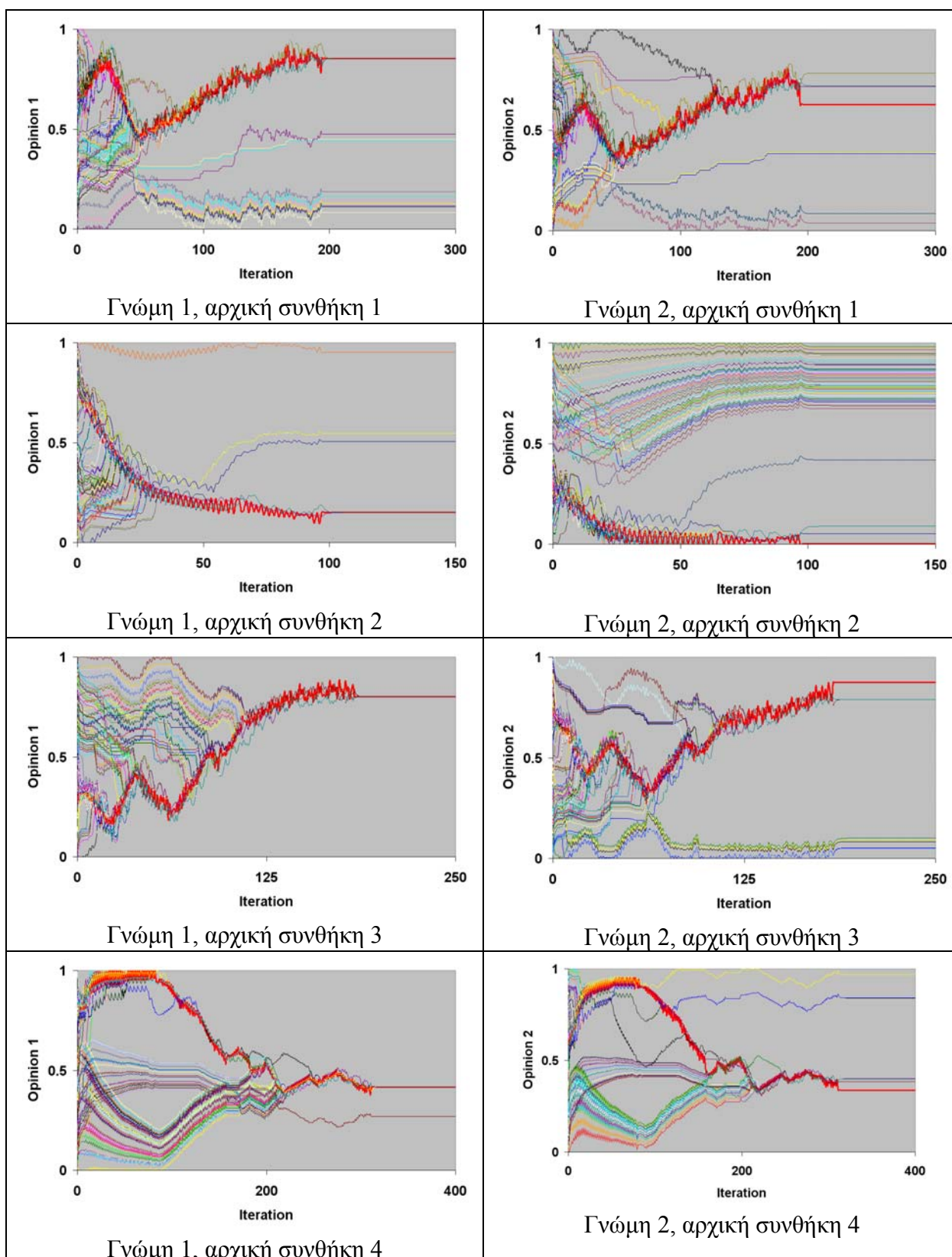
Πίνακας 10.3: Γνώμη 1 και 2 με διαφορετικές αρχικές τυχαίες συνθήκες, τοπολογία επικοινωνίας άστρο, $\psi=1$, $\varepsilon=0.1$. Με έντονο κόκκινο χρώμα είναι σημειωμένες οι τροχιές των γνωμών της κεντρικής πράκτορα 1.

Στον πίνακα 10.2 παρουσιάζονται οι τροχιές των γνωμών 1 και 2 για δύο επιπλέον διαφορετικές αρχικές τυχαίες συνθήκες, την αρχική συνθήκη 2 και την αρχική συνθήκη 3. Όσον αφορά στην αρχική συνθήκη 2 η εξέλιξη του συστήματος είναι παρόμοια με την αντίστοιχη της αρχικής συνθήκης 1, με μόνη διαφορά ότι στη γνώμη 2 έχουμε τέσσερις ομάδες αντί για τρεις, από τις οποίες οι δύο αποτελούνται από μία μόνο πράκτορα. Στη τρίτη αρχική συνθήκη έχουμε σχηματισμό δύο ομάδων, τόσο για τη γνώμη 1 όσο και για τη γνώμη 2. Το ίδιο ισχύει και για την τέταρτη αρχική συνθήκη που

παρουσιάζεται στον πίνακα 10.3. Σε όλες τις περιπτώσεις η τροχιά της γνώμης της κεντρικής πράκτορα 1 είναι σημειωμένη με έντονο κόκκινο χρώμα. Παρατηρούμε ότι η τροχιά της πράκτορα 1 συγκεντρώνει ένα μεγάλο αριθμό από τις γνώμες των άλλων πρακτόρων, πάντα όμως ένας μικρότερος αριθμός ξεφεύγει και σχηματίζει άλλες ομάδες ενώ κάποιες άλλες πράκτορες απομένουν απομονωμένες, πάντα όσον αφορά τη μια γνώμη, είτε την 1 είτε τη 2, αφού όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενα κεφάλαια καμιά πράκτορας ή ομάδα πρακτόρων δεν απομονώνεται ως προς όλες τις άλλες, αλλά πάντοτε αλληλεπιδρά, είτε ως προς τη γνώμη 1 είτε ως προς τη 2. Σε όλες τις αρχικές συνθήκες ισχύουν όσα αναφέραμε προγενέστερα για την αρχική συνθήκη 1, όσον αφορά τη δυνατότητα πρόβλεψης.

10.3. Αποτελέσματα Προσομοίωσης για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.2$ και 0.3

Στη συνέχεια θα διερευνήσουμε το ρόλο του φράγματος εμπιστοσύνης ε στο μοντέλο MER με την τοπολογία του άστρου. Για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.2$ τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 10.4 για τέσσερις διαφορετικές αρχικές τυχαίες συνθήκες.

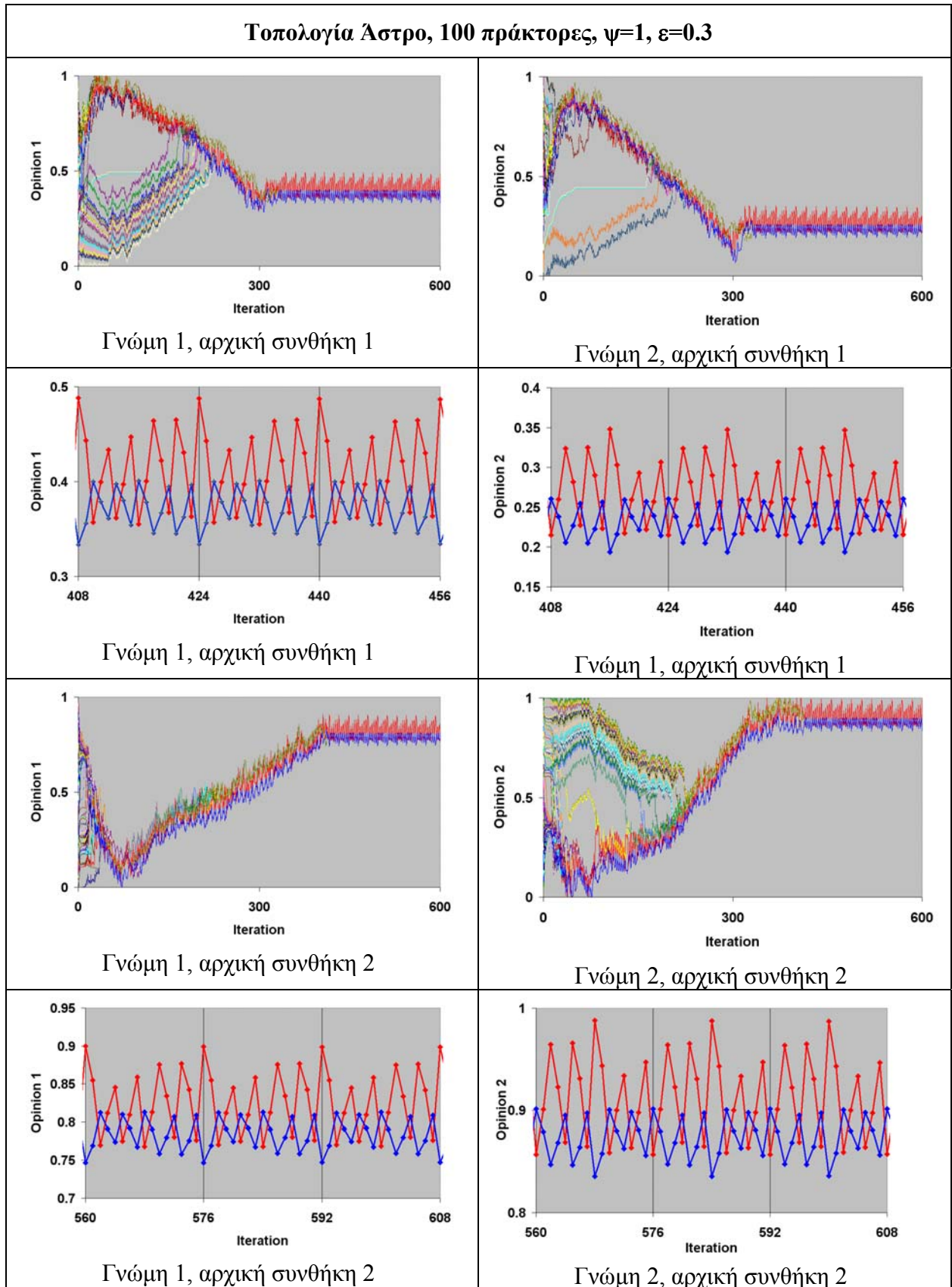


Πίνακας 10.4: Γνώμη 1 και 2 με διαφορετικές αρχικές τυχαίες συνθήκες, τοπολογία επικοινωνίας άστρο, $\psi=1$, $\varepsilon=0.2$. Με έντονο κόκκινο χρώμα είναι σημειωμένες οι τροχιές των γνώμων της κεντρικής πράκτορα 1.

Παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις το σύστημα τερματίζει σε μια σταθερή τελική κατάσταση και όχι ασυμπτωτικά, όπως στην περίπτωση του $\varepsilon=0.1$. Η δυναμική του συστήματος παρουσιάζει κάποιες διαφορές σε καθεμιά από τις τέσσερις αυτές περιπτώσεις. Στην προσομοίωση της αρχικής συνθήκης 1, περίπου οι 90 από τις 100 πράκτορες συμφωνούν με την πράκτορα 1 και οι υπόλοιπες τερματίζουν ξεχωριστά η καθεμιά σε κάποια τιμή. Στη προσομοίωση που χρησιμοποιήθηκε η αρχική συνθήκη 2 διαχωρίστηκαν από τη τροχιά της γνώμης 1 της κεντρικής πράκτορα 1 μόνο 3 πράκτορες και από την τροχιά της γνώμης 2 περίπου οι μισές πράκτορες. Στη προσομοίωση της αρχικής συνθήκης 3 έχουμε ομοφωνία ως προς τη γνώμη 1, μιας και η γνώμη αυτή ανεβαίνει προς το κέντρο και συγκεντρώνει όλες τις άλλες πράκτορες και στην προσομοίωση της συνθήκης 4 έχουμε μια παράξενη δυναμική εξέλιξη των τροχιών των γνωμών.

Όσον αφορά τη δυνατότητα πρόβλεψης, το σύστημα για όλες τις αρχικές συνθήκες που παρουσιάζονται αλλά και για 20 ακόμη είναι επίσης προβλέψιμο. Παρότι έχει κάποιους αρχικούς τοπικούς εκθέτες Lyapunov θετικούς, οποιαδήποτε μικρή παρέκκλιση από τις αρχικές συνθήκες γίνεται το πολύ ως δύο φορές μεγαλύτερη, κατά συνέπεια το σύστημα δεν αυξάνει εκθετικά τις αποκλίσεις και δεν είναι ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες, όπως για $\varepsilon=0.1$.

Για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.3$ τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα 9.5 για δύο διαφορετικές αρχικές τυχαίες συνθήκες.



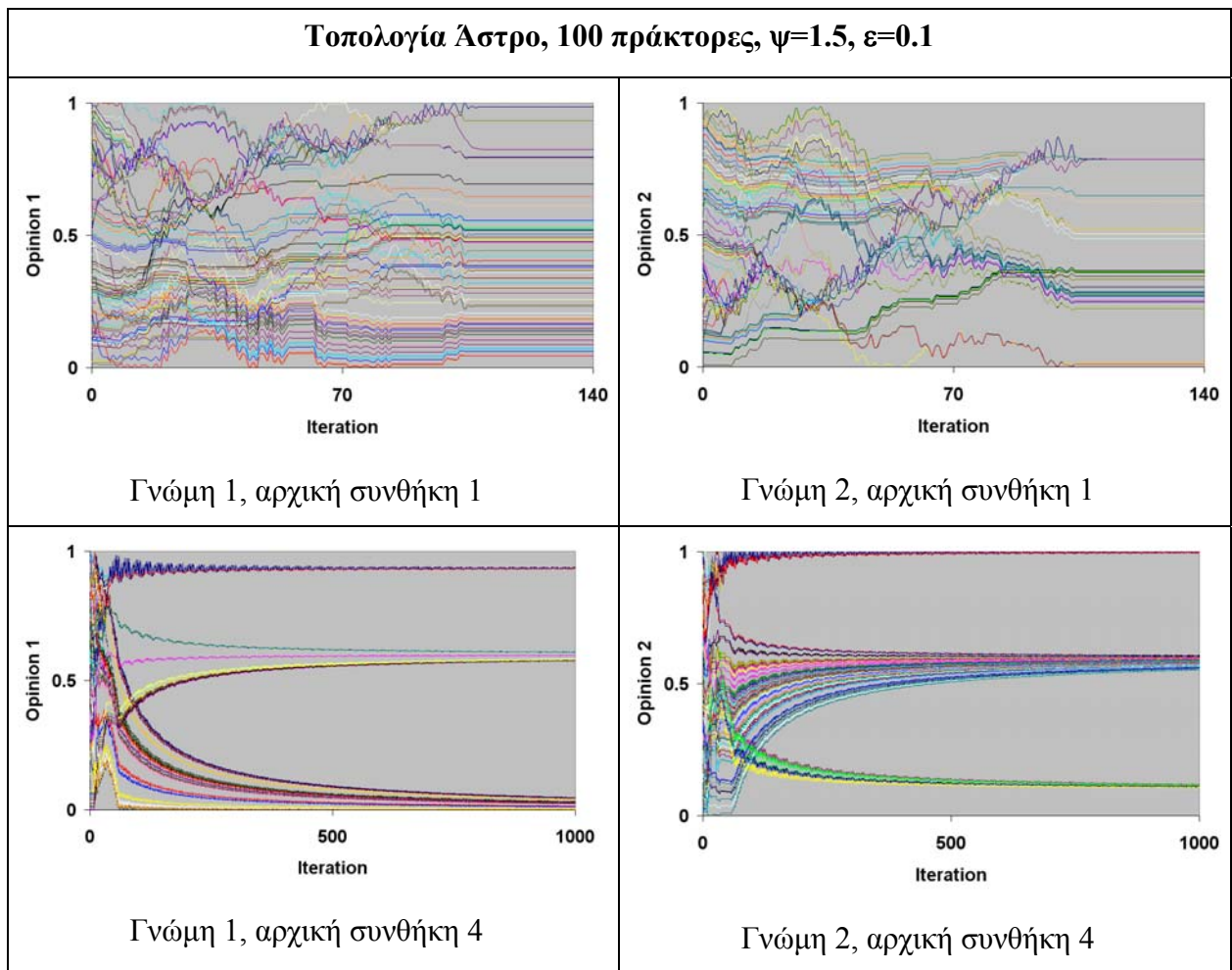
Πίνακας 10.5: Γνώμη 1 και 2 με διαφορετικές αρχικές τυχαίες συνθήκες, τοπολογία επικοινωνίας άστρο, $\psi=1$, $\varepsilon=0.3$. Με έντονο κόκκινο χρώμα είναι σημειωμένες οι τροχιές

των γνωμών της κεντρικής πράκτορα 1. Στη δεύτερη και τέταρτη γραμμή με μπλε χρώμα είναι σημειωμένες οι τροχιές των άλλων 99 πρακτόρων. Η δεύτερη και η τέταρτη γραμμή του πίνακα αποτελούν λεπτομέρειες της πρώτης και της τρίτης γραμμής αντίστοιχα.

Για $\varepsilon=0.3$ λαμβάνουμε ένα εντυπωσιακό και απρόσμενο αποτέλεσμα. Η τελική κατάσταση του συστήματος είναι περιοδική με περίοδο 16 επαναλήψεων. Μάλιστα οι πράκτορες ταλαντώνονται σε δύο τροχιές, στη μία από τις οποίες κινείται μόνη η κεντρική πράκτορας 1 και στην άλλη ταλαντώνονται όλες μαζί οι υπόλοιπες 99 πράκτορες. Το συμπέρασμα αυτό ισχύει και για 20 ακόμη αρχικές συνθήκες που διεξήχθη η προσομοίωση. Είναι τόσο απρόσμενο που στον πίνακα 10.5 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα για δύο αρχικές συνθήκες, για να γίνει κατανοητή η ομοιότητα των αποτελεσμάτων, ανεξαρτήτως οποιασδήποτε αρχικής τυχαίας συνθήκης. Σε όλες τις περιπτώσεις η περίοδος της ταλάντωσης είναι ίση με 16! Στη δεύτερη και την τέταρτη γραμμή του πίνακα 10.5 παρουσιάζεται μια λεπτομέρεια των γνωμών, όταν το σύστημα έχει φτάσει στην τελική του κατάσταση. Παρατηρούμε ότι οι τροχιές τόσο των γνωμών της πράκτορα 1 όσο και των υπολοίπων πρακτόρων κινούνται για δύο επαναλήψεις προς τα πάνω και δύο προς τα κάτω, με τη γνώμη της κεντρικής πράκτορα να κινείται σε αντίθετη κατεύθυνση από τις γνώμες των υπολοίπων πρακτόρων.

10.4. Αποτελέσματα Προσομοίωσης για $\psi=1.5$ και $\varepsilon=0.1$

Για να ολοκληρώσουμε την μελέτη του μοντέλου πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών με τοπολογία επικοινωνίας άστρο, στον πίνακα 10.6 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας $\psi=1.5$ και φράγμα εμπιστοσύνης $\varepsilon=0.1$.



Πίνακας 10.6: Γνώμη 1 και 2 με δύο διαφορετικές αρχικές τυχαίες συνθήκες, τοπολογία επικοινωνίας άστρο, $\psi=1.5$, $\varepsilon=0.1$.

Από τις 20 τυχαίες αρχικές συνθήκες για τις οποίες διεξήχθη η προσομοίωση παρουσιάζουμε δύο χαρακτηριστικές. Όλες οι υπόλοιπες ακολουθούν την ίδια δυναμική με τις δύο αρχικές συνθήκες που παρουσιάζονται στον πίνακα 10.6. Για την αρχική συνθήκη 1 που παρουσιάζεται στην πρώτη γραμμή του πίνακα 10.6 έχουμε μια κατάτμηση των δύο γνωμών και το σύστημα τερματίζει απόλυτα έπειτα από 100 επαναλήψεις. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπου το σύστημα τερματίζει ασυμπτωτικά μετά από μερικές χιλιάδες επαναλήψεις, όπως παρουσιάζεται στη δεύτερη γραμμή του πίνακα 10.6. Σε κάθε περίπτωση ο εκθέτης Lyapunov έχει μια μικρή θετική τιμή για λίγες επαναλήψεις, κατά συνέπεια το σύστημα είναι προβλέψιμο, όπως αναλύθηκε για την τοπολογία άστρο στην περίπτωση του $\psi=1$.

10.5. Συμπεράσματα

Η προβλεψιμότητα είναι ένα εντυπωσιακό αποτέλεσμα αλλά και αναμενόμενο για την τοπολογία επικοινωνίας άστρο. Όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια της διατριβής, αν όλοι οι πράκτορες επικοινωνούν μεταξύ τους (τοπολογία πλήρους γράφου), το σύστημα είναι προβλέψιμο και καταλήγει να ταλαντώνεται αέναα με περίοδο δύο. Αν οι πράκτορες επικοινωνούν μόνο τοπικά (όπως με την τοπολογία ενός κυψελοειδούς αυτομάτου), το σύστημα γίνεται χαοτικό (ντετερμινιστικό και μη προβλέψιμο). Μια απειροελάχιστη μεταβολή σε μια γωνία του κυψελοειδούς αυτομάτου, όπως για παράδειγμα στη γνώμη του πράκτορα 1, μεταφέρεται σταδιακά σε όλους τους πράκτορες, ακόμη και τους πιο απομακρυσμένους και τροποποιεί εξ ολοκλήρου τις ατομικές πορείες τους καθώς και την εξέλιξη όλων των στατιστικών δεικτών του συστήματος. Στην περίπτωση όμως της τοπολογίας άστρο, όπου μια «κεντρική» πράκτορας επικοινωνεί με όλες τις υπόλοιπες πράκτορες ενώ όλες οι υπόλοιπες επικοινωνούν μόνο με αυτήν, το σύστημα γίνεται προβλέψιμο. Αρκούν αυτές οι ελάχιστες προϋποθέσεις για να αρθεί η ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες και η μη προβλεψιμότητα. Σε ένα μη προβλέψιμο σύστημα, όπου η επικοινωνία είναι μόνο τοπική, αρκεί η ύπαρξη μιας και μόνο «κεντρικής» πράκτορας, ενός «ηγέτη», μόνο όσον αφορά όμως στην επικοινωνία, και το σύστημα γίνεται και πάλι προβλέψιμο, μολονότι στο σύστημα υπάρχει διασύνδεση όλων των υπολοίπων πρακτόρων, η πράκτορας 2 δηλαδή επικοινωνεί, επηρεάζει και επηρεάζεται από την πράκτορα 3, μόνο όμως μέσω της κεντρικής πράκτορας 1.

Όπως και σε πλείστες άλλες δραστοστρεφείς κοινωνικές προσομοιώσεις, ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα αφορά στις ιδιότητες που δεν απαιτούνται για να προκύψει το υπό μελέτη αποτέλεσμα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση για την άρση της μη προβλεψιμότητας του συστήματος δεν απαιτούνται άλλες ιδιότητες που έχει ένας ηγέτης, όπως δύναμη εξαναγκασμού, αμοιβής, ταύτισης κ.α., παρά μόνο η δυνατότητα αλληλεπίδρασης και επικοινωνίας. Η ελάχιστη αυτή προϋπόθεση είναι ικανή να άρει τη μη προβλεψιμότητα και να καταστήσει το σύστημα προβλέψιμο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ ΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MER ΕΦΑΡΜΟΖΟΝΤΑΣ

ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ

ΓΝΩΜΗ

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξετάσουμε το ρόλο της τοπολογίας της επικοινωνίας των πρακτόρων στο μοντέλο MER, εφαρμόζοντας δύο διαφορετικές τοπολογίες ταυτόχρονα, τη μία όσον αφορά την επικοινωνία των πρακτόρων και την αλληλεπίδραση για τη γνώμη 1 και την άλλη για τη γνώμη 2.

