

## Πυρηνική σύντηξη

Ο ήλιος για τον άνθρωπο αποτελεί πηγή αστείρευτης ενέργειας, κι αλήθεια τι το πιο επιθυμητό από την παραγωγή ενέργειας στη γη με τον τρόπο που την παράγει ο ήλιος. Τα απαραίτητα υλικά, το δευτέριο και το τρίτιο, είναι διαθέσιμα στη γη σε αφθονία: το πρώτο μπορεί να παραχθεί άμεσα από την ηλεκτρόλυση του νερού, ενώ το δεύτερο παράγεται από το λίθιο που υπάρχει σε αφθονία. Δεν είναι αρκετή όμως η διάθεση των υλικών. Απαιτούνται και οι κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Στον ήλιο το έντονο πεδίο βαρύτητας ένεκα της μεγάλης του μάζας εξασφαλίζει αρκετά μεγάλη πίεση ώστε η θερμοκρασία στην οποία γίνονται αντιδράσεις είναι 20 με 50 εκατομμύρια βαθμοί. Στη γη οι κατάλληλες συνθήκες πρέπει να δημιουργηθούν τεχνητά. Και όσον αφορά την ανεξέλεγκτη παραγωγή ενέργειας αυτό ήταν πολύ εύκολο. Με την έκρηξη μιας βόμβας σχάσης δημιουργούνται οι κατάλληλες συνθήκες ώστε τα υλικά της σύντηξης, που είναι ενσωματωμένα στο κέντρο της βόμβας, υφίστανται σύντηξη, δηλαδή η πίεση και η θερμοκρασία που αναπτύσσονται με την έκρηξη της βόμβας σχάσης είναι αρκετά μεγάλες ώστε να γίνεται σύντηξη των πυρήνων του δευτέρου και του τρίτιου<sup>1</sup>. Η διαφορά είναι ότι η ενέργεια που απελευθερώνεται με αυτό τον τρόπο είναι υπό μορφή έκρηξης και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για πολεμικούς σκοπούς.

Ο δρόμος για την ελεγχόμενη πυρηνική σύντηξη είναι μακρύς και κοπιώδης, με πολλές διακλαδώσεις και αδιέξοδα μονοπάτια. Οι ενεργειακές κρίσεις, συνέπεια κυρίως πολιτικών κρίσεων, συντέλεσαν στην επιχορήγηση των ερευνών γύρω από την πυρηνική σύντηξη. Στην αρχή οι διάφορες χώρες ανέπτυξαν τα δικά τους επιστημονικά προγράμματα, επινοώντας η καθεμιά από τις προηγμένες επιστημονικά χώρες μια ή περισσότερες μεθόδους, διατηρώντας τις «επιτυχίες» τους, που τελικά αποδείχτηκαν αποτυχιές, κάτω από το πέπλο αυστηρής επιτήρησης. Το εγχείρημα για θερμοκρασίες 200 εκατομμυρίων βαθμών έστω μόνο για ένα δευτερόλεπτο, ενώ στην αρχή φαινόταν κάτι το εφικτό, τελικά αποδεικνυόταν όνειρο απατηλό, αφού βέβαια ξοδεύονταν αρκετά εκατομμύρια δολάρια. Στις θερμοκρασίες αυτές οι πυρήνες των ατόμων είναι απογυμνωμένοι από τα ηλεκτρόνιά τους, τα οποία κινούνται με μεγάλες ταχύτητες σε όλο το δοχείο που βρίσκεται το υλικό της σύντηξης. Η κατάσταση αυτή της ύλης, δηλαδή του ηλεκτρικά φορτισμένου αερίου, ονομάζεται πλάσμα και το «πλάσμιό» της γίνεται με εξωτερικά μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία. Το πλάσμα

---

<sup>1</sup> Ο Ανδρέας Θεοφίλου, δρ. θεωρητικός φυσικός, ερευνητής στο ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ», ήταν μέλος της Εκτελεστικής Επιτροπής του Εργαστηρίου Πυρηνικής Σύντηξης της Ε.Ε., JET, τα έτη 1981-93.