Από όλες τις δυνατές τοπολογίες θα μελετήσουμε μόνο τις πιο αντιπροσωπευτικές, την τοπολογία του πλήρους γράφου, την τοπολογία των κυψελοειδών αυτομάτων ως αντιπροσωπευτική των τοπολογιών που εισάγουν την τοπικότητα και μία τοπολογία με κεντρικό πράκτορα, την τοπολογία άστρο. Οι τρεις αυτές τοπολογίες αν διασταυρωθούν μεταξύ τους, μας δίνουν 9 περιπτώσεις (βλέπε πίνακα 11.1).

Γνώμη 2 Γνώμη 1	Τοπολογία Πλήρους Γράφου	Τοπολογία Αστρο	Τοπολογία Κυψελοειδούς Αυτομάτου
Τοπολογία Πλήρους Γράφου	Έχει εξεταστεί	Θα εξεταστεί στο παρόν κεφάλαιο	Θα εξεταστεί στο παρόν κεφάλαιο
Τοπολογία Αστρο		Έχει εξεταστεί	Θα εξεταστεί στο παρόν κεφάλαιο
Τοπολογία Κυψελοειδούς Αυτομάτου			Έχει εξεταστεί

Πίνακας 11.1: Διασταύρωση των 3 τοπολογιών επικοινωνίας για τις γνώμες 1 και 2. Οι περιπτώσεις που βρίσκονται κάτω από τη διαγώνιο του πίνακα αντιστοιχούν σε αυτές που βρίσκονται πάνω από αυτή, και τα αποτελέσματα των αντίστοιχων προσομοιώσεων δεν παρουσιάζουν καμία διαφορά.

Οι περιπτώσεις που βρίσκονται στη διαγώνιο του πίνακα αφορούν τις προσομοιώσεις όπου η τοπολογία της επικοινωνίας είναι η ίδια και για τις δύο γνώμες και έχει εξεταστεί στα προηγούμενα κεφάλαια της διατριβής. Από τις υπόλοιπες περιπτώσεις θα εξετάσουμε στο παρόν κεφάλαιο αυτές που βρίσκονται πάνω από τη διαγώνιο του πίνακα, μιας και όσες είναι κάτω από αυτή ουσιαστικά δε διαφέρουν από τις προηγούμενες, αφού προφανώς ο πίνακας είναι συμμετρικός ως προς την κύρια διαγώνιο. Αυτό συμβαίνει διότι δεν έχει εισαχθεί κάποια διαφοροποίηση για τις γνώμες 1 και 2. Το ποια από τις δύο γνώμες ονομάζεται γνώμη 1 είναι τυχαίο. Είναι προφανές λοιπόν ότι αν στη γνώμη 1 εφαρμόσουμε την τοπολογία του πλήρους γράφου και στη γνώμη 2 του κυψελοειδούς αυτομάτου, θα λάβουμε τα ίδια αποτελέσματα αν εφαρμόσουμε τις δύο τοπολογίες αντίστροφα, την καθεμία δηλαδή στην αντίθετη γνώμη.

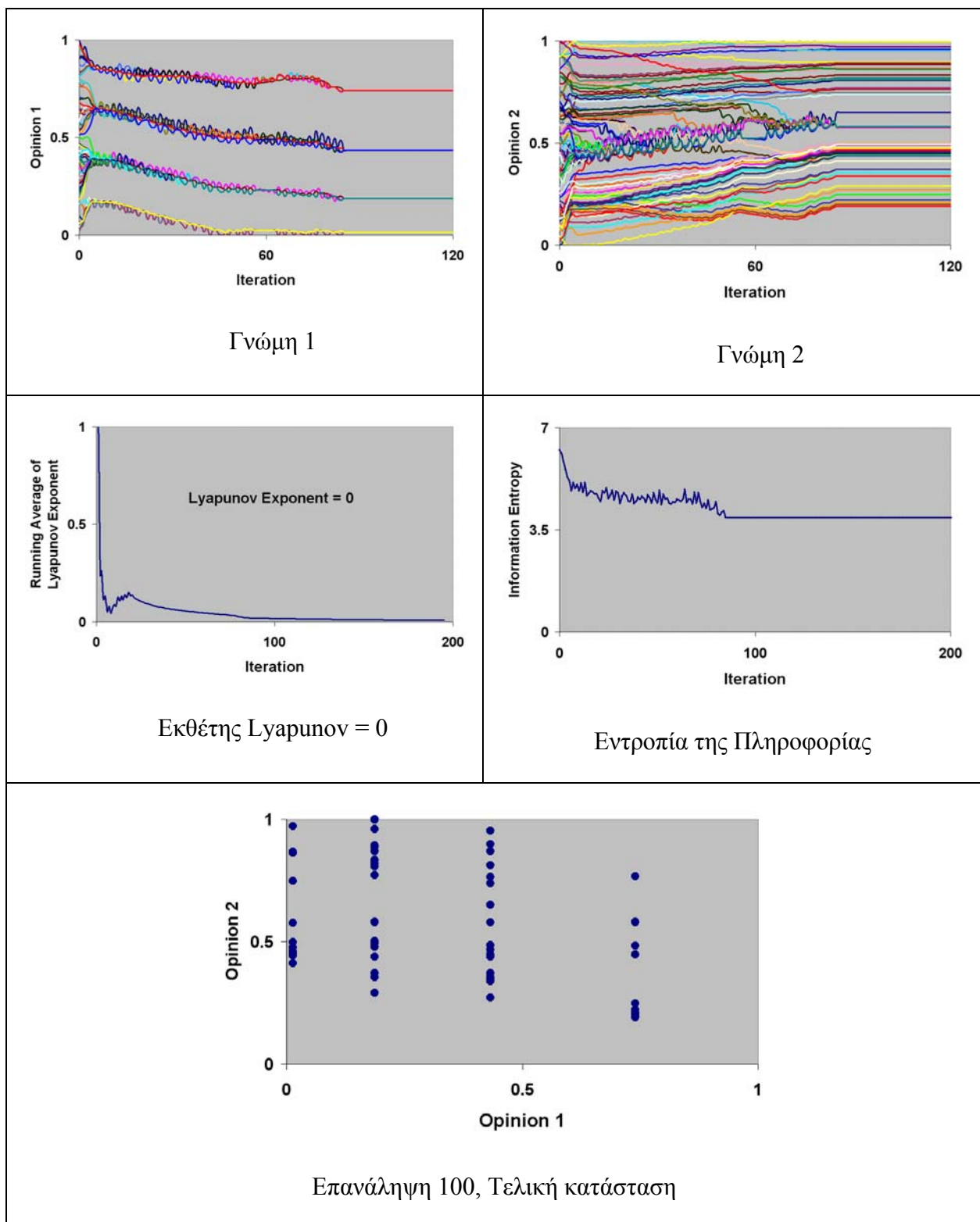
Οι παραπάνω περιπτώσεις τοπολογιών που θα εξεταστούν είναι αντιπροσωπευτικές για την πλήρη επικοινωνία, την επικοινωνία μόνο σε τοπικό και περιορισμένο επίπεδο καθώς και την επικοινωνία με ένα πράκτορα κεντρικό που

επικοινωνεί και αλληλεπιδρά με όλους τους υπολοίπους, ενώ αυτοί επικοινωνούν τοπικά και μόνο με τον κεντρικό. Εκτός από τις προαναφερθείσες τοπολογίες, τα αποτελέσματα των οποίων θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, έχουν μελετηθεί και κάποιες ακόμη, χωρίς όμως να υπάρξει διαφοροποίηση στα αποτελέσματα. Για την πλήρη επικοινωνία υπάρχει προφανώς μόνο μια τοπολογία, αυτή του πλήρους γράφου. Η τοπολογία άστρο είναι και αυτή μοναδική. Υπάρχουν όμως πολλές τοπολογίες που εισάγουν την τοπικότητα στην επικοινωνία, εκτός από αυτή των κυψελοειδών αυτομάτων. Για τη συγκεκριμένη διερεύνηση έχουμε εφαρμόσει επίσης την τοπολογία της ευθείας γραμμής και μια τοπολογία ενός τυχαίου γράφου, οι οποίες μας έδωσαν ποιοτικά τα ίδια και ποσοτικά σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με την τοπολογία των κυψελοειδών αυτομάτων. Για το λόγο αυτό η παρουσίαση περιορίζεται στα αποτελέσματα που αφορούν την τοπολογία των κυψελοειδών αυτομάτων, μιας και αυτά είναι αντιπροσωπευτικά των υπολοίπων τοπολογιών που περιορίζουν την επικοινωνία και αλληλεπίδραση στο τοπικό επίπεδο.

11.1. Τοπολογία Επικοινωνίας Πλήρους Γράφου για τη Γνώμη 1 και «Άστρο», και Κυψελοειδούς Αυτομάτου για τη Γνώμη 2

Πρώτα εξετάζουμε πως η τοπολογία του πλήρους γράφου αλληλεπιδρά με τις υπόλοιπες τοπολογίες. Υποθέτουμε ότι όσον αφορά τη γνώμη 1, οι πράκτορες επικοινωνούν πλήρως χρησιμοποιώντας την τοπολογία του πλήρους γράφου ενώ για τη γνώμη 2 επικοινωνούν σύμφωνα με την τοπολογία του άστρο, όπου ο πράκτορας 1 βρίσκεται στην κεντρική θέση.

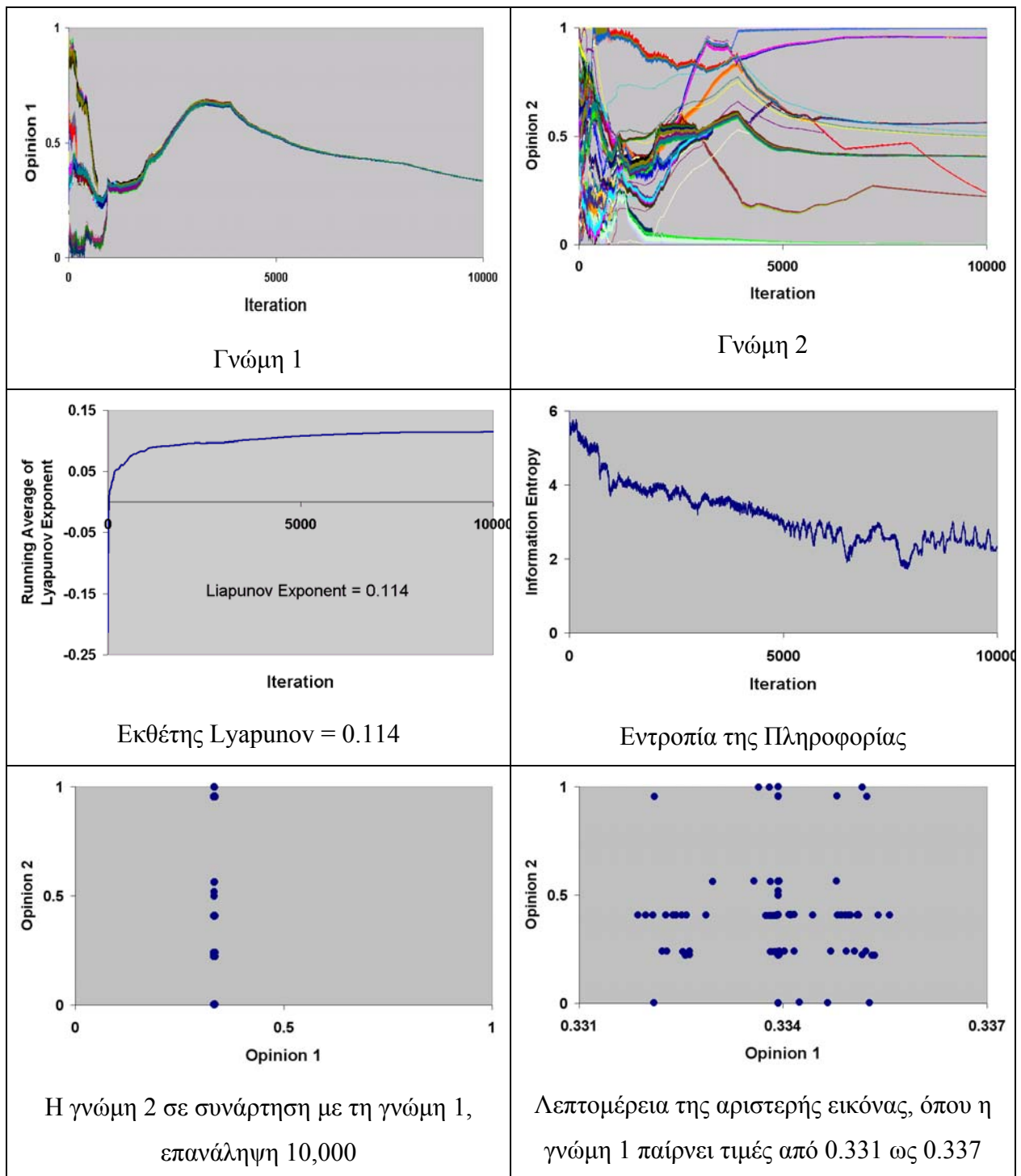
Μπορούμε να φανταστούμε κάποιες περιπτώσεις που παρατηρούμε μια τέτοιου είδους επικοινωνία. Υπάρχει ένας «ηγέτης» στην επικοινωνία, μόνο όσον αφορά όμως τη μία γνώμη, στην άλλη γνώμη όλοι επικοινωνούν μεταξύ τους και αλληλοεπηρεάζονται. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα 11.2.



Πίνακας 11.2: Επικοινωνία των πρακτόρων με την τοπολογία του πλήρους γράφου για την γνώμη 1 και την τοπολογία άστρο για τη γνώμη 2, όπου $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$.

Όσον αφορά στη γνώμη 1, όλοι οι πράκτορες γνωρίζουν τη γνώμη 1 όλων των υπολοίπων και αλληλεπιδρούν. Στη γνώμη αυτή έχουμε το σχηματισμό 4 ομάδων (όσον αφορά μόνο στη γνώμη 1), ενώ για τη γνώμη 2 το αποτέλεσμα είναι κατακερματισμός, με μόνο ένα μικρό μέρος του πληθυσμού των πρακτόρων να αλληλεπιδρά, ενώ η γνώμη 2 των υπολοίπων πρακτόρων κινείται αργά προς τα πάνω ή προς τα κάτω, έως ότου το σύστημα τερματίσει σε μια σταθερή τελική κατάσταση. Το σύστημα είναι προβλέψιμο και καταλήγει σε μια σταθερή τελική κατάσταση ισορροπίας, η οποία είναι διαφορετική από τα αποτελέσματα που μας έδωσαν και οι δύο τοπολογίες όταν καθεμιά εφαρμόστηκε αποκλειστικά και για τις δύο γνώμες. Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο 7 είδαμε ότι με την τοπολογία του πλήρους γράφου είχαμε ως τελική κατάσταση την περιοδικότητα, ενώ στο κεφάλαιο 9, για την τοπολογία επικοινωνίας άστρο το σχηματισμό ενός μικρού αριθμού ομάδων. Το αποτέλεσμα είναι διαφορετικό όταν οι δύο αυτές τοπολογίες επικοινωνίας συνδυάζονται. Η μόνη ιδιότητα που παραμένει αναλλοίωτη είναι αυτή της δυνατότητας πρόβλεψης σε όλες τις περιπτώσεις.

Στον πίνακα 11.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το συνδυασμό της τοπολογίας του πλήρους γράφου για τη γνώμη 1 με την τοπολογία των κυψελοειδών αυτομάτων για τη γνώμη 2.



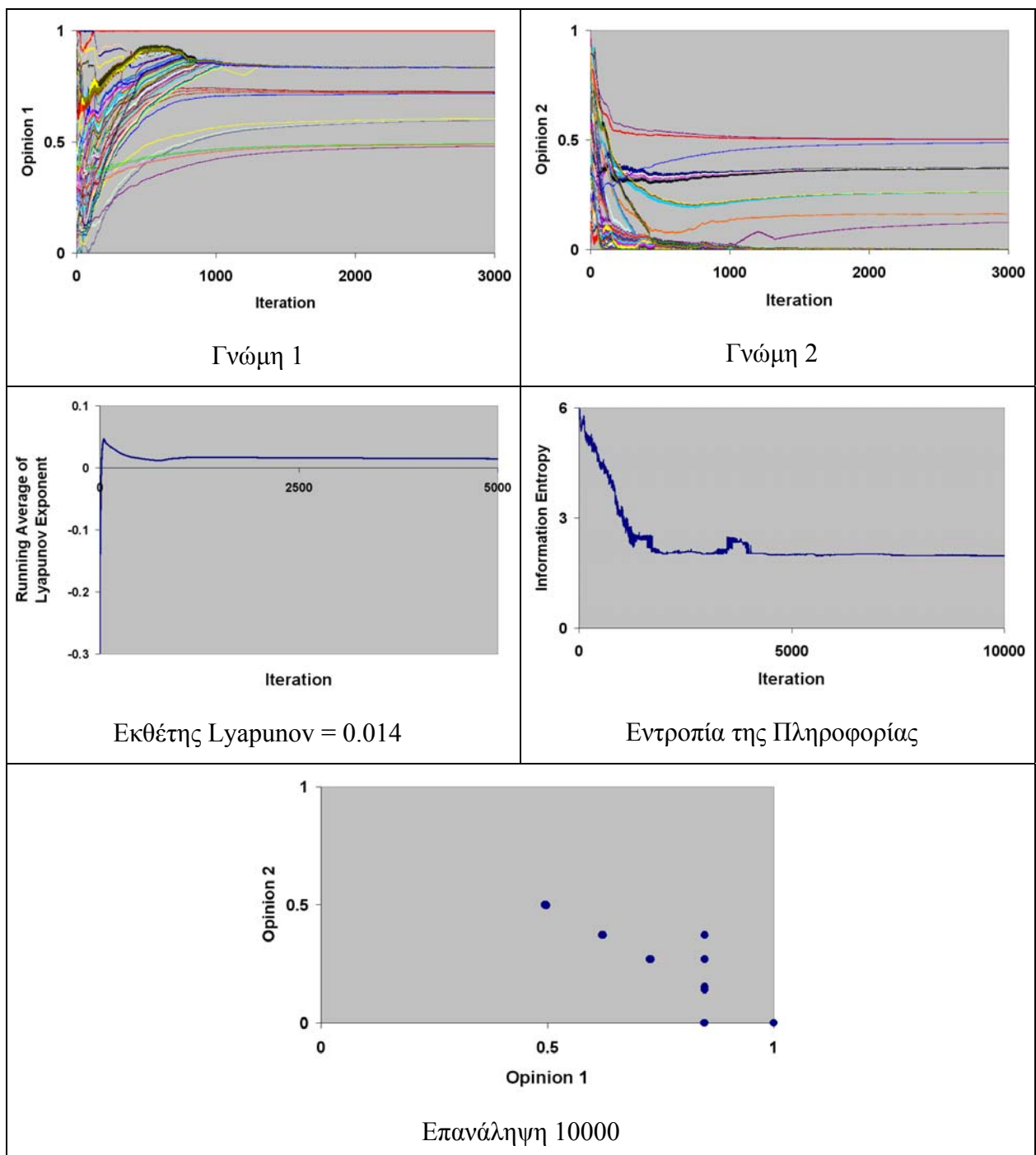
Πίνακας 11.3: Επικοινωνία των πρακτόρων με την *τοπολογία του πλήρους γράφου* για την γνώμη 1 και την *τοπολογία κυψελοειδούς αυτομάτου* για τη γνώμη 2 για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$.

Παρατηρούμε ότι όσον αφορά στη γνώμη 1 έχουμε το σχηματισμό μιας και μοναδικής ομάδας, όπως τουλάχιστον φαίνεται στο μάκρο επίπεδο, η οποία όμως δεν

τερματίζει σε μια τελική κατάσταση αλλά να κινείται με χαοτικό τρόπο στο διηνεκές. Η εξέλιξη των γνώμων 2 είναι χαοτική, όπως όταν εφαρμόζεται η τοπολογία των κυψελοειδών αυτομάτων και στις δύο γνώμες (βλέπε κεφάλαιο 8 της διατριβής). Παρατηρούμε ότι η τοπικότητα στην επικοινωνία προκαλεί την αδυναμία πρόβλεψης και τη χαοτική εξέλιξη, ακόμη και όταν εφαρμοστεί μόνο στη μια από τις δύο γνώμες. Ο εκθέτης Lyapunov είναι θετικός και η εντροπία της πληροφορίας εξελίσσεται επίσης με χαοτικό τρόπο (δεύτερη γραμμή του πίνακα 11.3), καθότι το σύστημα οργανώνεται και αποδιοργανώνεται συνεχώς, δίχως να κατασταλάξει σε μια τελική κατάσταση. Η συμφωνία των πρακτόρων ως προς τη γνώμη 1 είναι φαινομενική. Αν εστιάσουμε σε μια πιο λεπτομερή κλίμακα, όπως στην αριστερή στήλη της τρίτης γραμμής του πίνακα 11.3, όπου παρουσιάζεται η γνώμη 2 σε συνάρτηση με τη γνώμη 1 όλων των πρακτόρων, θα παρατηρήσουμε ότι η γνώμη 1 των πρακτόρων στο μικρό επίπεδο διαφέρουν και δεν ταυτίζονται, όπως φαίνεται στο μάκρο επίπεδο, κατά συνέπεια το σύστημα διατηρεί τη χαοτική δυναμική του αναλλοίωτη και ως προς τις δύο γνώμες, ακόμη και σε αυτή που υπάρχει πλήρης επικοινωνία και φαινομενικά οι πράκτορες έχουν συμφωνήσει. Η τοπικότητα στην επικοινωνία «επιβάλλεται» στην πλήρη επικοινωνία προκαλώντας την ύπαρξη της ιδιότητας της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες.