μπορεί να βρεθεί σε διαφορετικές φάσεις (καταστάσεις) και είναι αρκετά εύπλαστο, όπως η φωτιά από ξύλα. Έτσι ξαφνικά μπορεί να αλλάξει κατάσταση ή και να σβήσει εντελώς. Η επαφή των ηλεκτρονίων με τα τοιχώματα του δοχείου εμποδίζεται από το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ισχυρά ηλεκτρικά ρεύματα που διαρρέουν ένα σπειροειδές πηνίο που περιβάλλει το δοχείο της σύντηξης. Κάθε απόκλιση της τροχιάς του ηλεκτρονίου από τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου συνεπάγεται μια κάθετη δύναμη, που το αναγκάζει να κινηθεί σε σπειροειδή τροχιά. Οι άξονες των τροχιών αυτών είναι οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Έτσι η επαφή με τα τοιχώματα του δοχείου αποφεύγεται. Το ίδιο συμβαίνει και με τους πυρήνες του δευτέρου και του τρίτου, που όμως οι σπειροειδείς τροχιές τους είναι αντίθετης φοράς, λόγω του ότι τα ηλεκτρικά τους φορτία είναι αντίθετα από εκείνα των ηλεκτρονίων. Ο έλεγχος της συμπεριφοράς του αποδείχτηκε πολύ δύσκολος, παρά τον αποτελεσματικό εγκλεισμό του...

Τα αδιέξοδα αυτά έπεισαν τους επιστήμονες ότι ο μόνος δρόμος για την επιτυχία ήταν ο συντονισμός των προσπαθειών τους μέσω διεθνούς συνεργασίας. Ο ψυχρός πόλεμος δεν άφηνε τέτοια περιθώρια. Το πρώτο βήμα έγινε το 1956 από το Σοβιετικό φυσικό Κουρτσατόφ με την ευκαιρία της επίσκεψης του Χρουστσόφ στη Βρετανία. Ο Ρώσος φυσικός έδωσε σημαντικές πληροφορίες για το πρόγραμμα πυρηνικής σύντηξης της χώρας του, που τόσο οι Άγγλοι όσο και οι Αμερικανοί επιστήμονες, στους οποίους διαβιβάστηκε αντίγραφο της ομιλίας, εντυπωσιάστηκαν με την πρωτοτυπία των ιδεών πάνω στις οποίες στηριζόταν η σοβιετική συσκευή που έφερε το όνομα τοκαμάκ. Το τοκαμάκ, που βασιζόταν στις ιδέες των Ζαχάροφ και Ταμ, έμελλε να είναι η συσκευή που αργότερα υιοθέτησαν όλες οι μεγάλες χώρες και στην οποία στηρίζεται σήμερα η έρευνα για τη σύντηξη.

Οι εκτιμήσεις των επιστημόνων ότι βρισκόνταν ακόμη μακριά από την εμπορική εκμετάλλευση της πυρηνικής σύντηξης και γι' αυτό έπρεπε να γίνεται κοινοποίηση των αποτελεσμάτων, ώστε να γίνεται καλύτερη αξιοποίηση των οικονομικών πόρων που διατίθενταν για το σκοπό αυτόν, δεν έπειθαν τους πολιτικούς. Ο επικεφαλής της Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας των ΗΠΑ Lewis Strauss, ένας πρώην τραπεζίτης, έβλεπε την ομιλία του Κουρτσατόφ σαν σοβιετικό ελιγμό, για να πέσουν οι ΗΠΑ στην παγίδα να δημοσιεύσουν τα δικά τους αποτελέσματα, τα οποία θα εκμεταλλεύονταν οι Σοβιετικοί για την κατασκευή πυρηνικών όπλων. Μάταια οι Αμερικανοί επιστήμονες προσπαθούσαν να τον πείσουν ότι οι Σοβιετικοί είχαν αφθονία όπλων, μαζί και βόμβα θερμοπυρηνικής σύντηξης που η δοκιμή της έγινε το 1953<sup>2</sup>. Τη χαριστική βολή σχετικά με την πρόοδο της επιστήμης στη Σοβιετική Ένωση, η Δύση τη δέχτηκε τον Οκτώβρη του 1957, όταν η Σοβιετική Ένωση εκτόξευσε τον πρώτο τεχνητό δορυφόρο. Ο Στράους έμεινε άναυδος όχι μόνο από το επιστημονικό και κυρίως τεχνολογικό επίτευγμα των κομμουνιστών, αλλά και από την τεράστια απήχηση που είχε αυτό στους λαούς όλου του κόσμου. Για την αντίκρουση του εγχειρήματος ζήτησε να κατασκευαστεί επείγοντως μια μηχανή σύντηξης που θα παρουσιαζόταν στη διεθνή διάσκεψη για την πυρηνική ενέργεια, η οποία θα γινόταν στη Γενεύη το 1958. Και όταν οι επιστήμονες του είπαν ότι αυτό ήταν ανέφικτο, τους διέταξε να κατασκευάσουν μια ψεύτικη συσκευή που εκτός από εκλάμψεις πλάσματος θα παρείχε και νετρόνια, όχι όμως νετρόνια σύντηξης αλλά μια απλή πηγή νετρονίων<sup>2</sup>.

Η διάσκεψη της Γενεύης συνέβαλε στο να φέρει τους επιστήμονες της σύντηξης κοντά,

ώστε να μπουν κάποιες βάσεις συνεργασίας, παρότι η επιτήρησή τους από ανθρώπους της ασφαλείας ήταν αυστηρή και τα συνήθη ευτράπελα με πράκτορες που συμβαίνουν σε αυτές τις περιπτώσεις δεν έλειψαν. Οι Σοβιετικοί επιστήμονες εντυπωσιάστηκαν από την κάλπικη αμερικανική συσκευή σύντηξης, αφού, για να φανεί του κατορθώματος το αληθές, είχαν και μετρητές που μετρούσαν νετρόνια που ισχυρίζονταν ότι παράγονταν από τη σύντηξη. Και τα νετρόνια ήταν αρκετά ώστε ο κάθε επισκέπτης έπαιρνε επαρκή δόση. Τότε όμως η ραδιενέργεια ήταν κάτι στο οποίο δεν δινόταν ιδιαίτερη σημασία... Βέβαια πολλοί είχαν προβληματιστεί για το «μυστικό» της συσκευής αυτής. Παρότι το αμερικανικό «επίτευγμα» δεν έπεισε ώστε να ανισταθμίσει τον αντίκτυπο του «σπούτνικ», οι Σοβιετικοί επιστήμονες παράγγειλαν αμέσως να έρθουν στη Γενεύη πραγματικές συσκευές που έδειχναν ότι ήταν αρκετά πιο προχωρημένοι από τους συναδέλφους τους της Δύσης.

Εν τω μεταξύ η κατασκευή της συσκευής τοκαμάκ στη Σοβιετική Ένωση είχε προχωρήσει αρκετά, με τροποποιήσεις που είχε κάνει ο Αρτσιμόβιτς, ένας διάσημος φυσικός και μηχανικός, που ακολούθησε το επάγγελμα του επιστήμονα αφού ενηλικιώθηκε αρκετά ώστε δεν μπορούσε πλέον να εξασκεί το επάγγελμα του πυγμαχού. Ο πρώην πυγμαχός, εκτός του ότι διαμόρφωσε την πρώτη εξελίξιμη συσκευή σύντηξης, σε κάθε διεθνές συνέδριο δεν δίσταζε να αποκαλύπτει τα «λάθη των Αμερικανών επιστημόνων» που οδηγούσαν σε υπερβολική αισιοδοξία για τη σύντηξη. Τελικά οι Αμερικανοί αποφάσισαν το 1969 να κατασκευάσουν την πρώτη συσκευή τοκαμάκ για να δείξουν στην πράξη τα «λάθη» του Αρτσιμόβιτς. Οι Άγγλοι εν τω μεταξύ είχαν συνεργαστεί με τους Σοβιετικούς εγκαθιστώντας στο εργαστήριο του Αρτσιμόβιτς ηλεκτρονικούς υπολογιστές, που βοήθησαν σημαντικά στην αποθήκευση και επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων του τοκαμάκ. Η μεγάλη τους έκπληξη ήταν η ακρίβεια των μετρήσεων των Σοβιετικών, παρότι χρησιμοποιούσαν πολύ απλές συσκευές μέτρησης.