11.2. Τοπολογία Επικοινωνίας «Άστρο» για τη Γνώμη 1 και Κυψελοειδούς Αυτομάτου για τη Γνώμη 2

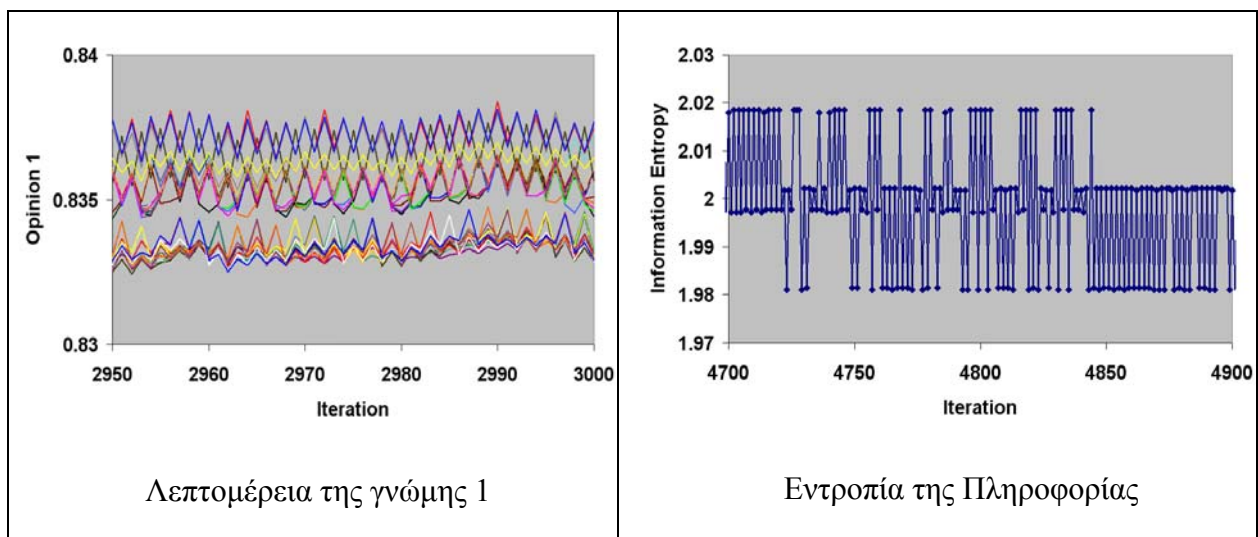
Η διερεύνηση συνεχίζεται με τον τελευταίο συνδυασμό που απομένει να μελετηθεί, δηλαδή την επικοινωνία μέσω ενός κεντρικού πράκτορα για τη γνώμη 1 σε συνδυασμό με την επικοινωνία που περιορίζεται στο τοπικό επίπεδο για τη γνώμη 2. Στον πίνακα 11.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το μοντέλο MER όπου για τη γνώμη 1 εφαρμόζεται η τοπολογία άστρο ενώ για τη γνώμη 2 η τοπολογία των κυψελοειδών αυτομάτων.



Πίνακας 11.4: Επικοινωνία των πρακτόρων με την *τοπολογία άστρο* για την γνώμη 1 και την *τοπολογία κυψελοειδούς αυτομάτου* για τη γνώμη 2, όπου $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$.

Στην πρώτη γραμμή του πίνακα 11.4 παρατηρούμε ότι η εξέλιξη των δύο γνωμών των πρακτόρων ακολουθεί παρόμοια πορεία. Οι πράκτορες σχηματίζουν 4

ομάδες ως προς τη γνώμη 1 και 5 ομάδες ως προς τη γνώμη 2, συνολικά 7 ομάδες²⁸ ως προς τις δύο γνώμες (τρίτη γραμμή του πίνακα 11.4), οι οποίες φαίνεται να σταθεροποιούνται μετά τις 1500 επαναλήψεις. Εκ πρώτης όψεως το σύστημα φαίνεται να τερματίζει σε μια σταθερή τελική κατάσταση και να είναι προβλέψιμο, δηλαδή να υπερσχύει η επίδραση της επικοινωνίας μέσω του κεντρικού πράκτορα και όχι η τοπικότητα. Στη δεξιά στήλη της δεύτερης γραμμής του πίνακα 11.4 φαίνεται να σταθεροποιείται επίσης η εντροπία της πληροφορίας. Ο εκθέτης Lyapunov όμως συγκλίνει στον αριθμό 0.014 (αριστερή στήλη της δεύτερης γραμμής του πίνακα 11.4), άρα είναι θετικός. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα είναι χαοτικό, έστω κι αν το χάος που παρουσιάζει είναι ασθενέστερο, μιας και η τιμή του εκθέτη είναι μικρή και άρα ο χρονικός ορίζοντας προβλεψιμότητας είναι αρκετά μεγαλύτερος από αυτόν των χαοτικών συστημάτων του μοντέλου που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 8. Στον επόμενο πίνακα 11.5 παρουσιάζεται μια λεπτομέρεια της εξέλιξης της γνώμης 1 καθώς και μια λεπτομέρεια της εξέλιξης της εντροπίας της πληροφορίας.



Πίνακας 11.5: Λεπτομέρεια της εξέλιξης της γνώμης 1 και της εντροπίας της πληροφορίας για τοπολογία επικοινωνίας *άστρο* για την γνώμη 1 και *κυψελοειδούς αυτομάτου* για τη γνώμη 2 και τιμές των παραμέτρων $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$.

Η ατομικές τροχιές των πρακτόρων ακολουθούν μια χαοτική πορεία και σε καμιά περίπτωση δεν ταυτίζονται. Συνιστούν μια ομάδα στο μακρο επίπεδο, ταυτόχρονα όμως στο μικρο επίπεδο διατηρούν την ατομικότητά τους. Η εντροπία της πληροφορίας επίσης συνεχίζει να ταλαντώνεται απ' άπειρον στο μικρο επίπεδο, χωρίς όμως

²⁸ Το περιεχόμενο του όρου ομάδα, όπως χρησιμοποιείται στο μοντέλο MER καθώς και οι αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων που ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες έχει αναλυθεί στα κεφάλαια 6 και 8.

σημαντικές αυξομειώσεις στο μακρό επίπεδο. Κατά συνέπεια η τοπικότητα στην επικοινωνία «επιβάλλεται» στην επικοινωνία μέσω κεντρικού πράκτορα μιας και έχει ως αποτέλεσμα τη μη προβλεψιμότητα του συστήματος. Άρα στην περίπτωση της ύπαρξης των δύο γνώμων, όπως προϋποθέτει το μοντέλο MER, η ύπαρξη κεντρικού ως προς την επικοινωνία πράκτορα, που αφορά μόνο τη μια γνώμη, έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή μόνο αύξηση του χρονικού ορίζοντα προβλεψιμότητας, δηλαδή μια μικρή εξασθένιση του χάους. Μια ακόμη διαφοροποίηση είναι ότι στο μακρό επίπεδο οι γνώμες έχουν σταθεροποιηθεί πρακτικά, μιας και οι τροχιές είναι σχεδόν ευθείες και η κίνηση των ατομικών τροχιών αφορά μόνο το μικρό επίπεδο. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του παρόντος κεφαλαίου καθώς και των προηγούμενων συνοψίζονται στον πίνακα 11.6.

Γνώμη 2 Γνώμη 1	Τοπολογία Πλήρους Γράφου	Τοπολογία Αστρο	Τοπολογία Κυψελοειδούς Αυτομάτου
Τοπολογία Πλήρους Γράφου	Προβλεψιμότητα, περιοδική τελική κατάσταση	Προβλεψιμότητα	Μη προβλεψιμότητα, χάος
Τοπολογία Αστρο		Προβλεψιμότητα	Μη προβλεψιμότητα, χάος
Τοπολογία Κυψελοειδούς Αυτομάτου			Μη προβλεψιμότητα, χάος

Πίνακας 11.6: Διασταύρωση των τριών τοπολογιών επικοινωνίας για τις γνώμες 1 και 2 για το μοντέλο MER, για $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$ και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όσον αφορά στη δυνατότητα ή αδυναμία πρόβλεψης σε κάθε περίπτωση. (Υπενθυμίζουμε ότι ο πίνακας είναι συμμετρικός ως προς την κύρια διαγώνιο).

Παρατηρούμε ότι η τοπολογία του κυψελοειδούς αυτομάτου, η οποία εισάγει την τοπικότητα στη δυνατότητα επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης επιβάλλεται στις άλλες τοπολογίες και σε κάθε περίπτωση μετατρέπει το σύστημα σε χαοτικό. Το αυτό

ισχύει και για τις υπόλοιπες τοπολογίες επικοινωνίας, όταν αυτές περιορίζουν τις αλληλεπιδράσεις στο τοπικό επίπεδο. Οι προσομοιώσεις του παρόντος κεφαλαίου υπογραμμίζουν την ισχύ της επίδρασης της τοπικότητας στην επικοινωνία και περιορίζουν περεταίρω τις ελάχιστες προϋποθέσεις για τις οποίες η τεχνητή κοινωνία γίνεται μη προβλέψιμη. Ο περιορισμός της επικοινωνίας σε τοπικό επίπεδο μετατρέπει την κοινωνία σε μη προβλέψιμη, ακόμη κι αν η τοπικότητα περιορίζεται μόνο σε μια γνώμη, από το σύνολο των γνωμών που τίθενται υπό διαπραγμάτευση. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποτελούν ένδειξη ότι η μη προβλεψιμότητα των ανθρώπινων κοινωνιών δεν είναι απαραίτητο να αποδοθεί στην πολυπλοκότητά τους ή στην αδυναμία πρόβλεψης του κάθε ατόμου. Η τεχνητή κοινωνία του μοντέλου MER αποτελείται από απλά και προβλέψιμα άτομα και οι κανόνες αλλαγής και αλληλεπίδρασης είναι πλήρως ντετερμινιστικοί και προκαθορισμένοι. Οι κανόνες αυτοί εξαιρετικά απλά λένε ότι τα άτομα προσπαθούν να ισορροπήσουν κοινωνικά με τα υπόλοιπα αλλά και ατομικά με τον εαυτό τους. Όταν η τάση για ατομική ισορροπία εξισωθεί με την κοινωνική και από τη δομή των διαφόρων γνωμών που τίθενται υπό διαπραγμάτευση υπάρχει μια που η αλληλεπίδραση περιορίζεται σε τοπικό επίπεδο, τότε η εξέλιξη των γνωμών των ατόμων είναι χαοτική και κατά συνέπεια μη προβλέψιμη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12

Η ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΣΤΙΣ ΚΟΙΝΩΝΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ Η
ΧΑΟΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΩΝ ΙΣΟΡΡΟΠΙΩΝ-
ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

I am not a soldier in an agent-based methodological crusade.

Joshua Epstein (1999).

12.1. Η Πρόβλεψη στις Κοινωνικές Επιστήμες

Η ικανότητα να προβλέπουμε μελλοντικά γεγονότα και να αντιδρούμε ανάλογα είναι μια σημαντική ικανότητα για την ίδια την επιβίωση των ανθρώπων. Σε πολλές καταστάσεις της ζωής των ανθρώπων, όπως π.χ. στις κοινωνικές αλληλεπιδράσεις, η προσδοκία της δικής μας συμπεριφοράς καθώς και των άλλων είναι ζωτικής σημασίας. Σύμφωνα με τα στατιστικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των ψυχολογικών δεδομένων, όπως για παράδειγμα η πολλαπλή παλινδρόμηση, η πρόβλεψη είναι δυνατή, υπό την προϋπόθεση να προσδιοριστούν οι κατάλληλοι παράγοντες. Ακολουθώντας αυτή τη συλλογιστική, το μέγεθος του λάθους της πραγματοποιηθείσας πρόβλεψης εξαρτάται από την ακρίβεια μέτρησης των παραγόντων και της συμπεριφοράς τους. Συνεπώς η ικανότητά μας να προβλέπουμε μελλοντικά γεγονότα εξαρτάται από το λάθος που υπεισέρχεται σε οποιαδήποτε μέτρηση πραγματοποιήσουμε.

Οι κοινωνικές επιστήμες θεωρούνταν από πολλούς ως επιστήμες που έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιούν προβλέψεις. Αυτό ήταν ένα θεμελιώδες συστατικό από τη σύστασή τους ως επιστήμες, σε αντίθεση με τη μυθολογία, τη θρησκεία και τη μεταφυσική. Σύμφωνα με τον Wright Mills (1970), η πρόβλεψη είχε μια διαπρεπή θέση στις κοινωνικές επιστήμες τουλάχιστον ως τη δεκαετία του 1950 και ο σκοπός των κοινωνικών επιστημών ήταν η πρόβλεψη και ο έλεγχος της ανθρώπινης συμπεριφοράς. Αυτή η θετικιστική άποψη των κοινωνικών επιστημών χαρακτηρίζεται πλέον μάλλον «αφελής», καθώς όλοι γνωρίζουν ότι υπάρχουν προφανή προβλήματα σχετικά με την δυνατότητα πρόβλεψης.

Η συζήτηση για την πρόβλεψη όμως στις κοινωνικές επιστήμες βασίζεται στο πως γίνεται αντιληπτή η «χρησιμότητά» τους στην κοινωνία: αν δεν μπορούν να πραγματοποιούν προβλέψεις τότε ποια είναι η χρησιμότητά τους; Για παράδειγμα η «κοινή γνώμη» ώθησε πολλούς κοινωνικούς επιστήμονες να τη χαρακτηρίσουν ως μια έννοια άχρηστη, λόγω της αστάθειας που παρουσιάζει καθώς και την αδυναμία πρόβλεψής της. Σύμφωνα με τον Converse (1975) η κοινή γνώμη είναι αψηλάφητη, άμορφη και ευμετάβλητη. Αντιθέτως, αν οι κοινωνικές επιστήμες μπορούν να προσφέρουν έγκυρες προβλέψεις, μπορούν να γίνουν χρήσιμες τόσο για τα μεμονωμένα άτομα όσο και για τις κοινωνίες. Ας μην ξεχνούμε ότι στις δεκαετίες του 1950 και του 1960, η ψυχολογία, όπως και οι άλλες κοινωνικές επιστήμες, γίνονταν αντιληπτές ως να είναι σε θέση να πραγματοποιούν «μαγικά». Πιστευόταν ότι όχι μόνο ερμήνευαν την

ανθρώπινη συμπεριφορά αλλά επιπλέον την πρόβλεπαν καθώς και την ήλεγχαν, ακόμα και το ασυνείδητο. Για παράδειγμα οι διαφημίσεις, που είχαν τη δυνατότητα να επιδράσουν στο υποσυνείδητο, αναγνωρίστηκαν ως απειλή για το βαλάντιο του απλού ανθρώπου και θεσπίστηκε αυστηρή σχετική νομοθεσία. Και πάλι όμως η προοπτική ότι μπορεί κάποιος να επηρεάσει το υποσυνείδητο ενός άλλου ατόμου, έτσι ώστε να κάνει πράγματα χωρίς ο ίδιος να το γνωρίζει, προκαλούσε τρόμο.

Κατά συνέπεια, αυτό που απαιτείται συχνά, είναι μια θετικιστική αντίληψη των κοινωνικών επιστημών (Katerelos, 2007). Υπονοείται όμως η υπόθεση ότι η «επιστημονική» γνώση των κοινωνικών συνθηκών μπορεί να συμβάλλει θετικά έχοντας ως στόχο να βοηθηθεί η κοινωνική εξέλιξη, είναι συνεπώς μια αντίληψη για τις κοινωνικές επιστήμες που συμπεριλαμβάνει μια ιδιαίτερη σχέση ανάμεσα στην απόκτηση της γνώσης και τον τρόπο χρήσης αυτής της γνώσης. Κατά συνέπεια, στη διάσημη άποψη του Comte ότι «η γνώση μας δίνει την πρόβλεψη και η πρόβλεψη μας δίνει τον έλεγχο»²⁹ μπορεί να αντιπαραθέσει κανείς ότι τα πορίσματα των κοινωνικών επιστημών αποτελούν στην καλύτερη περίπτωση «πολιτικά» επιχειρήματα. Έτσι, όπως απορρέει από μια τέτοια άποψη, το κυριότερο καθήκον των κοινωνικών επιστημών είναι να «ανακαλύψουν» τη γνώση, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια από τους πολιτικούς, έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες επεμβάσεις. Μπορεί να δειχθεί όμως, εξετάζοντας την φύση της αιτιώδους σχέσης μεταξύ εξήγησης και πρόβλεψης, ότι οι κοινωνικές επιστήμες και η πολιτική δεν είναι απλά ή τυχαία αλληλοεξαρτώμενες. Σύμφωνα με το Fay (1975), η αιτιώδης εξήγηση υπονοεί και συνεπάγεται την δυνατότητα πρόβλεψης και κατ' επέκταση την επιθυμία για έλεγχο, επειδή οι δύο αυτές έννοιες συνδέονται σε μια «δομική ταυτότητα» (structural identity). Για τον Mills (1970), η αποδοχή της πρόβλεψης ως κεντρικό στοιχείο των κοινωνικών επιστημών συμπίπτει με ένα αντιδημοκρατικό-γραφειοκρατικό ήθος. Στις περισσότερες περιπτώσεις η επιστημονική καινοτομία ακρωτηριάζεται σε μια σύγχρονη «κλίνη του Προκρούστη», όπου μια μεγάλη ενοποιημένη θεωρία, με τη δυνατότητα πραγματοποίησης προβλέψεων, θα μπορούσε να προσδώσει ιδεολογική νομιμότητα σε πολιτικές επιλογές, ενώ ο εμπειρισμός, με τη σειρά του, παρέχει την τεχνογνωσία του κοινωνικού ελέγχου. Ακόμα όμως κι αν αναγνωριστούν τα όρια της πρόβλεψης και εγκαταλειφθεί η ιδέα της μεγάλης θεωρίας, αυτό δε σημαίνει ότι δε μπορούν να επιχειρηθούν καθόλου προβλέψεις.

²⁹ *Savoir est prévoir, prévoir est pouvoir.*

Μολονότι δε θα έπρεπε η αντίληψή μας για την πρόβλεψη να περιορίζεται σε μια μικρή μερίδα επιστημόνων, σύμφωνα με τον Giddens (1993), οι «ορθόδοξοι» κοινωνικοί επιστήμονες πιστεύουν σε ένα υπεραπλουστευτικό μοντέλο της κοινωνικής επιστήμης, στο οποίο παράγονται σημαντικότερα λαμπρές εμβασύνσεις στο άτομο και στην κοινωνία και κατά συνέπεια αφήνουν κατάπληκτους όλους τους μη ειδικούς «κοινούς θνητούς».

Ο θετικισμός (positivism) αναμφίβολα έχει ασκήσει τεράστια επίδραση πάνω στον τρόπο με τον οποίο η κοινωνιολογία κατανοεί τα κοινωνικά φαινόμενα. Οι κοινωνικές επιστήμες φαίνεται να έχουν όμως και κάποιους περιορισμούς στη δυνατότητα συσσώρευσης της γνώσης, με την παραδοσιακή έννοια. Οι τρόποι ανθρώπινης επαφής και αλληλεπίδρασης υπόκεινται σε συνεχή μεταβολή με το πέρασμα του χρόνου. Τα κοινωνικά συστήματα είναι πολύπλοκα και όχι τόσο σταθερά, όσο προϋποθέτουν τα γραμμικά στατιστικά μοντέλα.

Η φιλοσοφία των κοινωνικών επιστημών συχνά ως τώρα συνέδεε λανθασμένα τη δυνατότητα εξήγησης και τη δυνατότητα πρόβλεψης, υποθέτοντας ότι το κριτήριο για την εγκυρότητα μιας θεωρίας είναι η επιτυχής πραγματοποίηση προβλέψεων (Gilbert, 1995). Δυστυχώς η υπόθεση αυτή είναι ακατάλληλη για τις μη γραμμικές θεωρίες. Τις τελευταίες δεκαετίες, από την ανάπτυξη της επιστήμης των δυναμικών συστημάτων και του χάους, προέκυψε ένα πολύ ενδιαφέρον πόρισμα για τις κοινωνικές επιστήμες, όσον αφορά στο ζήτημα της σχέσης της ελεύθερης βούλησης και της αιτιοκρατίας. Η κλασική συζήτηση υπέθετε, ανακριβώς, ότι εάν ήμαστε σε θέση να κατανοήσουμε την ανθρώπινη δράση, θα είμαστε σε θέση να την προβλέψουμε, και άρα δε μένει κανένα περιθώριο για την ελεύθερη βούληση (Gilbert, 1995). *Η θεωρία της πολυπλοκότητας υποδεικνύει ότι ακόμα κι αν καταστούμε ικανοί να κατανοήσουμε πλήρως όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την κοινωνική και την ατομική δράση, ίσως και τότε αυτό να μην ήταν αρκετό για να προβλέψουμε την ομαδική και την κοινωνική συμπεριφορά* (Casti, 1994).

Όσον αφορά στις προσομοιώσεις, όπως και άλλες διαδικασίες, μπορούν να ενσωματωθούν σε οποιαδήποτε επιστημολογική προοπτική (Halfpenny, 1997). Παράγουν επίσης τεράστιο αριθμό δεδομένων. Παρά την καθαρότητα και την ευκρίνεια των δεδομένων αυτών, η ανάλυσή τους θέτει πραγματικά μεγάλες προκλήσεις (Axelrod, 1997a). Στα πλαίσια του νέου διεπιστημονικού πεδίου της πολυπλοκότητας αναπτύσσεται θεωρία και συγκεντρώνονται δεδομένα από μη γραμμικά συστήματα. Τα μη γραμμικά συστήματα είναι εξαιρετικά δύσκολο να μελετηθούν διότι τα περισσότερα δεν έχουν λύσεις που να μπορούν να γραφούν αναλυτικά, δηλαδή είναι αδύνατο να

βρεθούν εξισώσεις που να περιγράφουν τη λύση και κατά συνέπεια να προβλέπουν και να προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Το γεγονός αυτό έχει θεωρητικές συνέπειες που αφορούν στην αιτιώδη εξήγηση (causal explanation) στις κοινωνικές επιστήμες. Η συμβατική φιλοσοφία των κοινωνικών επιστημών έχει συχνά συνδέσει την εξήγηση ενός κοινωνικού φαινομένου με τη δυνατότητα πρόβλεψης της εξέλιξής του στο χρόνο (Aldridge 1999, Fiske & Sweder 1986, Gergen 1973). Μια θεωρητική συνέπεια της σύνδεσης αυτής είναι ότι οι κοινωνικοί επιστήμονες τείνουν να συμπεράνουν ότι η εγκυρότητα μιας θεωρίας επικυρώνεται ή απορρίπτεται ανάλογα με τη δυνατότητα πρόβλεψης που η τελευταία διαθέτει.

Πριν την ανάπτυξη της επιστήμης των δυναμικών συστημάτων και του χάους, όταν οι επιστήμονες έρχονταν αντιμέτωποι με πολύπλοκη, ακανόνιστη ή τυρβώδη συμπεριφορά, όπως τα καιρικά φαινόμενα ή κάποιοι οικονομικοί δείκτες, υπέθεταν ότι οι αιτίες που κρύβονται πίσω από αυτά τα φαινόμενα ήταν κι αυτές πολύπλοκες. Τώρα έχει γίνει πλέον κατανοητό ότι εξαιρετικά σύνθετη συμπεριφορά μπορεί να παραχθεί από πολύ απλούς κανόνες (May, 1976). Τα πορίσματα της επιστήμης των μη γραμμικών συστημάτων και του χάους υποδεικνύουν στην σύγχρονη κοινωνιοψυχολογική έρευνα την αναζήτηση απλών εξηγήσεων για τα πολύπλοκα κοινωνικά φαινόμενα ή ακόμη ότι αυτή η πολυπλοκότητα μπορεί να είναι το αποτέλεσμα μη γραμμικών σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών.

Βέβαια, οι κοινωνιολόγοι και οι κοινωνικοί ψυχολόγοι που ασχολούνται με τις δραστοστρεφείς κοινωνικές προσομοιώσεις δεν προσπαθούν να εφαρμόσουν τη θεωρία του χάους στα κοινωνικά προβλήματα. Είναι μάλλον απίθανο ότι μια τέτοια προσπάθεια θα πετύχαινε (Gilbert & Troitzsch, 2005/1999). Για οποιονδήποτε ερευνητή, ακόμη και τον μαθηματικό, τα μη γραμμικά συστήματα αποτελούν ένα εφιάλτη, επειδή τα περισσότερα δεν επιδέχονται αναλυτική λύση. *Ο μόνος γενικά αποτελεσματικός τρόπος διερεύνησης της μη γραμμικής συμπεριφοράς των συστημάτων αυτών είναι η απομίμησή τους με την κατασκευή ενός μοντέλου και η διεξαγωγή μιας προσομοίωσης του φαινομένου. Ακόμα όμως και να κατανοηθούν πλήρως τα μη γραμμικά αυτά μοντέλα παραμένουν απρόβλεπτα.*

Η σχέση ντετερμινισμού και προβλεψιμότητας απασχολεί έντονα όχι μόνο το μελετητή των θετικών επιστημών αλλά και αυτόν των κοινωνικών. Θα ήταν ευχής έργο να υπάρξει προθυμία για την αξιοποίηση των προσφάτων σχετικών επιτευγμάτων από το χώρο της επιστήμης των δυναμικών συστημάτων και του χάους, σε συνδυασμό με αυξημένη ανοχή για τις όποιες δυσκολίες ενδεχομένως παρουσιάζει η κατανόησή τους.

Στα δραστοστρεφή μοντέλα οι αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις μετατρέπουν το σύστημα σε μη γραμμικό. Όπως αναλύθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, τα μη γραμμικά μοντέλα γενικά δεν υπόκεινται στα παραγωγικά εργαλεία των επίσημων μαθηματικών.

Κάθε απρόοπτο συμβάν μείζονος σημασίας, όπως είναι οι σεισμοί και άλλες θεομηνίες, τα τεχνικά ατυχήματα ή μια ξαφνική οικονομική κρίση, θέτει αναγκαστικά τον ερευνητή του συγκεκριμένου χώρου προ των ευθυνών του. «Θα μπορούσαμε να το έχουμε προβλέψει;» αναρωτήθηκαν τον Δεκέμβριο του 1990 οι εκπρόσωποι των κοινωνικών επιστημών στη συνάντηση του τμήματος φιλοσοφίας του πανεπιστημίου Lóránd Eötvös στη Βουδαπέστη (Φωκάς,³⁰ 1996), βλέποντας την ταχύτατη κατάρρευση των καθεστώτων του κρατικού σοσιαλισμού στο χώρο της Ανατολικής Ευρώπης. Εντύπωση προκάλεσε η απάντηση ενός ειδικού επιστήμονα (Laszlo Szamuely) όταν είπε ότι «από τρέχουσα ιστορική σκοπιά γνωρίζαμε, τουλάχιστον εμείς οι οικονομολόγοι, ότι το σύστημα αυτό στην Ανατολική Ευρώπη από οικονομικής πλευράς δεν είναι βιώσιμο, έχει χρεοκοπήσει. Σπεύδω όμως να προσθέσω: προσωπικά ήμουν κάτι παραπάνω από βέβαιος ότι δε θα προφτάσω να το δω να καταρρέει.» Το ερώτημα είναι *αν και κατά πόσον η ίδια η φύση των εξεταζόμενων προβλημάτων επιτρέπει την ορθή πρόβλεψη*. Από τι εξαρτάται τελικά το ότι ορισμένα φαινόμενα και διεργασίες είναι πανεύκολο να προβλεφθούν, ενώ άλλες, παρ' όλες τις επίμονες προσπάθειες, παραμένουν μη προβλέψιμες; (Φωκάς, 1996)

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1970 έγινε κοινή συνείδηση στις θετικές επιστήμες ότι στη φύση, αλλά και στην κοινωνία, όπως ισχυρίζεται το μοντέλο MER, αφθονούν οι περιπτώσεις συστημάτων που έχουν μεν χαρακτήρα ντετερμινιστικό, αλλά η συμπεριφορά τους δεν μπορεί να προβλεφτεί. Μετεωρολόγοι, βιολόγοι, αστρονόμοι, χημικοί, ερευνητές των διαφόρων τομέων της φυσικής και των μαθηματικών έχουν συμβάλλει στην περιγραφή του πολυσύνθετου φαινομένου που στις ημέρες μας καθιερώθηκε να λέγεται περιληπτικά ντετερμινιστικό χάος, όρος που υπογραμμίζει το παράδοξο της ανακάλυψης, ότι δηλαδή *ο ντετερμινισμός είναι κάθε άλλο παρά ταυτόσημος με την προβλεψιμότητα*.

³⁰ Ο Νικόλαος Φωκάς είναι μαθηματικός-κοινωνιολόγος στο Ινστιτούτο Κοινωνιολογίας του Πανεπιστημίου Lóránd Eötvös της Βουδαπέστης.

12.2. Σύνοψη των Αποτελεσμάτων της Διατριβής

Το τελευταίο αυτό συμπέρασμα επιχειρεί να καταδείξει το Μοντέλο Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών, διερευνώντας παράλληλα και τις προϋποθέσεις για τις οποίες μια ντετερμινιστική τεχνητή κοινωνία μπορεί να είναι *θεμελιωδώς* μη προβλέψιμη. Το μοντέλο υποθέτει την ύπαρξη ενός αριθμού πρακτόρων, ο καθένας από τους οποίους έχει δύο γνώμες που αφορούν το ίδιο κοινωνικό αντικείμενο και επιπλέον μια δομή, σύμφωνα με την οποία η μια γνώμη είναι αντίθετη από την άλλη. Ανάμεσα στους πράκτορες λαμβάνει χώρα μια διαδικασία μετασχηματισμού των γνώμών τους. *Η βασική υπόθεση του μοντέλου είναι ότι κάθε πράκτορας τείνει να διατηρήσει μια ισορροπία με το κοινωνικό του περιβάλλον καθώς επίσης και να διατηρήσει την εσωτερική του ισορροπία.* Βασίζεται σε δυο αρχές που έχουν επικυρωθεί από την εμπειρική κοινωνιοψυχολογική έρευνα και που και οι δύο τείνουν στην επίτευξη ενός σημείου ισορροπίας, είτε ατομικής είτε κοινωνικής. Όσον αφορά την κοινωνική ισορροπία, κάθε πράκτορας υιοθετεί τον μέσο όρο των γνώμών των γειτονικών του πρακτόρων, όσων βρίσκονται μέσα στο όριο εμπιστοσύνης, το μέγεθος του οποίου προσδιορίζει το φράγμα εμπιστοσύνης ϵ . Κάθε πράκτορας όμως προσπαθεί να ισορροπήσει και ατομικά, κι έτσι, σύμφωνα με τη δομή των δύο γνώμών οι οποίες θεωρούνται αντίθετες, αν και οι δύο αυξηθούν προς την ίδια κατεύθυνση, τότε ο πράκτορας αντιστρέφει τη γνώμη με τη μικρότερη μεταβολή και τη διορθώνει, πολλαπλασιάζοντας με τον συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ .

Όταν κάθε πράκτορας έχει τη δυνατότητα να αλληλεπιδράσει με οποιονδήποτε άλλον, δηλαδή η *τοπολογία επικοινωνίας είναι αυτή του πλήρους γράφου*, και οι δύο τάσεις προς ατομική και κοινωνική ισορροπία είναι ίσου μεγέθους (για συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας $\psi=1$) το σύστημα καταλήγει σε μια περιοδική κίνηση, φαινόμενο που πρώτη φορά εμφανίζεται σε δραστοστρεφές μοντέλο στην ελληνική και στην ξενόγλωσση βιβλιογραφία. Όταν λοιπόν οι δύο τάσεις προς κοινωνική και ατομική ισορροπία του ατόμου είναι το ίδιο ισχυρές, το σύστημα καταλήγει να είναι περιοδικό! Κάθε πράκτορας ταλαντώνεται σε μια περιοδική κίνηση για να ταιριάζει τις δύο ασύμφωνες γνώμες 1 και 2 και το σύστημα δεν ισορροπεί παρά μόνο όταν επιτευχθεί πλήρης ταλάντωση για όλους τους πράκτορες. Οι πράκτορες λοιπόν υιοθετούν την πιο «στατική» μορφή κίνησης, αποφεύγοντας μια «ακίνητη», παγιωμένη κατάσταση, καταλήγοντας σε μια επίσης ατελείωτη αλλά αρμονική κίνηση. Στην περίπτωση αυτή οι πράκτορες δεν είναι στατικοί, πράγμα αδύνατο στη εμπειρική πραγματικότητα, αλλά δεν

είναι και απρόβλεπτοι: αυτή είναι μια μέση κατάσταση ανάμεσα στην τάξη (που παράγεται από την ακινησία της τελικής κατάστασης) και την αταξία, την πλήρη δηλαδή έλλειψη περιοδικότητας. Η περιοδική αυτή κίνηση συνιστά μια δυναμική ισορροπία του συστήματος που κινείται, έχοντας όμως ισορροπήσει απόλυτα, κάτι μάλλον απίθανο όσον αφορά την κοινωνική πραγματικότητα.

Για $\psi=0.5$ και την τοπολογία επικοινωνίας του πλήρους γράφου, η δυναμική του μοντέλου MER είναι παρόμοια με το μοντέλο περιορισμένης εμπιστοσύνης. Στην περίπτωση αυτή η τάση προς ατομική ισορροπία είναι πολύ μικρή, η τάση προς κοινωνική ισορροπία κυριαρχεί και οι πράκτορες γρήγορα σχηματίζουν ομάδες και ισορροπούν σε μια τελική, σταθερή και προβλέψιμη κατάσταση. Αντίθετα, για $\psi=1.5$, η ισχυρή τάση για ατομική ισορροπία κάνει το σύστημα ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες και κατά συνέπεια μη προβλέψιμο, παρότι αυτό επίσης τερματίζει σε μια σταθερή τελική κατάσταση. Η ιδιότητα της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες σημαίνει ότι και η παραμικρή παρέκκλιση από τις αρχικές συνθήκες αυξάνεται εκθετικά και κατά συνέπεια, μετά από έναν ικανό αριθμό επαναλήψεων, το σύστημα ακολουθεί μια εντελώς διαφορετική πορεία από την προηγούμενη. Το σύστημα επιδεικνύει *εφήμερο χάος* και οποιουδήποτε είδους μαθηματική ή στατιστική ανάλυση δεν είναι σε θέση να προβλέψει την τελική του κατάσταση.

Στη συνέχεια διερευνήθηκε η περίπτωση όπου η επικοινωνία και οι αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων λαμβάνουν χώρα μόνο σε τοπικό επίπεδο. Για την τοπολογία επικοινωνίας κυψελοειδούς αυτομάτου και για τιμές των παραμέτρων που εξισώνουν, ως προς το μέγεθός τους, τις δύο τάσεις προς ισορροπία ($\psi=1$), το σύστημα παρουσιάζει ντετερμινιστικό χάος. Μια απειροελάχιστη μεταβολή στη γνώμη ενός πράκτορα που βρίσκεται σε μια γωνία του κυψελοειδούς αυτομάτου μεταφέρεται σταδιακά σε όλους τους πράκτορες, ακόμη και τους πιο απομακρυσμένους, και τροποποιεί εξ ολοκλήρου τις ατομικές πορείες τους καθώς και την εξέλιξη όλων των στατιστικών δεικτών του συστήματος. Έτσι το σύστημα όχι μόνο δεν κατασταλάζει σε μια τελική σταθερή κατάσταση και βρίσκεται σε αέναη κίνηση αλλά επιπλέον διαθέτει την ιδιότητα της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες, είναι δηλαδή θεμελιωδώς μη προβλέψιμο. *Η ιδιότητα της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες είναι ένα χαρακτηριστικό του συστήματος και όχι αποτέλεσμα του εργαλείου μέτρησης.*

Κατά συνέπεια η τάση για ισορροπία προς δύο κατευθύνσεις, ατομική και κοινωνική και η δυνατότητα επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης μόνο σε τοπικό επίπεδο,

κάνει αδύνατη την μακροπρόθεσμη πρόβλεψη της εξέλιξης των γνώμων οποιουδήποτε μεμονωμένου πράκτορα αλλά και ολόκληρου του συστήματος. Για αυτές τις τιμές των παραμέτρων και τη συγκεκριμένη τοπολογία επικοινωνίας, φωτογραφικές στατιστικές μετρήσεις των γνώμων των πρακτόρων μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι άνευ νοήματος, καθώς δεν μπορούν να συλλάβουν τη δυναμική του συστήματος. Ο χαοτικός χαρακτήρας του συστήματος μπορεί να μετρηθεί με τον υπολογισμό του εκθέτη Lyapunov, ο οποίος για τις τιμές των παραμέτρων $\psi=1$ και $\varepsilon=0.1$ και την τοπολογία επικοινωνίας του κυψελοειδούς αυτομάτου είναι ίσος με 0.126. Αυτό σημαίνει ότι οποιοδήποτε απειροελάχιστο λάθος στις αρχικές συνθήκες θα αυξηθεί κατά $e^{0.126}=1.13$ φορές σε κάθε επανάληψη. Για τις προηγούμενες τιμές των παραμέτρων και τις ίδιες συνθήκες ο χαρακτηριστικός χρόνος του συστήματος, δηλαδή ο χρόνος που οποιοδήποτε λάθος δεκαπλασιάζεται σε μέγεθος, ισούται με 18 επαναλήψεις. Αυτός είναι και ο ορίζοντας προβλεψιμότητας του συστήματος. Αν δηλαδή έχουμε μια μέτρηση των γνώμων των πρακτόρων μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, μπορούμε, αφού διεξάγουμε την προσομοίωση, να προβλέψουμε τη γνώμη τους έπειτα από 18 επαναλήψεις, γνωρίζοντας όμως ότι οποιοδήποτε λάθος στην μέτρηση των αρχικών συνθηκών θα έχει γίνει «μόνο» 10 φορές μεγαλύτερο. Αυτό σημαίνει ότι είναι μεν αδύνατο να πραγματοποιηθούν μακροπρόθεσμες προβλέψεις, υπάρχει όμως η δυνατότητα για βραχυπρόθεσμες, μη ακριβείς προβλέψεις, μέσα σε ένα χρονικό ορίζοντα προβλεψιμότητας, όπου το μέγεθος του λάθους είναι ελεγχόμενο και δεν ξεπερνά κάποια συγκεκριμένη τιμή.

Με τον υπολογισμό του ορίζοντα προβλεψιμότητας, δηλαδή του χαρακτηριστικού χρόνου του συστήματος, είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί μια βραχυπρόθεσμη, μη ακριβής πρόβλεψη της μελλοντικής εξέλιξης του συστήματος, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον κοινωνικό επιστήμονα για την εξαγωγή συμπερασμάτων, με την καταφυγή σε πιθανοκρατική πρόβλεψη. Με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για το μοντέλο πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών υπογραμμίζεται η ανάγκη να εστιάσει η κοινωνιοψυχολογική έρευνα περισσότερο στη μελέτη και διερεύνηση της κοινωνικής δυναμικής παρά της στατικής αποτύπωσης των κοινωνικών φαινομένων (Katerelos & Koulouris, 2004b).

Οι προηγούμενες προσομοιώσεις δείχνουν ότι η κοινωνική πρακτική (social action) που θεωρητικά αναζητεί την συνδυασμένη ατομική και κοινωνική ισορροπία, μπορεί να «γεννήσει» ένα σύστημα μη προβλέψιμο, ακόμα κι αν το σύστημα αυτό είναι

ντετερμινιστικό. Η τάση προς την ισορροπία αποτελεί ένα κίνητρο, είτε είναι κοινωνική, είτε ατομική: όλοι οι πράκτορες αναζητούν μία κατάσταση ισορροπίας, παρόλα αυτά το σύστημά τους μπορεί να είναι μη προβλέψιμο, δηλαδή *η αναζήτηση ισορροπίας μπορεί να προκαλέσει το χάος (τη μη προβλεψιμότητα)*. Όλα μοιάζουν να διακυβεύονται «στην κόψη» του ατομικού και του κοινωνικού. Κάθε κίνηση των πρακτόρων προς την επίτευξη κοινωνικής ισορροπίας αποσταθεροποιεί την εσωτερική τους ισορροπία και κάθε φορά που οι πράκτορες τείνουν να ισορροπήσουν ατομικά διαταράσσουν την κοινωνική ισορροπία. Παρότι το σύστημα δεν έχει κανένα στοχαστικό³¹ στοιχείο στον αλγόριθμό του και οι τροχιές των γνωμών των πρακτόρων είναι ντετερμινιστικά προκαθορισμένες από τις αρχικές συνθήκες και τους κανόνες αλληλεπίδρασης, είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί μακροπρόθεσμη πρόβλεψη.

Η εισαγωγή των τοπολογιών που περιορίζουν την επικοινωνία και τις αλληλεπιδράσεις μόνο στο τοπικό επίπεδο έχει λοιπόν καθοριστική επίδραση σε μια σειρά ιδιοτήτων του μοντέλου, με σημαντικότερη τη δυνατότητα πρόβλεψης. Οι τοπολογίες αυτές μετατρέπουν τη συμπεριφορά του συστήματος με έναν αξιοσημείωτο τρόπο: από την περιοδικότητα το μοντέλο οδηγείται στο «καθαρό» χάος. Οι επιβληθείσες τοπολογίες φαίνεται να δημιουργούν μικρο-επικοινωνιακές ανωμαλίες στον κοινωνικό ιστό του μάκρο-κόσμου των πρακτόρων, οι οποίες αρχικά οδηγούν στο σχηματισμό ομάδων και στη συνέχεια στη χαοτική εξέλιξη των τροχιών των ατόμων αλλά και των ομάδων.

Μετά την εξέταση της πιο χαρακτηριστικής μάκρο τοπολογίας του πλήρους γράφου και κάποιων τοπολογιών που εισάγουν την τοπικότητα στην επικοινωνία, η διερεύνηση του μοντέλου πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών συνεχίστηκε με τη διερεύνηση της τοπολογίας «άστρο», μιας τοπολογίας που επιτρέπει την καθολική επικοινωνία για ένα πράκτορα και περιορίζει τους υπόλοιπους σε τοπική επικοινωνία μόνο με τον κεντρικό πράκτορα. Στην περίπτωση αυτή το σύστημα γίνεται προβλέψιμο. Αρκούν λοιπόν οι ελάχιστες αυτές προϋποθέσεις για να αρθεί η ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες και η μη προβλεψιμότητα. Σε ένα μη προβλέψιμο σύστημα, όπου η επικοινωνία είναι μόνο τοπική, αρκεί η ύπαρξη ενός «κεντρικού» πράκτορα, ενός «ηγέτη», μόνο όσον αφορά την επικοινωνία, και το σύστημα γίνεται και πάλι προβλέψιμο. Στο σύστημα υπάρχει βέβαια μια διασύνδεση και των υπολοίπων πρακτόρων, ο πράκτορας 2 για παράδειγμα, επικοινωνεί, επηρεάζει και επηρεάζεται από

³¹ Βασισμένο στην τυχαιότητα.

τον πράκτορα 3, μόνο όμως μέσω του κεντρικού πράκτορα 1 (βλέπε σχήμα 10.1). Αξιοσημείωτο είναι ότι δεν απαιτούνται άλλες ιδιότητες που έχει ένας ηγέτης όπως δύναμη εξαναγκασμού, αμοιβής, ταύτισης κ.α., παρά μόνο η δυνατότητα αλληλεπίδρασης και επικοινωνίας. Η ελάχιστη αυτή προϋπόθεση είναι ικανή να άρει τη μη προβλεψιμότητα και να καταστήσει το σύστημα προβλέψιμο.

Στη συνέχεια εξετάστηκε ο ρόλος της τοπολογίας της επικοινωνίας των πρακτόρων στο μοντέλο MER, εφαρμόζοντας δύο διαφορετικές τοπολογίες ταυτόχρονα, τη μία όσον αφορά την επικοινωνία των πρακτόρων και τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης για τη γνώμη 1 και την άλλη για τη γνώμη 2. Σε όλες τις περιπτώσεις η τοπολογία του κυψελοειδούς αυτομάτου, «επιβάλλεται» στις άλλες τοπολογίες και μετατρέπει το σύστημα σε χαοτικό. Το αυτό ισχύει και για τις υπόλοιπες τοπολογίες επικοινωνίας, όταν αυτές περιορίζουν τις αλληλεπιδράσεις στο τοπικό επίπεδο. Οι προσομοιώσεις αυτές υπογραμμίζουν την ισχύ της επίδρασης της τοπικότητας στην επικοινωνία. Ο περιορισμός της επικοινωνίας σε τοπικό επίπεδο μετατρέπει την κοινωνία σε μη προβλέψιμη, ακόμη κι αν η τοπικότητα στην επικοινωνία περιορίζεται μόνο στη μια γνώμη, από το σύνολο των γνώμων που τίθενται υπό διαπραγμάτευση. Οι προσομοιώσεις αυτές περιορίζουν περεταίρω τις ελάχιστες προϋποθέσεις για τις οποίες το σύστημα είναι χαοτικό.

Η διεξαγωγή των προσομοιώσεων καταδεικνύει ότι η μάκρο ιδιότητα της επικοινωνίας μεταξύ των πρακτόρων, η οποία προκαθορίζεται από τον κατασκευαστή του μοντέλου, είναι επαρκές αίτιο που επιδρά και τροποποιεί τους μηχανισμούς που δρουν στο μικρό επίπεδο και είναι υπεύθυνοι για την ανάδυση των μάκρο-κοινωνικών φαινομένων. Τα άτομα της τεχνητής αυτής κοινωνίας αυτοοργανώνονται σε ομάδες που αναδύονται στο μάκρο επίπεδο από τις τοπικές αλληλεπιδράσεις των μεμονωμένων πρακτόρων, αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα αποκλειστικά σε τοπικό επίπεδο. Αν επιπροσθέτως υποτεθεί ότι η τοπολογία επικοινωνίας είναι διαφορετική για κάθε γνώμη, τότε υπερισχύει καθαρά η γνώμη για την οποία η επικοινωνία περιορίζεται στο τοπικό επίπεδο, «επιβάλλοντας» την αδυναμία πρόβλεψης στο σύστημα και τη χαοτική εξέλιξή του.

Οι πράκτορες του μοντέλου έχουν περιορισμένες γνωστικές δυνατότητες και είναι εξαιρετικά απλοί, διαθέτουν όμως σχεδόν³² απεριόριστες υπολογιστικές δυνατότητες. Κανένα άτομο δεν έχει συνολική άποψη της κοινωνίας και δεν

³² Ανάλογα με τις δυνατότητες του υπολογιστή που διεξάγεται η προσομοίωση.

αντιλαμβάνεται, ούτε επηρεάζεται από τις αναδυόμενες ιδιότητες του μακρο επιπέδου. Δε γνωρίζει τον αριθμό των ομάδων που έχουν σχηματιστεί, ούτε πόσες είναι κοντά ή μακριά από τη δική του ομάδα. Η αδυναμία πρόβλεψης προκαλείται όχι από την πολυπλοκότητα των ατόμων/πρακτόρων αλλά από την ίσου μεγέθους τάση προς ατομική και κοινωνική ισορροπία και τον περιορισμό των αλληλεπιδράσεων στο τοπικό επίπεδο. *Ακόμα λοιπόν και αν το άτομο είναι πλήρως γνωστό, όπως και όλοι οι «νόμοι» της κοινωνίας και η ακρίβεια μέτρησης είναι οσοδήποτε μεγάλη επιθυμούμε, ο κοινωνικός επιστήμονας αδυνατεί να πραγματοποιήσει μακροπρόθεσμες προβλέψεις, ακόμα κι αν διεξάγει προσομοίωση με τεράστιες υπολογιστικές δυνατότητες.* Μοναδική του δυνατότητα θα ήταν η διεξαγωγή βραχυπρόθεσμων προβλέψεων, μέσα στα όρια ενός χρονικού ορίζοντα προβλεψιμότητας. Το μοντέλο MER προσφέρει επίσης τις ελάχιστες προϋποθέσεις για να μετατραπεί το σύστημα σε προβλέψιμο. Αρκεί η επιβολή πλήρους επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης για όλα τα άτομα ή πλήρους επικοινωνίας για ένα κεντρικό πράκτορα και περιορισμός της επικοινωνίας των υπολοίπων μόνο με τον κεντρικό.