Πεισμένοι οι Βρετανοί για τη δυνατότητα της σοβιετικής συσκευής, αποφάσισαν να πετάξουν όλες τις δικές τους και να προχωρήσουν στην κατασκευή ενός μεγάλου τοκαμάκ. Πλην όμως τα οικονομικά τους δεν επαρκούσαν με κανέναν τρόπο και έτσι αποφάσισαν να προχωρήσουν στο πλαίσιο ενός μεγάλου προγράμματος της ΕΟΚ. Σε αυτή τους την προσπάθεια οι Άγγλοι βρήκαν συμμάχους τους Γάλλους, που είχαν ήδη προχωρήσει στην κατασκευή μιας μηχανής τοκαμάκ. Οι Γερμανοί αρχικά είχαν επιφυλάξεις, επιμένοντας στη μηχανή τύπου stellarator, που η ιδέα για την κατασκευή της ξεκίνησε από τις ΗΠΑ και στηριζόταν σε μαγνητικές διατάξεις που προσομοίαζαν με εκείνες των άστρων. Το τοκαμάκ της ΕΟΚ, συμφώνησαν να φέρει το όνομα JET, από τα αρχικά Joint European Torus (Κοινός Ευρωπαϊκός Τόρος), ώστε να ικανοποιηθούν και οι Γερμανοί που η λέξη τοκαμάκ τους έδινε στα νεύρα, καθότι ρωσικής προέλευσης. Οι διαστάσεις της νέας συσκευής θα ήταν περίπου αυτές ενός πραγματικού αντιδραστήρα που θα παρήγε ενέργεια από την πυρηνική σύντηξη. Ένας από τους σκοπούς του προγράμματος ήταν να επιτύχει συνθήκες κρισιμότητας, που για την περίπτωση αυτή έπρεπε η θερμοκρασία του πλάσματος (υψηλά ιονισμένου αερίου) δευτέρου-τρίτου να φτάσει για περίπου ένα δευτερόλεπτο τα 200 εκατομμύρια βαθμούς, ενώ παράλληλα η πυκνότητά του έπρεπε να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να γίνεται ικανοποιητικός αριθμός συγκρούσεων που θα οδηγούσαν στη σύντηξη.

Στις θερμοκρασίες αυτές η δομή μεγάλου αριθμού ατόμων καταρρέει, δηλαδή τα άτομα

ξεχωρίζουν στους ατομικούς πυρήνες που κινούνται μέσα σε ένα σύννεφο από άτακτα κινούμενα ηλεκτρόνια. Οι αστέρες, όπως για παράδειγμα ο ήλιος, βρίσκονται σε κατάσταση πλάσματος. Σε παρόμοια κατάσταση βρίσκεται ένας λαμπτήρας Νέον, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται στις διαφημίσεις, αν και σε αυτή την περίπτωση τα ιονισμένα άτομα είναι λίγα. Όσο η πυκνότητα (συγκέντρωση) μεγαλώνει, τόσο συχνότερες είναι οι συγκρούσεις των πυρήνων, όπως όταν στους δρόμους έχουμε μεγάλο αριθμό αυτοκινήτων έχουμε και πολλά ατυχήματα. Η μεγάλη θερμοκρασία εξασφαλίζει ότι οι κρούσεις των πυρήνων του δευτέρου και του τρίτου γίνονται με μεγάλη κινητική ενέργεια, ώστε ο ένας να πλησιάσει τον άλλο αρκετά και να γίνει ένας μεγάλος πυρήνας, που μετατρέπεται σε ευσταθή εκπέμποντας ένα σωματίδιο που λέγεται νετρόνιο με μεγάλη κινητική ενέργεια. Έτσι έχουμε παραγωγή ενέργειας την οποία μπορεί να αξιοποιήσουμε.

Η εκμετάλλευση της ενέργειας που παράγεται από τη σύντηξη θα γίνεται με την απορρόφηση των νετρονίων της αντίδρασης, από ένα στρώμα λίθιου που θα περιβάλλει το δοχείο μέσα στο οποίο θα βρίσκεται το πλάσμα, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του στρώματος αυτού. Η απαγωγή της θερμότητας από ένα ρευστό θα αξιοποιείται για την κίνηση μιας στροβιλογεννήτριας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο πυρήνας του λίθιου απορροφώντας ένα νετρόνιο μετατρέπεται σε ήλιο και τρίτιο. Το τρίτιο, όπως τονίσαμε στην αρχή, αποτελεί ένα από τα καύσιμα της σύντηξης και μετά από κατάλληλη επεξεργασία θα χρησιμοποιείται σαν καύσιμο. Το γεγονός ότι το υλικό αυτό είναι ραδιενεργό δεν εμπνέει ανησυχίες. Επειδή στο στάδιο καθαρισμού του τρίτιου υπάρχει κίνδυνος διαρροής στο περιβάλλον, οι σωλήνες στο εργοστάσιο επεξεργασίας του φέρουν διπλά τοιχώματα. Έτσι, τυχόν διαρροή από βλάβη στον ένα σωλήνα δεν θα οδηγήσει ούτε καν σε ραδιενεργό μόλυνση του χώρου του εργοστασίου, καθότι το αέριο της διαρροής θα συγκρατείται στο δεύτερο σωλήνα. Αλλά και οι ελάχιστες ποσότητες, που για κάποια απρόβλεπτη αιτία μπορεί να διαρρεύσουν στο περιβάλλον, δεν θα έχουν ουσιαστική σημασία, εφόσον θα ανέβουν στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και θα χάσουν γρήγορα τη ραδιενεργειά τους, εφόσον ο χρόνος ημιζωής των πυρήνων του τρίτιου είναι 12 χρόνια. Ας υπενθυμίσουμε ότι τόσο το δευτέριο όσο και το τρίτιο χημικά συμπεριφέρονται όπως το κοινό υδρογόνο. Οι χρησιμοποιούμενες ποσότητες του υλικού αυτού μέσα στο δοχείο σύντηξης είναι μόνο μερικά γραμμάρια και δεν υπάρχει περίπτωση έκρηξης όταν συμβεί κάποιο ατύχημα. Ένα τέτοιο ατύχημα μπορεί να οδηγήσει σε απότομη πτώση της πίεσης εσωτερικά του δοχείου σύντηξης και ρήξη προς τα μέσα. Έτσι, τυχόν διαρροή αερίου θα παραμείνει στο εσωτερικό του κτιρίου, που, ας σημειωθεί, θα έχει αρκετό πάχος.

Το άλλο υλικό που παράγεται από τη σύντηξη, το ήλιο, είναι από τα πιο αδρανή αέρια. Συχνά οι περιβαλλοντικές οργανώσεις αναφέρονται στο ήλιο, σαν ένα επικίνδυνο υλικό, διότι οι πυρήνες του αποτελούν τη ραδιενέργεια  $\alpha$ . Ραδιενέργεια  $\alpha$  όμως σημαίνει ιονισμένοι, δηλ. ηλεκτρικά φορτισμένοι πυρήνες ηλίου που κινούνται με μεγάλες ταχύτητες, ώστε συγκρουόμενοι με τα μόρια της ύλης προκαλούν αλλοίωσή τους. Τα ουδέτερα άτομα του ηλίου είναι που κινούνται με πολύ μικρές κινητικές ενέργειες, όμοιες με αυτές των μορίων του αέρα, και είναι εντελώς αβλαβή, διότι δεν σχηματίζουν χημικές ενώσεις. Έτσι ουσιαστικά μερικοί οικολόγοι είναι σαν να ταυτίζουν τον κίνδυνο από μια πέτρα που κινείται και μπορεί να τους χτυπήσει στο κεφάλι με μια πέτρα ακίνητη μέσα σε ένα χωράφι...