Οι υποθέσεις αυτές του μοντέλου στο μικρο επίπεδο, για όλες σχεδόν τις τιμές των παραμέτρων ψ και ε και τις τοπολογίες επικοινωνίας, έχουν ως συνέπεια, στο μακρο επίπεδο, το σχηματισμό ομάδων πρακτόρων, παράγουν δηλαδή ένα κοινωνικό φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί σε όλες τις κοινωνίες αλλά και έχει παραχθεί και από τα υπόλοιπα δραστοστρεφή μοντέλα δυναμικής εξέλιξης των γνωμών. Οι τροχιές των γνωμών των πρακτόρων φαίνεται να κινούνται αργά προς τα πάνω ή προς τα κάτω, με έναν ακανόνιστο τρόπο. Περιστασιακά δύο ομάδες τροχιών ενώνονται σε μία ή μια ομάδα διαχωρίζεται σε δύο. Άλλες φορές η τροχιά κάποιου πράκτορα εγκαταλείπει μια ομάδα τροχιών για να προσαρτηθεί σε κάποια άλλη. Κάθε πράκτορας επίσης, εκτός από τους πράκτορες της δικής του ομάδας, με τους οποίους διαθέτει παρόμοια γνώμη 1 και 2, αλληλεπιδρά ως προς κάποια μόνο από τις δύο γνώμες με πράκτορες και των άλλων ομάδων. Είναι αξιοσημείωτο ότι **στο μοντέλο MER δεν υπάρχει ομάδα ή πράκτορας απομονωμένη από τις άλλες**. Το φαινόμενο αυτό διαφέρει ουσιαστικά από αυτό του μοντέλου πολιτισμικής διασποράς του Robert Axelrod, από το δυναμικό μοντέλο της θεωρίας της κοινωνικής απήχησης των Nowak και Latané αλλά και τα υπόλοιπα δραστοστρεφή μοντέλα δυναμικής εξέλιξης των γνωμών. Σε όλα τα μοντέλα, εκτός του MER, οι ομάδες διαχωρίζονται πλήρως μεταξύ τους και σταματά οποιαδήποτε επικοινωνία και αλληλεπίδραση, έχουμε δηλαδή το σχηματισμό ξεχωριστών κόσμων

γνωμών (opinion world) (Hegselmann & Krause 2002), φαινόμενο που αντίστοιχό του δεν παρατηρείται ποτέ σε μια «πραγματική» κοινωνία. *Το μοντέλο MER είναι το μοναδικό στη βιβλιογραφία που υπάρχει συνεχής αλληλεπίδραση των ομάδων των πρακτόρων* και δε σχηματίζονται σύνολα (ομάδες) πρακτόρων που σταματούν κάθε αλληλεπίδραση με όλους τους υπόλοιπους πράκτορες.

Από το σύνολο των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων για το μοντέλο MER προκύπτει μια σειρά ερωτημάτων (Katerelos, 2007). Ένα πρώτο ερώτημα που θα μπορούσε να τεθεί είναι ποια νέα γνώση προσφέρει η διερεύνηση του μοντέλου πολλαπλών κανονιστικών ισορροπιών. Η μη προβλεψιμότητα, η αστάθεια, η αβεβαιότητα κ.λπ. είναι κοινές έννοιες που γνωρίζει ο καθένας. Είναι επίσης φυσικό να θεωρείται ως καλύτερη η θεωρία που πραγματοποιεί τις περισσότερες και ισχυρότερες προβλέψεις. Το μοντέλο MER υποδεικνύει ότι οποιοδήποτε κοινωνικό σύστημα είναι *εγγενώς χαοτικό και απρόβλεπτο*. Καμία "κρυμμένη τάξη", κανένας "καθολικός νόμος" που να αναμένει να ανακαλυφθεί, κανένα μεγάλο σχέδιο, οσοδήποτε μεγάλη υπολογιστική δύναμη ή ακρίβεια μέτρησης δεν είναι ικανά να εφοδιάσουν τον επιστήμονα με τη δυνατότητα πραγματοποίησης μακροπρόθεσμων προβλέψεων. Ακόμα κι αν ο θετικιστής κοινωνικός επιστήμονας καταφέρει να φτάσει σε ένα σημείο συνολικής γνώσης της κοινωνίας, το μοντέλο MER ισχυρίζεται ότι δε θα είναι σε θέση να πραγματοποιεί προβλέψεις! Μια τεχνητή κοινωνία δεν μπορεί να ελεγχθεί και να προβλεφθεί η εξέλιξή της, ούτε καν κι από τον ίδιο το δημιουργό της (Katerelos, 2007).

Ένα δεύτερο ερώτημα αφορά το ρόλο της αιτιότητας για τις κοινωνικές επιστήμες; Το μοντέλο MER ισχυρίζεται ότι η αιτιότητα είναι παρούσα, μιας και είναι απολύτως ντετερμινιστικό, δίχως να υποκρύπτεται οποιαδήποτε στοχαστική³³ διαδικασία. Παρά το γεγονός αυτό όμως, δεν υπάρχει αποδεδειγμένα η δυνατότητα πρόβλεψης. Η αιτιότητα είναι καταδικασμένη σε έναν *a posteriori* ρόλο. Κατόπιν οποιουδήποτε γεγονότος υπάρχει η δυνατότητα να δοθούν πολλαπλές εξηγήσεις, όχι όμως *a priori*: αυτό είναι ένα εύρημα του μοντέλου και δεν αποτελεί αξίωμα.

Είναι εφικτή η δυνατότητα πρόβλεψης; Η απάντηση δυστυχώς είναι αρνητική. Ο ορίζοντας προβλεψιμότητας είναι το όριο σε οποιαδήποτε προσπάθεια! Ένας κόσμος με άπειρο ορίζοντα προβλεψιμότητας θα ήταν σίγουρα ένας βαρετός, μάταιος κόσμος. Αντίθετα ένας κόσμος με πολύ σύντομο ορίζοντα προβλεψιμότητας θα

³³ τυχαία

ήταν εξαιρετικά ασταθής. Και οι δύο περιπτώσεις απορρίπτονται μάλλον από την κοινωνική εμπειρία.

Ποια είναι η σχέση του μικρο με το μακρο επίπεδο ή διαφορετικά η σχέση ατόμου και κοινωνίας; Ακόμα κι αν οι πράκτορες φαίνονται να σχηματίζουν ομάδες και "να πηγαίνουν μαζί" για χιλιάδες επαναλήψεις, ένα κοντινότερο «πλάνο» αποκαλύπτει ότι κανένας πράκτορας δεν έχει την ίδια τροχιά με οποιονδήποτε άλλο! Η μοναδικότητα του πράκτορα-ατόμου φαίνεται να δίνει την απάντηση γεφυρώνοντας την κοινωνία (την ομάδα) και το άτομο (πρόσωπο). Κατά συνέπεια, η κοινωνικότητα δεν υπερισχύει της ατομικότητας ούτε αντίστροφα η ατομικότητα της κοινωνικότητας.

Σύμφωνα με το μοντέλο MER ο όρος δυναμικός είναι παρών σε όλες τις κλίμακες της (αναπαριστώμενης) κοινωνικής πραγματικότητας: το σύστημά απεικονίζει μια συνεχώς μεταβαλλόμενη τεχνητή κοινωνία, όπου οι πράκτορες και οι ομάδες των πρακτόρων αλληλεπιδρούν και στα δύο επίπεδα (μικρο-μάκρο). Είναι εμφανές ότι η δυναμική του πράκτορα δημιουργεί τη δυναμική ομάδας αλλά συγχρόνως και η δυναμική της ομάδας κινεί τη δυναμική του πράκτορα, υπάρχει μια αδιάσπαστη ενότητα του ατομικού και του κοινωνικού. Εξαρτάται από την οπτική γωνία του παρατηρητή, αν επικεντρώνει στο ατομικό ή στο κοινωνικό επίπεδο, στο μικρο ή στο μακρο.

Μια ακόμη εύλογη ερώτηση θα μπορούσε να είναι γιατί αυτό το μοντέλο να αφορά την κοινωνική ψυχολογία. Είναι γνωστό ότι η ιδιαιτερότητα του «βλέμματός» της κοινωνικής ψυχολογίας βρίσκεται στο γεγονός ότι θεωρεί πως σε κάθε φαινόμενο που εστιάζει το ενδιαφέρον της συνυπάρχουν και διαρθρώνονται μεταξύ τους ψυχικοί και κοινωνικοί παράγοντες (Παπαστάμου, 1999/1990). Υπενθυμίζουμε ότι και το μοντέλο MER διερευνά ένα κοινωνικό φαινόμενο, την εξέλιξη των γνώμων των ατόμων μιας κοινωνίας, υποθέτοντας ότι στο μηχανισμό μεταβολής της γνώμης των ατόμων εμπλέκονται οι δύο τάσεις για κοινωνική και ατομική ισορροπία.

12.3. Μελλοντικοί Ερευνητικοί Προσανατολισμοί

Η μελέτη αυτή θα κλείσει με μια σύντομη αναφορά στους μελλοντικούς ερευνητικούς προσανατολισμούς, που αφορούν στο Μοντέλο Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών.

Ένα πρώτο σημαντικό θέμα που χρήζει διερεύνησης αποτελεί η μελέτη του ρόλου της ακρίβειας στους πραγματοποιούμενους αριθμητικούς υπολογισμούς κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου, δηλαδή το πλήθος των δεκαδικών ψηφίων που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν τις γνώμες των πρακτόρων. Όπως αναλύθηκε και στο κεφάλαιο 5, το πλήθος των δεκαδικών ψηφίων που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των αρχικών γνώμων των πρακτόρων έχει διαπιστωθεί ότι δεν έχει καμιά επίδραση στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή είναι ακριβώς ίδια αν για τις αρχικές γνώμες των πρακτόρων χρησιμοποιηθούν τυχαίοι αριθμοί με 1, 2, 100 ή και 1000 δεκαδικά ψηφία. Αυτό ισχύει όμως μόνο για τις αρχικές γνώμες, μιας και ο αριθμός των δεκαδικών ψηφίων που χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή των πράξεων κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου, έχει επίδραση στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αφού, σύμφωνα με τον αλγόριθμο του μοντέλου, διενεργούνται όλων των ειδών οι αριθμητικές πράξεις, ακόμη και διαιρέσεις. Στο πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε κατά την παραγωγή των αποτελεσμάτων της παρούσας διατριβής, η ακρίβεια των διενεργούμενων πράξεων έφτανε μέχρι το εικοστό όγδοο δεκαδικό ψηφίο, άρα κάθε γνώμη που προκύπτει σε οποιαδήποτε επανάληψη μετά την αρχική φτάνει σε ακρίβεια τα 28 δεκαδικά ψηφία. Αν επιλέξουμε διαφορετική ακρίβεια, π.χ. 100 ή 200 δεκαδικά ψηφία, αυτό έχει κάποια μικρή επίδραση στα αποτελέσματα, κυρίως όμως ποσοτική και όχι ποιοτική. Αν όμως η ακρίβεια των υπολογισμών ισούται με 1, 2, 3 ή 4 δεκαδικά ψηφία, τα αποτελέσματα είναι αρκετά διαφορετικά. Αξιοσημείωτο είναι ότι το χάος εμφανίζεται μετά την ύπαρξη του τέταρτου δεκαδικού ψηφίου. Η συγκεκριμένη διερεύνηση του ρόλου της ακρίβειας στη διεξαγωγή των υπολογισμών υπερβαίνει τα όρια της παρούσας διατριβής και μάλιστα αποτελεί αντικείμενο μιας άλλης διατριβής, με επιβλέποντα καθηγητή τον κ. Κατερέλο.

Ένα δεύτερο ζήτημα, του οποίου η διερεύνησή θα είχε εξαιρετικό ενδιαφέρον είναι το είδος του ελκυστή του μοντέλου, για τις τιμές των παραμέτρων που αυτός είναι χαοτικός. Όπως έχει αναφερθεί και στο τέταρτο κεφάλαιο της διατριβής, όπου έγινε μια σύντομη παρουσίαση της επιστήμης των δυναμικών συστημάτων και του χάους, μετά από μια αρχική αυτοοργάνωση κάθε χαοτικό σύστημα εισέρχεται σε ένα ελκυστή. Έτσι

και στο μοντέλο MER, όποτε το σύστημα είναι χαοτικό (έχει θετικό εκθέτη Lyapunov), μετά την πάροδο ενός αριθμού αρχικών επαναλήψεων, ο οποίος εξαρτάται από τις τιμές του συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ και του φράγματος εμπιστοσύνης ε , όλες οι τροχιές των γνωμών των πρακτόρων εισέρχονται σε κάποιον ελκυστή. Δυστυχώς, ο προσδιορισμός της φύσης του ελκυστή αυτού καθώς και η μελέτη του παρουσιάζει πολύ μεγάλη δυσκολία. Η δυσκολία αυτή οφείλεται στο ότι το χαοτικό αυτό σύστημα, για 100 πράκτορες, όπως μελετήθηκε στην παρούσα διατριβή, ανήκει στο χώρο των 200 διαστάσεων ($\mathbb{R}^{200}$). Τα πιο γνωστά χαοτικά συστήματα, των οποίων οι ελκυστές έχουν μελετηθεί επαρκώς, έχουν δύο, τρεις ή το πολύ τέσσερις διαστάσεις. Κάποια λιγότερο γνωστά χαοτικά συστήματα έχουν διάσταση λίγο μεγαλύτερη, κανένα όμως πάνω από 10. Δεν υπάρχει μοντέλο στη διεθνή βιβλιογραφία, είτε των κοινωνικών είτε όμως και των θετικών επιστημών, που να έχει διάσταση παρόμοια σε μέγεθος με το Μοντέλο MER. Οι γνωστότεροι ελκυστές, όπως του Lorenz ή του Hénon, έχουν μελετηθεί διεξοδικά, αλλά τα μαθηματικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν δε μπορούν να εφαρμοστούν σε χώρο με διάσταση ίση με 200.

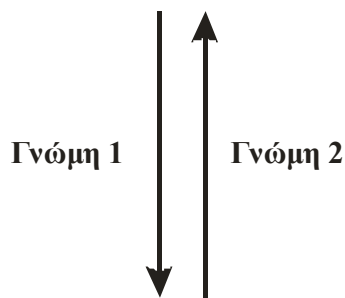
Μια ισχυρότατη ένδειξη για τη φύση του ελκυστή στο μοντέλο MER θα ήταν η διεξαγωγή μιας προσομοίωσης με 10000 πράκτορες³⁴ ή και περισσότερους. Σε μια τέτοια προσομοίωση, αν μεγεθύνονταν κάποια τροχιά ομάδων πρακτόρων, είναι πολύ πιθανό να αποτελούνταν από τρεις ή τέσσερις μικρότερες τροχιές, οι οποίες πριν τη μεγέθυνση θα εμφανίζονταν ως μια. Αν μεγεθυνόταν οποιαδήποτε από αυτές τις τροχιές θα μπορούσε να παρουσιάσει το ίδιο φαινόμενο, να αποτελείται δηλαδή από περισσότερες τροχιές. Αυτό σημαίνει ότι ο ελκυστής παρουσιάζει την ιδιότητα της αυτοομοιότητας (self similarity) και άρα είναι παράξενος ελκυστής (strange attractor) (Ruelle & Takens, 1971). Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται σε όλους τους χαοτικούς ελκυστές. Την ιδιότητα της αυτοομοιότητας είναι πολύ πιθανό να διαθέτει και ο ελκυστής του μοντέλου MER, για τις τιμές των παραμέτρων που το σύστημα είναι χαοτικό. Δυστυχώς η διεξαγωγή μιας τέτοιας προσομοίωσης, με έναν τόσο μεγάλο αριθμό πρακτόρων, παρότι θα παρουσίαζε εξαιρετικό ενδιαφέρον, είναι προς το παρόν αδύνατη για την υπολογιστική δύναμη ακόμη και των ισχυρότερων υπολογιστών που είναι σήμερα διαθέσιμοι.

Μια ακόμη, σχετική με την προηγούμενη διερεύνηση, θα μπορούσε να αφορά την επίδραση του ρόλου του αριθμού των ατόμων στις ιδιότητες του μοντέλου. Όσον

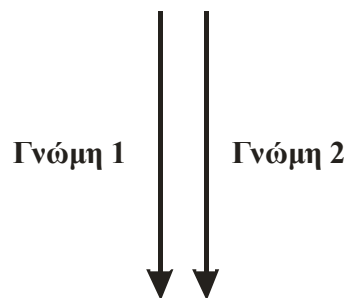
³⁴ Στην περίπτωση αυτή ο ελκυστής θα ανήκε σε χώρο με διάσταση 20.000.

αφορά στα υπόλοιπα δραστοστρεφή μοντέλα δυναμικής εξέλιξης των γνωμών, η πιο ενδιαφέρουσα σχετική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε στο μοντέλο πολιτισμικής διασποράς του Robert Axelrod. Στο μοντέλο αυτό ο αριθμός των ατόμων παίζει έναν απρόσμενα σημαντικό ρόλο, επιδρώντας καθοριστικά στον τελικό αριθμό πολιτισμών που σχηματίζονται. Συγκεκριμένα, όπως παρουσιάστηκε και στο κεφάλαιο 3, ενώ εύλογα θα μπορούσε να υποθεθεί ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των πρακτόρων και κατά συνέπεια το μέγεθος της γεωγραφικής περιοχής, τόσο μεγαλύτερος θα είναι και ο αριθμός των τελικών περιοχών πολιτισμών που επιβιώνουν. Οι διεξαγωγή όμως των προσομοιώσεων δείχνει ότι ο αριθμός των σταθερών περιοχών πολιτισμών που επιβιώνουν αυξάνει με την αύξηση της γεωγραφικής περιοχής και του αριθμού των πρακτόρων, ώσπου όμως φτάνει ένα μέγιστο και στη συνέχεια ο μέσος όρος των τελικών περιοχών πολιτισμών μειώνεται. Ο Άξελροντ ερμηνεύει το μηχανισμό που λειτούργησε πίσω από αυτό το απροσδόκητο, αναδυόμενο αυτό αποτέλεσμα, εισάγοντας στο μοντέλο μια σειρά νέων εννοιών, όπως διάλεκτος, ζώνη πολιτισμού κ.λπ. Η επίδραση του αριθμού των πρακτόρων είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα παίζει καθοριστικό ρόλο σε όλες σχεδόν τις ιδιότητες του μοντέλου MER, δυστυχώς όμως δεν έχει μελετηθεί ακόμη, λόγω έλλειψης της αναγκαίας υπολογιστικής δύναμης.

Μια ακόμη διερεύνηση που θα μπορούσε να γίνει, είναι η παραλλαγή κάποιων από τις υποθέσεις του μοντέλου και στη συνέχεια ο έλεγχος των διαφορών που είναι δυνατό να προκύψουν στα αποτελέσματα. Μια τέτοια πρώτη παραλλαγή θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε μια βασική υπόθεση του μοντέλου, που αφορά τη δομή των δύο γνωμών των πρακτόρων. Ως γνωστόν, έχει υποθεθεί ότι κάθε πράκτορας, σύμφωνα με τον μέσο όρο των γνωμών των άλλων πρακτόρων που τον επηρεάζουν, τροποποιεί τις δύο του γνώμες, και κατόπιν κοιτάζει μέσα του και διορθώνει μια απ' τις δύο αυτές γνώμες για να μην έρχονται σε αντίθεση και έτσι να διατηρήσει την εσωτερική του ισορροπία. Μέχρι τώρα υποθέταμε ότι οι δύο γνώμες είχαν μια αντίθετη δομή (σχήμα 12.1), αν δηλαδή και οι δύο αυξάνονταν μετά την κοινωνική αλληλεπίδραση, το άτομο μείωνε τη γνώμη που είχε τη μικρότερη μεταβολή, ενώ αν είχαν μειωθεί και οι δύο, το άτομο αύξανε τη γνώμη με τη μικρότερη μεταβολή, έτσι ώστε να διατηρήσει την εσωτερική του ισορροπία. Θα μπορούσε να υποθεθεί ότι οι δύο γνώμες πάνε προς την ίδια κατεύθυνση (σχήμα 12.2), αν δηλαδή η μία αυξηθεί και η άλλη μειωθεί όσον αφορά στην κοινωνική επίδραση, στη συνέχεια το άτομο να διορθώνει τη γνώμη με τη μικρότερη μεταβολή προς την ίδια κατεύθυνση που είχε μεταβληθεί η γνώμη με τη μεγαλύτερη μεταβολή, έτσι ώστε να μη διαταραχθεί η εσωτερική του ισορροπία.



Σχήμα 12.1: Δομή των δύο γνώμων όπου κάθε μια πάει αντίθετα από την άλλη



Σχήμα 12.2: Δομή των δύο γνώμων όπου και οι δύο πάνε προς την ίδια κατεύθυνση

Μια άλλη τροποποίηση στις υποθέσεις του μοντέλου θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί εισάγοντας 3 γνώμες για κάθε πράκτορα και να πειραματιστεί επίσης με τη δομή που θα μπορούσαν αυτές να έχουν.

Ένα σημαντικό πεδίο προς διερεύνηση αφορά στην ομοιογένεια των πρακτόρων του μοντέλου. Αν υποθέσουμε ότι οι πράκτορες είναι ανομοιογενείς, δηλαδή δεν έχουν όλοι τα ίδια χαρακτηριστικά, αλλά διαθέτουν διαφορετικό συντελεστή ενδοατομικής ισορροπίας ψ και διαφορετικό φράγμα εμπιστοσύνης ε , λαμβάνουμε εξαιρετικά ενδιαφέροντα αποτελέσματα, τα οποία όμως ξεφεύγουν από τα όρια της παρούσας διατριβής.

Η διαφοροποίηση των πρακτόρων θα μπορούσε ακόμη να αφορά τη δομή των δύο γνώμων, όπως παρουσιάζεται στα σχήματα 12.1 και 12.2. Θα μπορούσε για παράδειγμα η δομή των δύο γνώμων να ακολουθεί το αντιθετικό σχήμα 12.1 για ένα μεγαλύτερο αριθμό πρακτόρων και το σχήμα 12.2 για ένα μικρότερο αριθμό πρακτόρων με τον τρόπο αυτό να διερευνηθούν μια σειρά κοινωνικών φαινομένων, όπως την ύπαρξη πλειοψηφίας-μειοψηφίας κα.

Σε όλες τις περιπτώσεις διερεύνησης ένα πολύ ενδιαφέρον στοιχείο των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν είναι υπό ποιές προϋποθέσεις διατηρείται ο χαοτικός χαρακτήρας του συστήματος και κατά συνέπεια η αδυναμία πρόβλεψης, καθώς και για ποιες παραλλαγές το σύστημα γίνεται και πάλι προβλέψιμο.

ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Άξελροντ Ρόμπερτ (1998/1984). *Η Εξέλιξη της Συνεργασίας*. Εκδόσεις Καστανιώτη: Αθήνα.
- Γραμματικάκης, Γ. (2004) *Η Κόμη της Βερενίκης*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Θεοδωρίδης, Χ. (1955). *Εισαγωγή στη Φιλοσοφία*. Αθήνα: Βιβλιοπωλείο της Εστίας.
- Κουλούρης, Α. (2007). Ιστορική Εισαγωγή στην Επιστήμη του Χάους. *Πρακτικά 24^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Μαθηματικής Παιδείας*. Εκδ. ΕΜΕ: Αθήνα.
- Μπούντης, Α. (1995). *Δυναμικά Συστήματα και Χάος*. Τόμος Α'. Εκδ. Γ. Παπασωτηρίου: Αθήνα.
- Παπαστάμου, Σ. (2001). *Εισαγωγή στην Κοινωνική Ψυχολογία* (τόμος 1). Ελληνικά Γράμματα: Αθήνα.
- Παπαστάμου, Σ. (Εισαγωγή/επιμέλεια) (1999/1990). *Διομαδικές Σχέσεις*. Εκδόσεις Οδυσσέας: Αθήνα.
- Πετμεζίδου, Μ. (εκδ.). (1996). *Σύγχρονη Κοινωνιολογική Θεωρία*. Τόμος Ι. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης: Ηράκλειο Κρήτης.
- Πριγκοζίν'Ιλια (2003/1993). *Οι νόμοι του Χάους*. Εκδοτικός Οίκος, Π. Τραυλός: Αθήνα.
- Φωκάς, Ν. (1996). Μπορούμε Πράγματι να το Προβλέψουμε; Ντετερμινισμός, Χάος, Πρόβλεψη-Εφαρμογές ενός νέου Μοντέλου των Θετικών Επιστημών στη Μελέτη της Κοινωνίας. *Επιθεώρηση Κοινωνικών Ερευνών*, τεύχος 89-90.
- Gleick, J. (1990). *Χάος, Μια Νέα Επιστήμη*. Εκδ. Κάτοπτρο: Αθήνα. (Viking Penguin, New York, 1987).
- Hawking, S. (1996). *Το Χρονικό του Χρόνου*. Εκδόσεις Κάτοπτρο: Αθήνα.
- Hedstrom, P. (υπό έκδοση/2005). *Ανατομή του Κοινωνικού: Για τις Αρχές της Αναλυτικής Κοινωνιολογίας*. Cambridge University Press: Cambridge. (Μετάφραση: Μ.Α. Μπουντουρίδης).

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abric, J. C. (1976). *Jeux, Conflits et représentations sociales*. Thèse d'Etat. Université de Provence: Aix-en-Provence.
- Aldridge, A. (1999). Prediction in Sociology: Prospects for a Devalued Activity. *Sociological Research Online*, vol.4, No 3.
<http://www.socresonline.org.uk/socresonline/4/3/aldridge.html>
- Alexander, J. C., Giessen, B., Munch, R. & Smelser, N. J. (eds.). (1987). *The Micro-Macro Link*. Berkeley: University of California Press.
- Alligood, K. T., Sauer, T. D. & Yorke, J. A. (2000/1996). *Chaos, an Introduction to Dynamical Systems*. New York: Springer-Verlag.
- Axelrod, R. (1987). The Evolution of Strategies in the Iterated Prisoner's Dilemma. In Davis, L. (ed.). *Genetic Algorithms and Simulated Annealing*. London: Pitman: 32–41.
- Axelrod, R. (1997a). *The complexity of cooperation*. Princeton University Press.
- Axelrod, R. (1997b). Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences. *Complexity*, Vol. 3, No 2, p. 16-22.
- Axtell, R. (2000a). Effects of Interaction Topology and Activation Regime in Several Multi-Agent Systems. Presented at MABS 2000: *Proceedings of the Second International Workshop on Multi Agent Based Simulation*. June, Boston.
- Axtell, R. (2000b). Why agents? On the varied motivations for agent computing in the social sciences. *Center on Social and Economic Dynamics, Working Paper no. 17*. Washington, DC: The Brookings Institution.
- Bankes, S. (2002). Tools and techniques for developing policies for complex and uncertain systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 7263-7266.
- Barabasi, A. L. & Bonabeau, E. (2003). Scale-Free Networks. *Scientific American*, pp 60-69.
- Beckmann, T. (1997). Starke und schwache Ergodizität in nichtlinearen Konsensmodellen. Diploma thesis Universität Bremen.
- Ben-Naim, E. Krapivsky, P. & Redner, S. (2003). Bifurcations and Patterns in Compromise Processes. *Physical D* 183 190.
- Benzecri, J. P. (1992). *Correspondence Analysis Handbook*. New York: Marsel Dekker.

- Berg, B. (1998). *Qualitative research methods for the social sciences*. Boston: Allyn and Bacon.
- Billig, M. (1991). *Ideology and Opinions*. London: Sage Pbn.
- Bonabeau, E. (2001). Agent-based modelling: methods and techniques for simulating human systems. In *Proc. National Academy of Sciences* 99(3): 7280-7287
- Boudon, R. (1976). Limitations of Rational Choice Theory. *The American Journal of Sociology*, Vol. 104, No. 3, pp. 817-828.
- Brock, W. A. (1988). Nonlinearity and complex dynamics in economics and finance. In P. W. Anderson, K. J. Arrow, & D. Pine (Eds.), *The economy as an evolving complex system*, pp. 77-98. New York: Addison-Wesley.
- Brunk, G. G. (2001). Self-organized criticality: A new theory of political behavior and some of its implications. *British Journal of Political Science*, 31, 427-445.
- Buckley, W. (1967). *Sociology and Modern Systems Theory*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Burke, P. J. (1997). An Identity Model for Network Exchange. *American Sociological Review*, Vol. 62, No. 1 (Feb., 1997), pp. 134-150.
- Burks, A. W. (1970). *Essays on cellular automata*. University of Illinois Press: Urbana, IL.
- Cambel, A. B. (1993). *Applied Chaos Theory: A paradigm for Complexity*. Academic Press, Inc.: San Diego, USA.
- Casti, J. (1994). *Complexification: Explaining a Paradoxical World through the Science of Surprise*. London: Abacus.
- Casti, J. (1997). *Would-be worlds: How simulation is changing the frontiers of science*. New York: John Wiley and Sons.
- Cederman, L-E. (1997). *Emergent actors in world politics: How states and nations develop and dissolve*. Princeton NJ: Princeton University Press.
- Cederman, L-E. (2005). Computational Models of Social Forms: Advancing generative Process Theory. *American Journal of Sociology* 110(4): 864-93. (<http://www.journals.uchicago.edu/cgi-bin/resolve?id=doi:10.1086/426412&erFrom=4468469220907503775Guest>)
- Chomsky, N. (1957). *Syntactic Structures*. The Hague: Mouton.
- Cohen, I. J. (1989). *Structuration Theory: Anthony Giddens and the Constitution of Social Life*. New York: St. Martin's.

- Coleman, J. (1990). *Foundations of Social Theory*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Conte, R, Gilbert, N. & Sichman, J. S. (1998). MAS and Social Simulation: A Suitable Commitment. In *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*. Edited by J. S. Sichman, R. Conte and N. Gilbert. Berlin: Springer.
- Converse, P.E. (1975). Public Opinion and Voting Behavior. In F. I. Greenstein & N.W. Polsby. (Eds.). *Handbook of Political Science* (p. 75-168). Reading: Addison-Wesley.
- Cox, S. J., Sluckin, T. J. & Steele, J. (1999). Group Size, Memory, and Interaction Rate in the Evolution of Cooperation. *Current Anthropology* 40:369-76.
- Deffuant, G. Amblard, F. Gérard W & Faure, T. (2002). How can extremism prevail? A study based on the relative agreement interaction model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 5, no. 4
- Demongeot, J., Goles, E. & Tchuente, M. (eds.). (1985). *Dynamical systems and cellular automata*. Academic Press: London.
- Dittmer, J. C. (2000). Diskrete Nichtlineare Modelle der Konsensbildung. Diploma thesis Universität Bremen.
- Dittmer, J. C. (2001). Consensus Formation Under Bounded Confidence. *Nonlinear Analysis*, 47(7), p. 4615-4621.
- Doise, W. (1978). *Groups and individuals*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dooley, K. (1997). A complex adaptive systems model of organization change. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 1, 69-97.
- Durkheim, E. (1895/1965). *Les Règles de la Méthode Sociologique*, republished as *The Rules of Sociological Method*, The Free Press.
- Ekeland, I. (1995). *Le Chaos*. Paris: Flammarion.
- Elliott, E. & Kiel, L. D. (2004). Agent-Based Modelling in the Social and Behavioural Sciences. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, Vol. 8, No. 2.
- Epstein, J. M. (1999). Agent-Based Computational Models And Generative Social Science. *Complexity* 4(5) 41-57.
- Epstein, J. M. (2006). *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*. Princeton University Press: New Jersey.
- Epstein, J. M.; Axtell, R. (1996). *Growing Artificial Societies: Social Science From the Bottom Up*. Cambridge, MA: MIT Press.

- Farr, R. (1993). The Theory of Social Representations: Whence and Whither? *Papers on Social Representations*, 2, 130-138.
- Fay, B. (1975). *Social Theory and Political Practice*. London: George Allen and Unwin.
- Festinger, L. (1954). A Theory of Social Comparison Processes. *Human Relations*, 7, 117-140.
- Festinger, L. (1957). *A Theory of Cognitive Dissonance*. Evanston, IL.: Row, Peterson.
- Fiske, D. W. & Shweder R. A. (1986). *Metatheory in Social Science*. Chicago and London: The University of Chicago Press.
- Flament, C. (1981). L'Analyse de Similitude: Une Technique pour les Recherches sur les Représentations Sociales, *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 4, p. 357-396.
- Forrester, J. W. (1968). *Principles of Systems*. Cambridge MA: Productivity Press.
- Freeman, L. C. (2004). *The Development of Social Network Analysis: A Study in the Sociology of Science*. Empirical Press: Vancouver
- Freeman, W. (1995). Forward in Robertson R. & Combs, A. (Ed.). *Chaos Theory in Psychology and the Life Sciences*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc. N.J.
- Gardner, M. (1970). Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game life. *Scientific American*, 223: 120-123.
- Gergen, K. J. (1973). Social Psychology as History. *Journal of Personality and Social Psychology*. 26: 309-20.
- Giddens, A. (1984). *The Constitution of Society*. Cambridge: Polity Press.
- Giddens, A. (1993), *New Rules of Sociological Method*, Polity Press.
- Gilbert, N. (1993). *Analyzing tabular data: Loglinear and logistic models for social researchers*. London: UCL Press.
- Gilbert, N. (1995). Emergence in Social Simulation. In Gilbert, N.; Conte, R. 144–156.
- Gilbert, N. (1996a). Holism, Individualism and Emergent Properties. In Hegselmann, R., Mueller, U., & Troitzsch, K. (ed.). *Modeling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Gilbert, N. (1996b). Simulation: an Emergent Perspective. *Lecture given at the conference on New Technologies in the Social Sciences*, 27--29th October 1995, Bournemouth, UK and then at LAFORIA, Paris, 22nd January 1996.
- Gilbert, N. & Troitzsch, K. (2005/1999). *Simulation for the Social Scientist* Great Britain: Open University Press.

- Grüne-Yanoff, T. (2006). Agent-based simulation, generative science, and its explanatory claims. *New Philosophy of the Social Sciences*.
<http://www.infra.kth.se/~gryne/ACEpaper.pdf>
- Gutowitz, H. (ed.). (1991). *Cellular Automata: Theory and Experiment*. MIT Press: Cambridge, MA.
- Halfpenny, P. (1997). Situating Simulation in Sociology. *Sociological Research Online*, vol. 2, No 3.
- Halpin, B. (1999). Simulation in Sociology. *American Behavioural Scientist* 42:1488-508.
- Hegselmann, R. & Flache, A. (1998). Understanding Complex Social Dynamics: A Plea For Cellular Automata Based Modelling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 1, no 3.
- Hegselmann, R. & Krause, U. (2002). Opinion Dynamics and Bounded Confidence Models, Analysis and Simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 5, no 3.
- Heider, F. (1946). Attitudes and Cognitive Organization. *Journal of Psychology*, 21, 107-112.
- Heider, F., (1958). *The Psychology of Interpersonal Relations*. New York: Wiley.
- Hempel, C. G. (1965). *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science*. The Free Press: New York.
- Hempel, C. G. (1966). *Philosophy of Natural Science*. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, N.J.
- Hempel, C. G. & Oppenheim, P. (1948). Studies in the Logic of Explanation. *Philosophy of Science* 15: 567–579.
- Holland, J. H. (1988). The global economy as an adaptive process. In P. W., Anderson, K. J. Arrow & D. Pine (Eds.), *The economy as an evolving complex system*, pp. 117-124. New York: Addison-Wesley
- Jeffrey, R. (1991) *Formal Logic: Its Scope and Limits*. McGraw-Hill: New York.
- Jennings, N. R. (2000). On Agent-Based Software Engineering. *Artificial Intelligence* 117, pp. 277-296, Elsevier Press.
- Katerelos, I. & Koulouris, A. (2004a). Seeking Equilibrium Leads to Chaos: Multiple Equilibria Regulation Model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/2/4.html>

- Katerelos, I. & Koulouris, A. (2004b). Is prediction possible? Chaotic behavior of Multiple Equilibria Regulation Model in Cellular Automata Topology. *Complexity*, Vol. 10.1. pg: 23 - 36.
- Katerelos, I. & Koulouris, A. (2004c). Multiple Equilibria Regulation Model in Cellular Automata Topology. Proceedings of the Sixth International Conference on Social Science Methodology (RC 33 Logic and Methodology), August 17-20, Amsterdam, NL.
- Katerelos, I. (2007). Chaos and Order in Social Systems: X-Model. Unpublished presentation. *Human Complex Systems*, 27-30 April, Lake Arrow Head: UCLA.
- Kiel, L. D. & Elliott, E. (1997/2000). *Chaos Theory in the Social Sciences*. USA: The University of Michigan Press.
- Kiel, L. D. (2006). A primer for agent-based modeling in public administration: exploring complexity in “would-be” administrative worlds. *Public Administration Quarterly*, April, 2006.
- Klüver, J. (2004). The evolution of Social Geometry. *Complexity*, Vol. 9, No. 1, pp. 13-22.
- Knoke, D. & Kuklinski, J. (1982). *Network Analysis*. Sage Publications: Beverly Hills and London.
- Krause, U. (1997). Soziale Dynamiken mit vielen Interakteuren. Eine Problemskizze. In Krause, U. and Stockler, M. (Eds.) *Modellierung und Simulation von Dynamiken mit vielen interagierenden Akteuren*. Universität Bremen, p. 37-51.
- Krause, U. (2000). A Discrete Non-linear and Non-autonomous Model of Consensus Formation. In Elaydi, S., Ladas, G., Popena, J. and Rakowski, J. (Eds.). *Communications in Difference Equations*. Amsterdam: Gordon and Breach Publ. p. 227-236.
- Laplace, P. S. (1814/1951). *A philosophical Essay on Probabilities*. Translated by Frederick Wilson Truscott and Frederick Lincoln Emory. New York: Dover.
- Laszlo, E. (1996). *The systems View of the World*. Hampton Press: Cresskill.
- Latané, B. (1981). The psychology of social impact. *American Psychologist*, 36, 343-356.
- Latané, B. (1996). Dynamic Social Impact: The Creation of Culture by Communication. *Journal of Communication*, v46 n4 p13-25.
- Latané, B. & Harkins, W. (1976). Cross-modality matches suggest anticipated stage fright a multiplicative function of audience size and status. *Perception and Psychophysics*, 20, 482-488.

- Latané, B. & Wolf, S. (1981). The social impact of majorities and minorities. *Psychological Review* 88, 438-453.
- Latané, B. & Nowak, A. (1997). Self-organizing Social Systems: Necessary and Sufficient Conditions for the Emergence of Consolidation, Clustering, and Continuing Diversity. In G. Barnett & F. Boster (Eds.). *Progress in Communication Sciences: Persuasion* (v. 13, pp. 43-74). Norwood, NJ: Ablex.
- Layder, D. (1981). *Understanding Social Theory*. Sage Publication: London.
- Layder, D. (1987). Key Issues in Structuration Theory: Some Critical Remarks. *Current Perspectives in Social Theory* 8:25-46.
- LeBaron, B. (2002). Short-memory, traders and their impact on group learning in financial markets. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 7201-7206.
- Lewin, K. (1936). *Elements of a Topological Psychology*. New York: McGraw-Hill.
- Lewin, K. (1951) *Field theory in social science; selected theoretical papers*. D. Cartwright (Ed.). New York: Harper & Row.
- Li, T. Y. & Yorke, J. (1975). Period three implies chaos. *Amer. Math Monthly*, 82, 985–992.
- Lomborg, B. (1992). Game Theory Versus Multiple Agents: The Iterated Prisoner's Dilemma. In *Artificial Social Systems*. Castelfranchi, C. and Werner E. (ed.). Berlin: Springer-Verlag.
- Lomborg, B. (1996). Nucleus and Shield: The Evolution of Social Structure in the Iterated Prisoner's Dilemma. *American Sociological Review*, 61:278-307.
- Lugan, J-C. (1993). *La Systémique Sociale*. Paris: P.U.F. (Q-S-J).
- Luhmann, N. (1990), *The autopoiesis of social systems*. In *Essays on self-reference*, pp. 1-21, Columbia University Press.
- Macal, C. M. & North, M. J. (2005). Tutorial on Agent Based Modelling and Simulation. *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*. M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong, and J. A. Joines, (eds). Monterey, California.
- Macy, M. W. & Skvoretz, J. (1998). The Evolution of Trust and Cooperation Between Strangers: A Computational Model. *American Sociological Review* 63:638-60.
- Macy, M. W. & Willer, R. (2002). From factors to actors: Computational Sociology and Agent-based Modelling. *Annual Review of Sociology*, 28 143-66.
- Manneville, P. & Pomeau, Y. (1980). Different Ways to Turbulence in Dissipative Dynamical Systems. *Physica 1D*, 219.

- Maturana, H., & Varela, F. (1988). *The Tree of Knowledge: The Biological Roots of Human Understanding*. Shambhala Books.
- May, R. (1976). Simple Mathematical Models with very Complicated Dynamics. *Nature* 261, 45-67.
- McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology (2005) The McGraw-Hill Companies, Inc. Answers.com: <http://www.answers.com/topic/simulation>.
- McKim, V. & Turner, S. (1997). *Causality in Crisis?* Indiana, USA: University of Notre Dame Press.
- Mellouli, S., Mineau, G. & Moulin, B. (2003). Situation Event Logic for Early Validation of Multi-Agent Systems. *Canadian Conference on AI 2003*: 370-382.
- Mills, C. W. (1970). *The Sociological Imagination*. Harmondsworth: Penguin.
- Moreno, J. L. (1953). *Who shall survive? Foundations of sociometry, group psychotherapy and sociodrama* (Rev. ed. 1934). Beacon, N.Y: Beacon House.
- Moreno, J. L. (1954). *Fondements de la sociométrie*. Paris: Presses universitaires de France.
- Moscovici, S. (1980). Toward a Theory of Conversion Behavior. In Berkowitz, L. (Ed.). *Advances in Experimental Psychology*, Vol. 13. (S. 209-239). New York: Academic Press.
- Nagel, E. (1961). *The Structure of Science*. Routledge & Kegan Paul.
- Neau, D (2000). Révisions des croyances dans un système d'agents en interaction. *Rapport d'option de l'école polytechnique*. (<http://www.lps.ens.fr/~weisbuch/rapneau.ps>).
- Neumann, J. von (1966). *Theory of self-reproducing automata*. Edited and completed by Arthur W. Burks. University of Illinois Press: Urbana, IL.
- Nishimura, S. I. and Ikegami, T. (1998). Emergence and Maintenance of Relationships Among Agents. Pp. 438-42 in *Artificial Life VI*, edited by Adami, C., Belew, R. K., Kitano, H. & Taylor, C. Cambridge, MA: MIT Press.
- Nowak, A. & Latané, B. (1994). Simulating the Emergence of Social Order From Individual Behavior. In *Simulating Societies: The Computer Simulation of Social Phenomena*. Gilbert, N. & Doran, J. (ed.). UCL Press: London
- Nowak, M.A. and May, R. M. (1992). Evolutionary Games and Spatial Chaos. *Nature* 359: 826–829.
- O'Hare, G. M. P. & Jennings, N. R. (eds). (1996). *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*. New York: Wiley.

- Oseledec, V. I. (1968). Multiplicative ergodic theorem: Characteristic Lyapunov exponents of dynamical systems. *Trudy MMO* 19, 179–210.
- Osgood, C. E. & Tannenbaum, P. H. (1955). The Principle of Congruity in the Prediction of Attitude Change. *Psychological Review*, 62, 42-55.
- O'Sullivan & D. Haklay, M. (2000). Agent-based models and individualism: is the world agent-based? *Environment and Planning A* 32(8) 1409 – 1425.
- Pareto, V. (1916/1935). *Mind and Society*. USA: Kensington Publishing Co.
- Parsons, T. (1977). *Social Systems and the Evolution of Action Theory*. New York: The free Press.
- Patrick, S., Dorman, P. M., & Marsh, R. L. (1999). Simulating correctional disturbances: The application of organization control theory to correctional organization via computer simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 2, 1-21.
- Peitgen, H-O. Jurgens, H. & Saupe, D. (1992). *Chaos and Fractals, New Frontiers of Science*. New York: Springer-Verlag.
- Perelman, C. (1979). *The new Rhetoric and the Humanities*. Dordrecht: D. Reidel.
- Peterson, I. (1993). *Newton's Clock: Chaos in the Solar System*. New York: Freeman.
- Petri, F. & Hahn, F. (2003). *General Equilibrium: Problems and Prospects*, London: Routledge Pbns.
- Popper, K. R. (1963). *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*. New York: Routledge.
- Popper, K. R. (1959). *The Logic of Scientific Discovery*. New York: Routledge.
- Prietula, M. J., Carley, K M., & Gasser, L. (1998). *Simulating organizations: Computational models of institutions and groups*. Cambridge: MIT Press.
- Resnick, M. (1997). *Turtles, Termites and Traffic Jams*. The MIT Press.
- Ruelle, D. & Takens, F. (1971). On the Nature of Turbulence. *Communications of Mathematical Physics*, 20: 167-192.
- Sakoda, J. M. (1949). *Minidoka: An analysis of changing patterns of social interaction*. Unpublished doctoral dissertation, University of California: Berkeley.
- Sakoda, J. M. (1971). The checkerboard model of social interaction. *Journal of Mathematical Sociology* 1. pp. 119-132.
- Salmon, W. C. (1984). *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*. Princeton University Press: Princeton.
- Salmon, W. C. (1990). *Causality and Explanation*. Oxford University Press: New York.

- Sawyer, R. K. (2002). *Durkheim's Dilemma: Toward a Sociology of Emergence*, in *Sociological Theory* 20:2, July 2002, American Sociological Association.
- Sawyer, R. K. (2003). Artificial Societies: Multiagent Systems and the Micro-Macro Link in Sociological Theory. *Sociological Methods and Research*, Vol. 31, No. 3, 325-363.
- Schelling, T. (1969). Models of segregation. *American Economic Review* 59. pp. 488-493.
- Schelling, T. (1971). Dynamic models of segregation. *Journal of Mathematical Sociology* 1. pp. 143-186.
- Schelling, T. (1978). *Micromotives and Macrobehavior*. W.W. Norton and Company: New York
- Schillo M., Fisher, K. & Klein, C. (1979). The Micro-Macro Link in DAI and Sociology. Lecture notes in computer science, 133-148, Springer, Berlin.
- Schumpeter, J. (1908). On the Concept of Social Value. *Quarterly Journal of economics*, p. 213-232.
- Shaw, M.E. (1976). *Group Dynamics: The Psychology of Small Group Behavior*. New York: McGraw-Hill.
- Sherif, M. (1966). *Group Conflict and Cooperation: Their Social Psychology*. London: Routledge & Kegan Paul.
- Sorokin, P. A. (1927). *Social Mobility*. New York: Harper.
- South, R. (1697). *Twelve Sermons Preached Upon Several Occasions (Second Edition)*, Volume I, Printed by S.D. for Thomas Bennet, (London).
- Sprott, J. C. (1998). *Numerical Calculation of Largest Lyapunov Exponent*. (<http://sprott.physics.wisc.edu/chaos/lyapexp.htm>)
- Sprott, J. C. (2003). *Chaos and Time-Series Analysis*. Oxford: Oxford University Press.
- Stocker, R., Cornforth, D. & Bossomaier T. R. J. (2002) Network Structures and Agreement in Social Network Simulations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 5, no. 4.
- Sullivan, D. G., Grosz, B. J. & Kraus, S. (2000). Intention Reconciliation by Collaborative Agents. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Multiagent Systems (ICMAS 2000)*. Boston: IEEE Computer Society.
- Tainter, J. A. (1998). *The collapse of complex societies*. Cambridge UK: Cambridge University Press.