Αυτό που πρέπει να προσέξει κανείς όσον αφορά τις επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι ότι τα νετρόνια της σύντηξης, πριν προσβάλλουν το στρώμα του λίθιου, πρέπει να διαπεράσουν τα τοιχώματα του δοχείου μέσα στο οποίο είναι εγκλεισμένο το πλάσμα, κάνοντάς τα ραδιενεργά. Έτσι, όταν το δοχείο της σύντηξης γίνει άχρηστο, λόγω καταπόνησης από το συνεχή βομβαρδισμό με νετρόνια, πρέπει να παραμείνει αρκετά χρόνια υπό επιτήρηση, μέχρις ότου η ραδιενέργειά του πέσει σε χαμηλά επίπεδα. Ο χρόνος ημιζωής των ραδιενεργών υλικών που παράγονται στα τοιχώματα του δοχείου αυτού είναι της τάξης των μερικών δεκάδων χρόνων. Έτσι η επιτήρησή τους δεν είναι κάτι το ανέφικτο, όπως με τους πυρηνικούς αντιδραστήρες σχάσης, που τα ίδια τα προϊόντα της σχάσης είναι κατά κανόνα μακρόβια ραδιενεργά υλικά.

Από όλες τις μέχρι τώρα μελέτες φαίνεται ότι η πυρηνική σύντηξη είναι η πιο φιλική για το περιβάλλον μέθοδος παραγωγής ενέργειας. Αντίθετα, τα προϊόντα που παράγονται από την καύση του άνθρακα και του πετρελαίου στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής είναι επιβλαβή για το περιβάλλον, όχι μόνο λόγω των τοξικών υλικών που παράγονται από την καύση, αλλά και λόγω του μη τοξικού διοξειδίου του άνθρακα που συμβάλλει στην ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου: λόγω του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, η υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπεται λόγω της θερμοκρασίας της γης εμποδίζεται να διαφύγει στην ατμόσφαιρα. Αντίθετα, η ακτινοβολία που προσπίπτει στη γη δεν εμποδίζεται από τα μόρια του διοξειδίου του άνθρακα, διότι το φως του ήλιου δεν απορροφάται από τα μόρια αυτά λόγω του ότι αντιστοιχεί σε μήκη κύματος διαφορετικής περιοχής. Έτσι με την αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα έχουμε αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης, η οποία τελικά επηρεάζει τις κλιματολογικές συνθήκες.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι από περιβαλλοντικής πλευράς η πυρηνική σύντηξη αποτελεί την πιο προσφιλή για το περιβάλλον ενέργεια σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα. Αυτό δεν συνεπάγεται άμεσα και υιοθέτησή της. Η οικονομική διάσταση ενός θέματος εξακολουθεί να είναι ο καθοριστικός, αν και όχι ο μοναδικός, παράγοντας στην επιλογή μεταξύ πολλών εναλλακτικών επιλογών. Το ενεργειακό πρόβλημα παρουσιάζεται κατά κανόνα σαν πρόβλημα ενεργειακών πόρων, που η αυξημένη τους ζήτηση, που είναι συνέπεια της αύξησης του πληθυσμού και του βιοτικού επιπέδου των λαών, θα οδηγήσει σε εξάντληση αυτών των πόρων. Η άποψη της εξάντλησης των πλουτοπαραγωγικών πόρων εμφανίστηκε αρχικά από το Σκοτσέζο οικονομολόγο Μάλθους τον περασμένο αιώνα. Θεωρώντας ότι η καλλιεργήσιμη γη είναι περιορισμένη, έβγαλε το συμπέρασμα ότι η αύξηση του πληθυσμού της γης θα οδηγήσει σε πείνα και ως εκ τούτου, πάλι κατά τον Μάλθους, καλοί είναι οι πόλεμοι για να ελαττώνεται και ο περισεύων πληθυσμός της γης...

Όμοια θέση ισχύει και για τα διάφορα ορυκτά. Ο Μάλθους δεν διαψεύστηκε μόνο από τους οικονομολόγους, αλλά και από τα ιστορικά δεδομένα. Η αύξηση του πληθυσμού δεν οδήγησε σε πείνα, ούτε οδήγησε στην ανάγκη για νέες εκχερσώσεις δασών με σκοπό την αύξηση των καλλιεργήσιμων εκτάσεων. Η αυξημένη ζήτηση ενός προϊόντος οδηγεί αφενός μεν στην αύξηση της τιμής του, αλλά ταυτόχρονα οδηγεί και στην αντικατάστασή του από άλλα προϊόντα, ενώ παράλληλα αναπτύσσονται μέθοδοι για τον πιο οικονομικό τρόπο παραγωγής του. Ειδικά σήμερα που υπάρχει ισχυρή σύζευξη μεταξύ επιστημονικής έρευνας και τεχνολογίας, η αντιμετώπιση των διάφορων προβλημάτων που σχετίζονται με την αυ-

ξηση της ζήτησης είναι πιο έγκαιρη και πιο αποτελεσματική. Στον τομέα των τροφίμων στις βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες υπάρχει υπερπαραγωγή, ώστε μεγάλο μέρος της να καταστρέφεται για να μην πέσει η τιμή τους. Το ότι ένα μέρος του πληθυσμού της γης υποφέρει ακόμη και στην εποχή μας από πείνα είναι συνέπεια της έλλειψης χρημάτων και όχι της έλλειψης τροφίμων.

Ένα άλλο παράδειγμα, που δείχνει ότι η συντηρητική θεώρηση της οικονομίας είναι λανθασμένη, είναι η αντικατάσταση του ξυλάνθρακα από κοκ στη διαδικασία παραγωγής του χάλυβα, όταν τα δάση των βιομηχανικά αναπτυγμένων χωρών, στην περίοδο της βιομηχανικής επανάστασης, άρχισαν να εξαντλούνται.

Στον τομέα της ενέργειας, η μυική δύναμη του ανθρώπου αντικαταστάθηκε με αυτή των ζώων και στη συνέχεια με αυτή του ανέμου, του νερού και τελικά των μηχανών, που αξιοποιούν την ενέργεια του πετρελαίου και του άνθρακα. Η υπερβολική μόλυνση από αυτά τα καύσιμα οδηγεί στην αντικατάστασή τους με φυσικό αέριο, στα εργοστάσια που βρίσκονται κοντά στα αστικά κέντρα. Ένα άλλο στοιχείο όσον αφορά την ενέργεια είναι ότι η σχετικά χαμηλή τιμή της οδηγεί σε υπερβολική σπατάλη. Έτσι π.χ. μέχρι πρόσφατα τα σπίτια χτίζονταν χωρίς μονώσεις, ενώ ακόμη και σήμερα οι διπλοί υαλοπίνακες στα κτίρια θεωρούνται αντιοικονομικοί, ακόμη και στην Αγγλία, που το κλίμα της δεν είναι τόσο ζεστό όσο στην Ελλάδα. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι δεν κινδυνεύουμε από εξάντληση των ενεργειακών πόρων, μιας και με την ανάπτυξη της επιστήμης είναι δυνατό να αξιοποιηθούν ενεργειακοί πόροι και παράλληλα είναι δυνατό να γίνει εξοικονόμηση ενέργειας με τον καλύτερο σχεδιασμό των διάφορων συσκευών και οικοδομικών κατασκευών.

Όσον αφορά τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, παρά το ότι γενικά είναι φιλικές στο περιβάλλον, η μέχρι σήμερα εφαρμογή τους είναι περιορισμένη λόγω του υψηλού κόστους τους. Το κόστος θα πέσει δραματικά εφόσον γίνει μαζική εφαρμογή τους. Αν για παράδειγμα υπάρχει μεγάλη ζήτηση φωτοβολταϊκών στοιχείων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τότε θα μπορεί να παράγονται μαζικά, χωρίς τις υψηλές προδιαγραφές που απαιτεί η ηλεκτρονική βιομηχανία. Έτσι το κόστος τους θα πέσει δραματικά. Πλην όμως οι βιομηχανικά αναπτυγμένες περιοχές δεν ενδιαφέρονται για τέτοιες εφαρμογές, λόγω της περιορισμένης ηλιοφάνειάς τους. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που ώθησαν την Ευρωπαϊκή Ένωση να δώσει έμφαση στην πυρηνική σύντηξη, παρά το ότι το πρόγραμμα αυτό της στοιχίζει περισσότερο από 200 εκατομμύρια Ecu το χρόνο. Αλλά και η πυρηνική σύντηξη, εφόσον γίνει δυνατή σε βιομηχανική κλίμακα, είναι αμφίβολο αν το υψηλό κόστος θα την κάνει εμπορικά ανταγωνίσιμη με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα γύρω στο 2030, που αναμένεται ότι το πρόγραμμα της σύντηξης θα έχει ολοκληρωθεί.