- Tajfel, H. & Turner, J. C. (1979). An Integrative Theory of Intergroup Conflict. In W.G. Austin & L. Worchel (Eds.). *The Social Psychology of Intergroup Relations*. Monterey, California: Brooks, Cole.
- Tesfatsion, L. (2006). Agent-Based Computational Economics: A Constructive Approach to Economic Theory. To appear in Tesfatsion and Judd (Eds.). *Handbook of Computational Economics*, Vol. II., North Holland, 1-50.
- Thompson, J. B. (1989). The theory of Structuration. In *Social Theory of Modern Societies: Anthony Giddens and his Critics*. Ed. D. Held. Cambridge University Press: Cambridge, pp. 56-76.
- Toffoli, T. & Margolus, N. (1987). *Cellular automata machines: A new environment for modeling*. MIT Press: Cambridge, MA.
- Troitzsch, K. G. (1997), Social science simulation-Origins, prospects, purposes. In Conte, R et al. (Eds) *Simulating social phenomena*, Heidelberg: Springer-Verlag: 40-54.
- Waldrop, M. M. (1992). *Complexity: The Emerging Science on the Edge of Order and Chaos*. Simon & Schuster: New York.
- Wolfram, S. (1984). Universality and complexity in cellular automata. *Physica D*. 10. pp. 1-35: Singapore.
- Wolfram, S (ed.) (1986). *Theory and applications of cellular automata*. World Scientific.
- Zanone, R. B. (1960). The Concepts of Balance, Congruity and Dissonance. *Public Opinion Quarterly*, 61, 159-167.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. Μαθηματική Παρουσίαση του Αλγορίθμου του Μοντέλου Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών

Στο πρώτο τμήμα του παραρτήματος θα παρουσιάσουμε σε αυστηρά μαθηματική και φορμαλιστική γλώσσα τον αλγόριθμο του Μοντέλου Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών.

Θεωρούμε $n = 100$ πράκτορες, ο καθένας από τους οποίους έχει δύο γνώμες για κάθε επανάληψη της προσομοίωσης. Συμβολίζουμε $x_t^k(i) \in [0,1]$ τη γνώμη k του πράκτορα i κατά την επανάληψη t , $t \in \mathbb{N}$, $k = 1,2$, $i \in \{1,2,...,100\}$.

Συμβολίζουμε ε το φράγμα της εμπιστοσύνης και ψ τον intra-regulation factor. Τα ε και ψ θεωρούνται τα ίδια για όλους τους πράκτορες. Οι γνώμες των πρακτόρων σε κάθε επανάληψη t αποτελούν δύο πίνακες A_k , $k = 1,2$ και ονομάζονται προφίλ γνωμών της επανάληψης t . Υποθέτουμε ότι ο πράκτορας i φτάνει σε μια προσωρινή γνώμη k που συμβολίζεται με $tempx_{t+1}^k(i)$ λαμβάνοντας υπόψη του τις γνώμες $x_t^k(j)$ των πρακτόρων j οι οποίοι ανήκουν στο σύνολο εμπιστοσύνης

$$I(i,k,t) = \{j \in \mathbb{N} / 1 \leq j \leq 100, |x_t^k(i) - x_t^k(j)| \leq \varepsilon\},$$
$$t \in \mathbb{N}, k = 1,2, i \in \{1,2,...,100\}.$$

Το σύνολο εμπιστοσύνης περιλαμβάνει τους πράκτορες j που η διαφορά των γνωμών $x_t^k(i) - x_t^k(j)$ βρίσκεται μέσα στο διάστημα της εμπιστοσύνης $[-\varepsilon, \varepsilon]$.

Η προσωρινή γνώμη $tempx_{t+1}^k(i)$ του πράκτορα i στην επανάληψη $t+1$ είναι ο αριθμητικός μέσος των γνωμών $x_t^k(j)$ όλων των πρακτόρων j που ανήκουν στο σύνολο εμπιστοσύνης set $I(i,k,t)$, δηλαδή

$$temp x_{t+1}^k(i) = \frac{1}{\#I(i,k,t)} \sum_{j \in I(i,k,t)} x_t^k(j), \quad t \in \mathbb{N}, \quad k = 1, 2, \\ i \in \{1, 2, \dots, 100\},$$

όπου $\#I(i,k,t)$ συμβολίζει τον πλήθος των στοιχείων του συνόλου $I(i,k,t)$.

Συμβολίζουμε με $d_t(i)$ τη μέγιστη μεταβολή των απολύτων τιμών των προσωρινών γνώμων 1 και 2 με τις προηγούμενες γνώμες 1 και 2 του πράκτορα i στην επανάληψη t , δηλαδή

$$d_t(i) = \max\{|d_t^1(i)|, |d_t^2(i)|\}, \text{ όπου}$$

$$d_t^1(i) = temp x_{t+1}^1(i) - x_t^1(i), \quad d_t^2(i) = temp x_{t+1}^2(i) - x_t^2(i).$$

Αν $d_t(i) = |d_t^1(i)|$, τότε η γνώμη 1 του πράκτορα i παραμένει η προσωρινή, δηλαδή

$$x_{t+1}^1(i) = temp x_{t+1}^1(i), \text{ ενώ η γνώμη 2 κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση από την κατεύθυνση που κινήθηκε η γνώμη 1, και έτσι έχουμε} \\ x_{t+1}^2(i) = temp x_{t+1}^2(i) - \psi \cdot d_t^1(i), \text{ όπου } \psi \text{ είναι ο intra-regulation factor.}$$

Το αντίθετο συμβαίνει αν $d_t(i) = |d_t^2(i)|$. Τώρα η γνώμη 2 του πράκτορα i παραμένει

ίση με την προσωρινή, $x_{t+1}^2(i) = temp x_{t+1}^2(i)$, ενώ η γνώμη 1 κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή που κινήθηκε η γνώμη 2 και έχουμε $x_{t+1}^1(i) = temp x_{t+1}^1(i) - \psi \cdot d_t^2(i)$. Η ίδιος αλγόριθμος εφαρμόζεται για όλους τους πράκτορες ταυτόχρονα σε κάθε επανάληψη. Όλοι αλλάζουν τη γνώμη τους την ίδια στιγμή και περνάμε στην επόμενη επανάληψη και όχι διαδοχικά ο ένας μετά τον άλλον.

2. Ψευδοκώδικας του προγράμματος

Για να γίνει σαφέστερος ο αλγόριθμος του Μοντέλου Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών αλλά και να καταστεί ευκολότερο κάποιος ερευνητής να γράψει τον κώδικα σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού και να πραγματοποιήσει μόνος κάποιες προσομοιώσεις, παρουσιάζουμε στη συνέχεια τον ψευδοκώδικα του αλγορίθμου. Η παρουσίαση γίνεται στην Αγγλική γλώσσα για να καταστεί ευκολότερη η μεταγραφή σε γλώσσα προγραμματισμού.

ε : Bound of confidence

ψ : Intra-regulation factor

Opinion (i, p): Opinion p, $p \in \{1,2\}$ of agent i at the previous iteration.

TemporaryOpinion (i, p): The mean of the opinions of agents j that their Opinion differ from agent i less than the Bound of Confidence ε .

NewOpinion (i, p): Opinion p of agent i at the next Επανάληψη.

Abs=Absolute Value

For all Opinions p

 For all agents i

 Sum=0: Counter=0

 For all agents j

 Distance (i, j, p) = Abs (Opinion (i, p) – Opinion (j, p))

 If Distance (i, j, p) $\leq \varepsilon$ Then

 Counter = Counter + 1

 Sum = Sum + Opinion (j, p)

 End If

 TemporaryOpinion (i, p) = Sum / Counter

For all agents i

 For all Opinions p

 Change (p)= TemporaryOpinion (i, p) – Opinion (i, p)

Max=Maximum { Abs (Change (1)), Abs (Change (2)) }

If Max= Abs (Change (1)) Then

NewOpinion (i, 2) = TemporaryOpinion (i, 2) - ψ * Max

If Max= Abs (Change (2)) Then

NewOpinion (i, 1) = TemporaryOpinion (i, 1) - ψ * Max

For all Opinions p

For all agents i

Rescale NewOpinion (i, p) into [0,1]

Calculate Information Entropy

Calculate Lyapunov Exponent

3. Ο Κώδικας του Προγράμματος

Για λόγους πληρότητας της παρουσίασης του μοντέλου MER, εκτός από την αυστηρά μαθηματική περιγραφή του αλγορίθμου που δίδεται στο παράρτημα 1 και τον ψευδοκώδικα του προγράμματος του παρατίθεται παράρτημα 2, στο παράρτημα 3 δίδεται ολόκληρος ο κώδικας του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των αποτελεσμάτων της διατριβής. Ο κώδικας είναι γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic. Το κείμενο που είναι γραμμένο σε πλάγια γραφή αποτελεί επεξήγηση των εντολών που βρίσκονται αριστερά. Με την παράθεση του κώδικα δίδεται η δυνατότητα σε κάποιον που γνωρίζει προγραμματισμό σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές και θέλει να αποσαφηνίσει κάποιο σημείο του αλγορίθμου του μοντέλου, να ανατρέξει στο αντίστοιχο σημείο του κώδικα του προγράμματος.

Πρώτη Εντολή: Δημιουργία του Αρχικού Προφίλ Γνωμών

```
Private Sub Check1_Click()  
If Check1.Value = 0 Then Command1.Appearance = 0: Command1.Enabled = False  
If Check1.Value = 1 Then Command1.Appearance = 1: Command1.Enabled = True  
If Check1.Value = 0 Then Command4.Appearance = 0: Command4.Enabled = False  
If Check1.Value = 1 Then Command4.Appearance = 1: Command4.Enabled = True  
End Sub  
Private Sub Command1_Click()  
n = Slider5.Value 'number of agents  
ReDim a(n, 3) 'opinion of agents  
ReDim cn(n, n, 3), per(n, n, 3) 'Randomly generated matrices  
z = 1  
Randomize 'Generate initial opinions  
Open "c:\aa\initialopinions.txt" For Output As #1  
For p = 1 To 3  
For i = 1 To n  
z = z + 1  
a(i, p) = Rnd(z + 2)  
Print #1, a(i, p)  
Next i, p  
Close  
End Sub
```

Δεύτερη Εντολή: Υλοποίηση του Αλγόριθμου

```
Private Sub Command2_Click() 'Set default Parameters  
op$ = "_2op"  
iter1 = 2: iter2 = 3 'The iterations up to iter1 and after iter2 will be printed  
q = 0 'iteration that starts to calculate Lyapunov Exponent  
iter = Slider4.Value + Slider8.Value * 1000 + Slider6.Value * 10000 + Slider7.Value *  
100000 'number of iterations executed by the program
```

```

n = Slider5.Value           'number of agents
bound = Slider1.Value / 100 'Bound of Confidence
psil = Slider2.Value / 100  'Intra-regulation factor psi
irf = Slider9.Value / 100   'Inter-regulation factor k
r = Slider3.Value           'regulates the side of square of the cellular
automaton
x = Int(Sqr(n))             'length of the side of the square of the cellular automaton
agentsname$ = n
bname$ = bound
psiname$ = psil
rname$ = r
itername$ = iter
srf$ = irf
ReDim a(n, 2, 2), b(n, 2, 2) 'opinion of each agent at each iteration
                                'b(n,2,2) is for the calculation of Lyapunov Exponent
ReDim distancea(n, n, 2), distanceb(n, n, 2) 'distance of opinions of two agents
ReDim cell(n, n, 3)           'allows two agents to communicate if it is equal to 1
ReDim d1(2), d2(2)           'Counts the difference of an agents opinion with his
                                'opinion on the previous iteration
ReDim i1(n), i2(n)           'Show the position of agent i on the square cellular
automaton
ReDim countera(n), counterb(n), g(n), g1(n), g2(n)
ReDim psi(n), k(n)
ProgressBar1.Min = 0
ProgressBar1.Max = iter
initial$ = "_rand1_"         'uses first random initial opinion profile
                                'Provide initial opinions

Open "c:\aa\initialopinions.txt" For Input As #1
For p = 1 To 2
For i = 1 To n
Input #1, a(i, 1, p): Next i, p: Close
'round                        'rounds to the first, second etc. digit
'For i = 1 To n
'    a(i, 1, 1) = Round(a(i, 1, 1), 4)
'    a(i, 1, 2) = Round(a(i, 1, 2), 4)
'Next i

                                'Uniform initial opinions
'a(1, 1, 1) = 0.5: a(1, 1, 2) = 0.5
'For i = 1 To n
'a(i, 1, 1) = i / n: a(i, 1, 2) = 1 - a(i, 1, 1): Next i: Close
                                'if you want to have an agent with initial opinion as you like, e.g. agent
                                45
'a(45, 1, 1) = 0.3 ': a(45, 1, 2) = 0.7
                                'tests sensitivity to initial conditions
'a(2, 1, 1) = a(2, 1, 1) + 0.00001 '0.0000000001
                                'provide values for psi, k
'if you want each agent to have a different psi
'Open "c:\aa\initpsi.txt" For Input As #13
'For i = 1 To n
'Input #13, psi(i)

```

```

'Next i: Close
For i = 1 To n
psi(i) = psil
agents
k(i) = irf
agents
Next i

'If Option7 = True Then GoTo 270
'If Option5 = True Then GoTo 260
'If Option4 = True Then GoTo 250
'If Option6 = True Then GoTo 240
'If Option6 = True Then Slider3.Enabled = True

'CELLULAR AUTOMATA
'Set every agent i to the position (i1(i),i2(i)) of square 10x10 and
allow them to communicate if they are on the same neighborhood,
namely if cell(i,j)=1

230
'p = 3 'topology for opinion p
'If p > 2 Then GoTo 240
'For i = 1 To n
'i1(i) = 1 + Int(i / x): i2(i) = (i Mod x):
'If i2(i) = 0 Then
'  i1(i) = i1(i) - 1
'  i2(i) = x
'End If: Next i
'For i = 1 To n: For j = 1 To n: cell(i, j) = 0: Next j, i
'For i = 1 To n: For j = 1 To n
'If i1(j) - r <= i1(i) And i1(i) <= i1(j) + r And i2(i) = i2(j) Then cell(i, j) = 1
'If i1(i) = i1(j) And i2(j) - r <= i2(i) And i2(i) <= i2(j) + r Then cell(i, j) = 1
'If i1(i) = i1(j) And i2(i) = i2(j) Then cell(i, j) = 1
'Next j, i
240
p = 3
'
'      For p = 1 To 2
If p > 2 Then GoTo 250
For i = 1 To n
i1(i) = 1 + Int(i / x): i2(i) = (i Mod x):
If i2(i) = 0 Then
  i1(i) = i1(i) - 1
  i2(i) = x
End If: Next i
For i = 1 To n
For j = 1 To n
If i1(j) - r <= i1(i) And i1(i) <= i1(j) + r And i2(j) - r <= i2(i) And i2(i) <= i2(j) + r Then
cell(i, j, p) = 1
Else: cell(i, j, p) = 0
End If: Next j, i
'TEST topology
pname$ = p

```

'psi is fixed for all

'k is fixed for all

'Topology choice

'CELLULAR AUTOMATA

*'Set every agent i to the position (i1(i),i2(i)) of square 10x10 and
allow them to communicate if they are on the same neighborhood,
namely if cell(i,j)=1*

'Von Newmann Neighborhood

*'Moore Neighborhood in cellular
'topology for opinion p*

```

Open "c:\aa\agents=" & agentsname$ & "_Moore_Neighborhood_in_cellular_for_opinion_" &
pname$ & "_r=" & rname$ & "_test_topology.txt" For Output As #1
Print #1, "i"; ", "; "j"; ", "; ; "cell(i,j,k)"
For i = 1 To n
For j = 1 To n
Print #1, i; ", "; j; ", "; cell(i, j, p): Next j, i: Close
'
Next p

250
p = 3
'
For p = 1 To 2
If p > 2 Then GoTo 252
For i = 1 To n
For j = 1 To n
cell(i, j, p) = 0
Next j, i
For j = 1 To n
cell(1, j, p) = 1
cell(j, 1, p) = 1
Next j
For i = 1 To n
cell(i, i, p) = 1
Next i
pname$ = p
Open "c:\aa\agents=" & agentsname$ &
"_star_with_agent_1_at_the_center_for_opinion_" & pname$ & "_test_topology.txt" For
Output As #1
Print #1, "i"; ", "; "j"; ", "; ; "cell(i,j,p)"
For i = 1 To n
For j = 1 To n
Print #1, i; ", "; j; ", "; cell(i, j, p): Next j, i: Close
'
Next p

252
p = 3 'topology for opinion p
If p > 2 Then GoTo 254
For i = 1 To n
For j = 1 To n
cell(i, j, p) = 0
Next j, i
For j = 1 To n
cell(2, j, p) = 1
cell(j, 2, p) = 1
Next j
For i = 1 To n
cell(i, i, p) = 1
Next i
pname$ = p
Open "c:\aa\agents=" & agentsname$ &
"_star_with_agent_2_at_the_center_for_opinion_" & pname$ & "_test_topology.txt" For
Output As #1

```

*'STAR with agent 1 at the center
'topology for opinion p*

'TEST topology

'STAR with agent 2 at the center

'TEST

```

Print #1, "i"; ", "; "j"; ", "; ; "cell(i,j,p)"
For i = 1 To n
For j = 1 To n
Print #1, i; ", "; j; ", "; cell(i, j, p): Next j, i: Close
254                                     'STAR with agent 1 at the center and agent 2 and 3 communicate
p = 3 'topology for opinion p
If p > 2 Then GoTo 260
For i = 1 To n
For j = 1 To n
cell(i, j, p) = 0
Next j, i
For j = 1 To n
cell(2, j, p) = 1
cell(j, 2, p) = 1
Next j
For i = 1 To n
cell(i, i, p) = 1
Next i
pname$ = p                                     'TEST
topology
Open "c:\aa\agents=" & agentsname$ &
 "_star_with_agent_1_at_the_center_and_agents_2_3_communicate_for_opinion_" &
pname$ & "_test_topology.txt" For Output As #1
Print #1, "i"; ", "; "j"; ", "; ; "cell(i,j,p)"
For i = 1 To n
For j = 1 To n
Print #1, i; ", "; j; ", "; cell(i, j, p): Next j, i: Close
260                                     'Moore Neighborhood Line
'For p = 1 To 2
p = 3                                     'topology for opinion p
If p > 2 Then GoTo 262
r = 2
For i = 1 To n
For j = 1 To n
If j - r <= i And i <= j + r Then
cell(i, j, p) = 1
Else: cell(i, j, p) = 0
End If: Next j, i
                                     'TEST topology
pname$ = p
Open "c:\aa\agents=" & agentsname$ & "_Moore_Neighborhood_Line_for_opinion_" &
pname$ & "_r=" & rname$ & "_test_topology.txt" For Output As #1
Print #1, "i"; ", "; "j"; ", "; ; "cell(i,j,p)"
For i = 1 To n
For j = 1 To n
Print #1, i; ", "; j; ", "; cell(i, j, p): Next j, i: Close
'Next p
262                                     'Tree line with agent n communicates only whith agent 2
'p = 3                                     'topology for opinion p
'If p > 2 Then GoTo 264

```

```

'For i = 1 To n - 1
'For j = 1 To n - 1
'If j - r <= i And i <= j + r Then
'cell(i, j, p) = 1
'Else: cell(i, j, p) = 0
'End If: Next j, i
'For j = 1 To n
'cell(n, j, p) = 0: cell(j, n, p) = 0
'Next j
'cell(2, n, p) = 1: cell(n, 2, p) = 1: cell(n, n, p) = 1
264                                     'Moore Neighborhood on a Torus-VALID ONLY FOR r=1
'p = 3
'If p > 2 Then GoTo 270
For i = 1 To n: For j = 1 To n: cell(i, j) = 0: Next j, i
For i = 1 To n: For j = 1 To n
If i - r <= j And j <= i + r Then cell(i, j) = 1
If i - x - r <= j And j <= i - x + r Then cell(i, j, p) = 1
If i + x - r <= j And j <= i + x + r Then cell(i, j, p) = 1
If 1 < i And i < x Then
If i + n - x - r <= j And j <= i + n - x + r Then cell(i, j, p) = 1
End If
If n - x + 1 < i And i < n Then
If i - n + x - r <= j And j <= i - n + x + r Then cell(i, j, p) = 1
End If
If i = 1 Then
If j = x Or j = 2 * x Or j = n - x + 1 Or j = n - x + 2 Or j = n Then cell(i, j, p) = 1
End If
If i = x Then
If j = 1 Or j = x + 1 Or j = n - x + 1 Or j = n - 1 Or j = n Then cell(i, j, p) = 1
End If
If i = n - x + 1 Then
If j = 1 Or j = 2 Or j = x Or j = n - x Or j = n Then cell(i, j, p) = 1
End If
If i = n Then
If j = 1 Or j = x - 1 Or j = x Or j = n - 2 * x + 1 Then cell(i, j, p) = 1
End If
If i Mod x = 0 Then
If j = i + x + 1 Then cell(i, j, p) = 0
If j = i - 2 * x + 1 Then cell(i, j, p) = 1
End If
If i Mod x = 1 Then
If j = i - x - 1 Then cell(i, j, p) = 0
If j = i + 2 * x - 1 Then cell(i, j, p) = 1
End If
Next j, i
270                                     'Topology Complete Graph (everyone communicates with
everyone)
'p = 3
For p = 1 To 2
If p > 2 Then GoTo 280

```

```

'You can do it with a big value for r
For i = 1 To n
For j = 1 To n
cell(i, j, p) = 1
Next j, i
'TEST topology
pname$ = p
Open "c:\aa\agents=" & agentsname$ & "_complete_graph_for_opinion_" & pname$
& "_test_topology.txt" For Output As #1
Print #1, "i"; ", "; "j"; ", "; "cell(i,j,p)"
For i = 1 To n
For j = 1 To n
Print #1, i; ", "; j; ", "; cell(i, j, p): Next j, i: Close
Next p
280 'ByPass

'Open files to print the results
If Check2.Value = 0 Then GoTo 10

'opinions 1,2
Open "c:\aa\agents=" & agentsname$ & "_psi=" & psiname$ & "_k=" & srf$ & "_e=" &
bname$ & "_r=" & rname$ & "_iter=" & itername$ & op$ & initial$ & "_opinion1.txt"
For Output As #3
Open "c:\aa\agents=" & agentsname$ & "_psi=" & psiname$ & "_k=" & srf$ & "_e=" &
bname$ & "_r=" & rname$ & "_iter=" & itername$ & op$ & initial$ & "_opinion2.txt"
For Output As #4
If iter > 8000 Then
Open "c:\aa\agents=" & agentsname$ & "_psi=" & psiname$ & "_k=" & srf$ & "_e=" &
bname$ & "_r=" & rname$ & "_iter=" & itername$ & op$ & initial$ &
"_opinion1_finaliterations.txt" For Output As #333
Open "c:\aa\agents=" & agentsname$ & "_psi=" & psiname$ & "_k=" & srf$ & "_e=" &
bname$ & "_r=" & rname$ & "_iter=" & itername$ & op$ & initial$ &
"_opinion2_finaliterations.txt" For Output As #334
End If

'Calculate the number of groups formed
Open "c:\aa\agents=" & agentsname$ & "_psi=" & psiname$ & "_k=" & srf$ & "_e=" &
bname$ & "_r=" & rname$ & "_iter=" & itername$ & op$ & initial$ &
"_groupnumber.txt" For Output As #300
Open "c:\aa\agents=" & agentsname$ & "_psi=" & psiname$ & "_k=" & srf$ & "_e=" &
bname$ & "_r=" & rname$ & "_iter=" & itername$ & op$ & initial$ &
"_group_of_agent.txt" For Output As #301
Open "c:\aa\agents=" & agentsname$ & "_psi=" & psiname$ & "_k=" & srf$ & "_e=" &
bname$ & "_r=" & rname$ & "_iter=" & itername$ & op$ & initial$ &
"_group_cellular.txt" For Output As #302
10 'If Check3.Value = 0 Then GoTo 20
'Opinion 1-2
'Open "c:\aa\agents=" & agentsname$ & "_psi=" & psiname$ & "_k=" & srf$ & "_e=" &
bname$ & "_r=" & rname$ & "_iter=" & itername$ & op$ & "_opinion1-2.txt" For
Output As #6

'Preparing the Calculation of the Lyapunov
Exponent
20 If Check4.Value = 0 Then GoTo 30

```

```

Open "c:\aa\agents=" & agentsname$ & "_psi=" & psiname$ & "_k=" & srf$ & "_e=" &
bname$ & "_r=" & rname$ & "_iter=" & itername$ & op$ & initial$ & "_Lyapunov.txt"
For Output As #8
Print #8, ";", "iteration"; ";", "d0"; ";", "d01"; ";",
Print #8, "d01 / d0=Lyapunov_Number"; ";", "lsum"; ";", "Log(d01 /
d0)=Local_Lyapunov"; ";", "Lyapunov"; ";", Print #8,
d0 = 0.0000000001
For p = 1 To 2
For i = 1 To n
b(i, 1, p) = a(i, 1, p): Next i, p
b(1, 1, 1) = b(1, 1, 1) + d0
lsum = 0
                                'Preparing the calculation of Information Entropy
30 If Check5.Value = 0 Then GoTo 40
Open "c:\aa\agents=" & agentsname$ & "_psi=" & psiname$ & "_k=" & srf$ & "_e=" &
bname$ & "_r=" & rname$ & "_iter=" & itername$ & op$ & initial$ &
"_information.txt" For Output As #2
40 'Open "c:\aa\index.txt" For Append As #101
                                'DO ITERATIONS!!! (Main algorithm)
For z = 0 To iter ' iter=number of iterations executed
ProgressBar1.Value = z
                                'If you want to do 1000000 iteration you print only the last ones
'Printing
    If z > 999000 Then
        Print #333, z, ";",
        For i = 1 To n
            Print #333, a(i, 1, 1); ";",; Next i
        Print #333,
        Print #334, z, ";",
        For i = 1 To n
            Print #334, a(i, 1, 2); ";",; Next i
        Print #334,
        End If
                                'Printing the results only for z<=iter1 Or z >= iter2
'If z <= iter1 Or z >= iter2 Then
                                If z Mod 10 = 0 Then                                'prints only every ten iterations
100 If Check2.Value = 0 Then GoTo 200
    Print #3, z, ";",
    For i = 1 To n
        Print #3, a(i, 1, 1); ";",; Next i: Print #3, dokimimin; ";", dokimimax;
        Print #3, ";", dokimiu; ";", dokimibound; ";", dokimid0; ";",
        Print #3,
        Print #4, z, ";",
        For i = 1 To n
            Print #4, a(i, 1, 2); ";",; Next i: Print #4,
200 'If Check3.Value = 0 Then GoTo 300
    'For i = 1 To n
    'Print #6, z, ";", a(i, 1, 1); ";", a(i, 1, 2);; Print #6,
    'Next i
                                End If                                'prints only every ten iterations

```


300 If Check5.Value = 0 Then GoTo 400

'INFORMATION ENTROPY

'Calculate the Information Entropy counted on a grid 100x100. Makes the program much slower

```
'inf = 0: sumprob1 = 0
'For k1 = 0 To 99
'For k2 = 0 To 99
'c = 0
'For i = 1 To n
'If k1 / 100 < a(i, 1, 1) And a(i, 1, 1) <= (k1 + 1) / 100 And k2 / 100 < a(i, 1, 2) And a(i,
1, 2) <= (k2 + 1) / 100 Then
'c = c + 1
'End If
'Next i
'If c > 0 Then
'  prob = c / n
'  inf = inf + prob * (Log(prob) / Log(2))
'  sumprob1 = sumprob1 + prob
'End If
'Next k2, k1
'Print #2, ";"; z; ";"; -inf;
```

'Calculate the Information Entropy of opinion 1 and 2. Both of them are on a grid 1x100. Each opinion is considered independently

```
inf = 0: sumprob2 = 0
For ka = 0 To 99
c = 0
For p = 1 To 2
For i = 1 To n
If ka / 100 < a(i, 1, p) And a(i, 1, p) <= (ka + 1) / 100 Then
c = c + 1
End If
Next i, p
If c > 0 Then
  prob = c / (2 * n)
  inf = inf + prob * (Log(prob) / Log(2))
  sumprob2 = sumprob2 + prob
End If
Next ka
  If z Mod 1 = 0 And z < 995000 Then
Print #2, ";"; z; ";"; -inf;: Print #2,
  End If
```

```
  If z >= 995000 Then
Print #2, ";"; z; ";"; -inf;: Print #2,
  End If
```

```
400  before = mprob
mprob = 0
For p = 1 To 2
For i = 1 To n
```

'Main Algorithm

```

countera(i) = 0: Suma = 0: counterb(i) = 0: Sumb = 0
c11 = 0
For j = 1 To n
distancea(i, j, p) = Abs(a(i, 1, p) - a(j, 1, p))
If distancea(i, j, p) < 0.01 And cell(i, j, p) = 1 Then c11 = c11 + 1
distanceb(i, j, p) = Abs(b(i, 1, p) - b(j, 1, p))
If distancea(i, j, p) <= bound And cell(i, j, p) = 1 Then
    countera(i) = countera(i) + 1
    Suma = Suma + a(j, 1, p)
End If
If distanceb(i, j, p) <= bound And cell(i, j, p) = 1 Then
    counterb(i) = counterb(i) + 1
    Sumb = Sumb + b(j, 1, p)
End If
Next j
ena = Suma / countera(i): dio = Sumb / counterb(i)
a(i, 2, p) = a(i, 1, p) + (ena - a(i, 1, p)) * k(i)
b(i, 2, p) = b(i, 1, p) + (dio - b(i, 1, p)) * k(i)
If i1(i) = 1 And i2(i) = 1 Then mprob = mprob + c11 / 4
If i1(i) = 1 And i2(i) = x Then mprob = mprob + c11 / 4
If i1(i) = x And i2(i) = 1 Then mprob = mprob + c11 / 4
If i1(i) = x And i2(i) = x Then mprob = mprob + c11 / 4
If i1(i) = 1 And i2(i) > 1 And i2(i) < x Then mprob = mprob + c11 / 6
If i1(i) = x And i2(i) > 1 And i2(i) < x Then mprob = mprob + c11 / 6
If i2(i) = 1 And i1(i) > 1 And i1(i) < x Then mprob = mprob + c11 / 6
If i2(i) = x And i1(i) > 1 And i1(i) < x Then mprob = mprob + c11 / 6
If i1(i) > 1 And i1(i) < x And i2(i) > 1 And i2(i) < x Then mprob = mprob + c11 / 9
Next i, p
mprob = mprob / 2 * n
For i = 1 To n
For p = 1 To 2: d1(p) = a(i, 2, p) - a(i, 1, p)
d2(p) = b(i, 2, p) - b(i, 1, p): Next p
Maxa = 0: Maxb = 0
For ka = 1 To 2
If Abs(d1(ka)) > Maxa Then
Maxa = Abs(d1(ka)): indexa = ka: End If
If Abs(d2(ka)) > Maxb Then
Maxb = Abs(d2(ka)): indexb = ka: End If
Next ka
'If Abs(d1(1)) = Abs(d1(2)) Then
'indexa = 0
'indexb = 0
'End If
'Print #101, indexa; ", "; indexb
If indexa = 1 Then
a(i, 2, 2) = a(i, 2, 2) - psi(i) * d1(1)
End If
If indexa = 2 Then
a(i, 2, 1) = a(i, 2, 1) - psi(i) * d1(2)
End If

```

```

If indexb = 1 Then
b(i, 2, 2) = b(i, 2, 2) - psi(i) * d2(1)
End If
If indexb = 2 Then
b(i, 2, 1) = b(i, 2, 1) - psi(i) * d2(2)
End If
Next i

```

' *next agent*
'We rescale opinions into
[0,1]

```

500 If Option1.Value = False Then GoTo 600

```

```

Max = 0: Min = 0

```

```

For p = 1 To 2

```

```

For i = 1 To n

```

```

If a(i, 2, p) > Max Then Max = a(i, 2, p)

```

```

If a(i, 2, p) < Min Then Min = a(i, 2, p)

```

```

Next i, p

```

```

If Min < 0 Then

```

```

For p = 1 To 2: For i = 1 To n:

```

```

a(i, 2, p) = a(i, 2, p) - Min

```

```

b(i, 2, p) = b(i, 2, p) - Min

```

```

Next i, p

```

```

End If

```

```

If Min < 0 And Max >= 1 Then u = Max - Min

```

```

If Min >= 0 And Max >= 1 Then u = Max

```

```

If Min < 0 And Max <= 1 Then u = 1 - Min

```

```

If Min >= 0 And Max <= 1 Then u = 1

```

```

'u = Max - Min

```

```

If Min < 0 Or Max > 1 Then

```

```

bound = bound / u: d0 = d0 / u

```

```

For p = 1 To 2: For i = 1 To n

```

```

a(i, 2, p) = a(i, 2, p) / u: b(i, 2, p) = b(i, 2, p) / u

```

```

Next i, p

```

```

End If

```

```

dokimimin = Min: dokimimax = Max: dokimiu = u: dokimibound = bound: dokimid0 = d0

```

```

'End of Rescale

```

'Rounding to 1 or 2 or 3 or 4 or 5 decimal places

```

'For i = 1 To n

```

```

'a(i, 2, 1) = Round(a(i, 2, 1), 4)

```

```

'a(i, 2, 2) = Round(a(i, 2, 2), 4)

```

```

'b(i, 2, 1) = Round(b(i, 2, 1), 3)

```

```

'b(i, 2, 2) = Round(b(i, 2, 2), 3)

```

```

'Next i

```

'We don't let any opinion to escape the interval
[0,1] by truncate any opinion that does so.

```

600 If Option2.Value = False Then GoTo 650

```

```

For i = 1 To n

```

```

For p = 1 To 2

```

```

If a(i, 2, p) > 1 Then a(i, 2, p) = 1

```

```

If a(i, 2, p) < 0 Then a(i, 2, p) = 0

```

```

'If b(i, 2, p) > 1 Then b(i, 2, p) = 1
'If b(i, 2, p) < 0 Then b(i, 2, p) = 0
Next p, i
620 If Check4.Value = 0 Then GoTo 650
For i = 1 To n
For p = 1 To 2
If b(i, 2, p) > 1 Then b(i, 2, p) = 1
If b(i, 2, p) < 0 Then b(i, 2, p) = 0
Next p, i

```

'Calculation of the Lyapunov Exponent

```

650 If Check4.Value = 0 Then GoTo 700
d01 = 0
For i = 1 To n
For p = 1 To 2
d01 = d01 + (a(i, 2, p) - b(i, 2, p)) ^ 2: Next p, i
d01 = Sqr(d01)
If z > q Then
lsum = lsum + Log(d01 / d0)
Lyapunov = lsum / (z - q)
End If
If z Mod 1 = 0 Then
Print #8, "; z; "; d0; "; d01; ";
Print #8, d01 / d0; "; lsum; "; Log(d01 / d0); "; Lyapunov;: Print #8,
End If
For p = 1 To 2
For i = 1 To n
b(i, 1, p) = a(i, 2, p) + (d0 / d01) * (b(i, 2, p) - a(i, 2, p))
Next i, p
700

```

*'Calculates the NUMBER OF GROUPS at each iteration
'g(i) is the number of the group that agent i belongs*

```

Print #301, z;
For i = 1 To n
g(i) = n + 1          'temporal value
g1(i) = n + 1         'temporal value
g2(i) = n + 1         'temporal value
Next i
gn = 0: gn1 = 0: gn2 = 0 ' group number
For i = 1 To n
If g(i) > gn Then
gn = gn + 1
g(i) = gn
End If
For j = 1 To n
If Abs(a(i, 2, 1) - a(j, 2, 1)) <= bound And Abs(a(i, 2, 2) - a(j, 2, 2)) <= bound Then
If g(i) < g(j) Then g(j) = g(i)
If g(i) > g(j) Then
For ka = 1 To n
If g(ka) = g(i) Then g(ka) = g(j)
Next ka
g(i) = g(j)

```

```

        gn = gn - 1
    End If
End If
Next j
Next i
For i = 1 To n
    If g1(i) > gn1 Then
        gn1 = gn1 + 1
        g1(i) = gn1
    End If
    For j = 1 To n
        If Abs(a(i, 2, 1) - a(j, 2, 1)) <= bound Then
            If g1(i) < g1(j) Then g1(j) = g1(i)
            If g1(i) > g1(j) Then
                For ka = 1 To n
                    If g1(ka) = g1(i) Then g1(ka) = g1(j)
                Next ka
                g1(i) = g1(j)
                gn1 = gn1 - 1
            End If
        End If
    Next j
Next i
For i = 1 To n
    If g2(i) > gn2 Then
        gn2 = gn2 + 1
        g2(i) = gn2
    End If
    For j = 1 To n
        If Abs(a(i, 2, 2) - a(j, 2, 2)) <= bound Then
            If g2(i) < g2(j) Then g2(j) = g2(i)
            If g2(i) > g2(j) Then
                For ka = 1 To n
                    If g2(ka) = g2(i) Then g2(ka) = g2(j)
                Next ka
                g2(i) = g2(j)
                gn2 = gn2 - 1
            End If
        End If
    Next j
Next i
Print #300, z; ", "; gn; ", "; gn1; ", "; gn2;: Print #300,
Print #301,
If z = iter Or z = iter - 1 Then
Print #302, "Opinion 1";
For i = 1 To n
Print #302, ", "; a(i, 2, 1);
Next i
Print #302,
Print #302, "Opinion 2";

```

```

For i = 1 To n
Print #302, ","; a(i, 2, 2);
Next i
Print #302,
For i = 1 To n
Print #302, ","; g(i);
If i Mod x = 0 Then Print #302,
Next i
Print #302,
For i = 1 To n
Print #302, ","; g1(i);
If i Mod x = 0 Then Print #302,
Next i
Print #302,
For i = 1 To n
Print #302, ","; g2(i);
If i Mod x = 0 Then Print #302,
Next i
Print #302,
For i = 1 To n
Print #302, ","; (a(i, 2, 1) + a(i, 2, 2)) / 2;
If i Mod x = 0 Then Print #302,
Next i
Print #302,
For i = 1 To n
Print #302, ","; a(i, 2, 1);
If i Mod x = 0 Then Print #302,
Next i
Print #302,
For i = 1 To n
Print #302, ","; a(i, 2, 2);
If i Mod x = 0 Then Print #302,
Next i
Print #301,; Print #302,; Print #300,
End If

```

'Ends the program if the system stabilizes in a fixed point

```

s = 0
For i = 1 To n
For p = 1 To 2
If a(i, 1, p) < a(i, 2, p) + 10 ^ (-11) And a(i, 1, p) > a(i, 2, p) - 10 ^ (-11) Then s = s + 1
Next p, i
If s = 2 * n Then End
For p = 1 To 2
For i = 1 To n
a(i, 1, p) = a(i, 2, p)
Next i, p
Next z
Close
End Sub

```

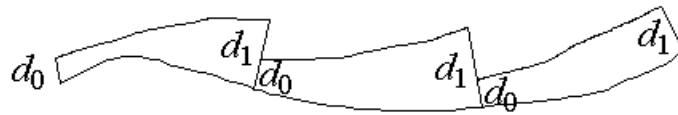
'next iteration

4. Υπολογισμός των Εκθέτων Lyapunov

Στη συνέχεια περιγράφουμε με αυστηρά μαθηματικό τρόπο τον τρόπο υπολογισμού του Μέγιστου Εκθέτη Lyapunov για το Μοντέλο Πολλαπλών Κανονιστικών Ισορροπιών.

Η βασική ιδέα που στηρίζεται ο υπολογισμός του εκθέτη Lyapunov έχει ως εξής: Προφίλ γνώμων x είναι ένα διάνυσμα με 200 συνιστώσες ($x \in \mathbb{R}^{200}$), που η κάθε μια ανήκει στο διάστημα $[0,1]$. Οι πρώτες 100 συνιστώσες αντιστοιχούν στις γνώμες 1 των 100 πρακτόρων και οι υπόλοιπες στη γνώμη 2 των ίδιων πρακτόρων. Θεωρούμε δύο αρχικά προφίλ x_1, x_2 τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους κατά ένα απειροελάχιστο μικρό λάθος $d_0 = 10^{-10}$, με άλλα λόγια η Ευκλείδεια απόσταση των x_1 και x_2 ισούται με d_0 . Εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο του μοντέλου MER ξεχωριστά για το προφίλ γνώμων x_1 και ξεχωριστά για το x_2 , και λαμβάνουμε ως αποτέλεσμα τα προφίλ y_1 και y_2 . Συμβολίζουμε την ευκλείδεια απόσταση των y_1 και y_2 με d_1 . Ο λόγος $\frac{d_1}{d_0} = L$ ποσοτικοποιεί την αύξηση του λάθους. Το λάθος αυξάνεται αν $L > 1$, μειώνεται αν $L < 1$ και παραμένει σταθερό αν $L = 1$. Ο αριθμός L ονομάζεται *Τοπικός Αριθμός Lyapunov* (*Local Lyapunov Number*). Συναντάται επίσης στη βιβλιογραφία ως σχετικό λάθος ανά επανάληψη (relative error per iteration) ή παράγοντας αύξησης του λάθους (error amplification factor). Ο λογάριθμος του τοπικού αριθμού *Lyapunov* ($\log L$) ονομάζεται *Τοπικός Εκθέτης Lyapunov* (*Local Lyapunov Exponent*). Ο λόγος που χρησιμοποιούμε το λογάριθμο είναι καθαρά διαδικαστικός. Επιθυμούμε να βγάλουμε το μέσο όρο της αύξησης ή μείωσης των λαθών. Αν χρησιμοποιήσουμε τους τοπικούς αριθμούς *Lyapunov* θα πρέπει να τους πολλαπλασιάσουμε ενώ αν χρησιμοποιηθούν οι τοπικοί εκθέτες *Lyapunov* θα πρέπει να προστεθούν. Το λάθος στις πράξεις είναι πολύ μεγάλο στην πρώτη περίπτωση ενώ είναι αμελητέο στη δεύτερη.

Κατά συνέπεια, θετικός τοπικός εκθέτης *Lyapunov* σημαίνει ότι εκείνη τη χρονική στιγμή το σύστημα μεγαλώνει τα λάθη, ενώ αρνητικός ότι το σύστημα μικραίνει τα λάθη. Στο επόμενο σχήμα 1 φαίνεται σχηματικά μια τροχιά που αυξάνει την απόσταση d_0 .



Σχήμα 1: Σχηματικό παράδειγμα ενός συστήματος όπου μια μικρή απόκλιση d_0 αυξάνεται και στις τρεις χρονικές στιγμές που απεικονίζονται σε d_1 .

Συνεχίζουμε καταγράφοντας τον τοπικό εκθέτη Lyapunov. Στη συνέχεια διατηρούμε το y_1 ως έχει και στρέφουμε το διάνυσμα y_2 (στο χώρο $\mathcal{R}^{200}$), έτσι ώστε να έχει απόσταση ίση με d_0 από το διάνυσμα y_1 και η κατεύθυνση του διανύσματος $y_2 - y_1 \in \mathcal{R}^{200}$ να παραμείνει σταθερή. Επαναλαμβάνουμε τον αλγόριθμο του μοντέλου MER ξεχωριστά για τα διανύσματα y_1 και y_2 , και καταγράφουμε με τον ίδιο τρόπο τον τοπικό εκθέτη Lyapunov. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων και στη συνέχεια υπολογίζουμε το μέσο όρο των τοπικών εκθετών Lyapunov λ , οποίος ονομάζεται *Ολικός Εκθέτης Lyapunov (global Lyapunov Exponent)*.

Στις περισσότερες περιπτώσεις συστημάτων, τα λάθη ή αλλιώς οι αποκλίσεις άλλες χρονικές στιγμές αυξάνουν και άλλες μειώνονται. Έχει αποδειχθεί (Oseledec, 1968) ότι αν ο μέσος όρος των τοπικών εκθετών Lyapunov συγκλίνει σε έναν αριθμό, τότε αυτός είναι ανεξάρτητος από το σημείο που επιλέγουμε να μετρήσουμε τις αποκλίσεις και χαρακτηρίζει το σύστημα. Ο αριθμός αυτός είναι ο καθολικός εκθέτης Lyapunov και είναι ο πιο αξιόπιστος δείκτης μέτρησης της δυνατότητας πρόβλεψης για ένα δυναμικό σύστημα.

Συνεπώς, αν ο εκθέτης Lyapunov είναι θετικός, αυτό σημαίνει ότι απειροελάχιστα μικρά λάθη αυξάνονται εκθετικά σε κάθε επανάληψη και οι κοντινές τροχιές απομακρύνονται, ενώ αρνητικός εκθέτης σημαίνει ότι οι κοντινές τροχιές έλκονται μεταξύ τους και το λάθος μικραίνει. Θετικός εκθέτης Lyapunov σημαίνει ότι η παραμικρή διαταραχή του συστήματος μεγαλώνει εκθετικά και η δυνατότητα πρόβλεψης χάνεται, δηλαδή ότι το σύστημα είναι χαοτικό. Αρνητικός εκθέτης Lyapunov σημαίνει ότι το σύστημα κατασταλάζει σε ένα σταθερό σημείο (fixed point) ή ένα περιοδικό κύκλο (periodic cycle) (Sprott, 2003). Μηδενικός εκθέτης Lyapunov δείχνει μια οριακά σταθερή τροχιά (marginally or neutrally stable orbit) (Kiel & Elliott, 2000).

Για μια πιο λεπτομερή ανάλυση των ιδιοτήτων των εκθετών Lyapunov και της διαδικασίας υπολογισμού τους βλέπε Peitgen et al (1992), Sprott (2003) ή Alligood et

al (2000/1996). Ένα πρόγραμμα για τον υπολογισμό του εκθέτη Lyapunov στη γλώσσα προγραμματισμού Basic μπορεί να βρεθεί στο Sprott (1998).