Το εργοστάσιο της πυρηνικής σύντηξης αποτελεί την πιο σύνθετη μηχανή που έχει φτιάξει μέχρι σήμερα ο άνθρωπος και στην τελική της μορφή θα είναι ακόμη πιο σύνθετη. Η πολυπλοκότητα είναι και η αχίλλεια πτέρνα της. Ας δούμε μερικές από τις συνιστώσες αυτής της μηχανής<sup>3,4</sup>.

Όπως είδαμε προηγουμένα, για τον περιορισμό του πλάσματος, ώστε να μην καίει τα τοιχώματα του δοχείου στα οποία βρίσκεται, είναι απαραίτητο το δοχείο της σύντηξης που, ως σημειωθεί, έχει σχήμα τόρου (σαμπρέλας) να βρίσκεται μέσα σε ένα πανίσχυρο μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό δημιουργείται διαβιβάζοντας μεγάλης έντασης ηλεκτρικό ρεύμα μέσα

από ένα σπειροειδές πηνίο που περιβάλλει τον τόρο. Για τη θέρμανση του υλικού της σύντηξης είναι απαραίτητοι ισχυροί ηλεκτρομαγνήτες που έχουν ύψος όσο μια τριώροφη πολυκατοικία και ζυγίζουν δεκάδες τόνους. Λόγω της αλληλεπίδρασης των μαγνητικών πεδίων με το ηλεκτρικό ρεύμα του τόρου, δημιουργούνται τεράστιες δυνάμεις που μπορεί να συνθλίψουν τη συσκευή ή να προκαλέσουν μετατόπιση των ηλεκτρομαγνητών. Ας σημειώσουμε ότι το ρεύμα που διαρρέει τον τόρο είναι συνέπεια της κίνησης των πυρήνων του δευτέρου και του τρίτου καθώς και των ηλεκτρονίων που κινούνται αντίθετα λόγω του ότι έχουν αντίθετο με τους πυρήνες ηλεκτρικό φορτίο. Όταν η συσκευή λειτουργεί στη σημερινή της μορφή απαιτούνται τεράστιες ποσότητες ηλεκτρικής ισχύος, που στην περίπτωση του JET είναι της τάξης των 50 μεγαβάτ. Για την παραγωγή της ισχύος αυτής λειτουργεί μια ηλεκτρική γεννήτρια άμεσα συνδεδεμένη με το τοκαμάκ. Η γεννήτρια αυτή παίρνει την ενέργειά της από έναν τεράστιας ροπής αδράνειας σφόνδυλο, που περιστρέφεται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα που παίρνει την ενέργειά του από το κεντρικό δίκτυο διανομής (ΔΕΗ). Έτσι για την τεράστια ποσότητα ενέργειας που απαιτείται σε διάστημα μερικών λεπτών, για να λειτουργήσει το τοκαμάκ και να ανέβει η θερμοκρασία του μείγματος δευτέρου τρίτου στα 200 εκατομμύρια βαθμούς, είναι απαραίτητο ένα υψηλών προδιαγραφών εργοστάσιο καθώς και ειδικοί αγωγοί ρεύματος που μπορεί να μεταφέρουν ρεύματα της τάξης των εκατομμυρίων βολτ χωρίς να καίγονται. Επειδή όμως η θέρμανση του πλάσματος με τον τρόπο που περιγράψαμε δεν είναι επαρκής, στην περιφέρεια του τοκαμάκ είναι εγκατεστημένος ένας επιταχυντής που επιταχύνει τους πυρήνες του υδρογόνου και στη συνέχεια τους εκσφενδονίζει μέσα στο πλάσμα, αφού προηγούμενα γίνουν ουδέτερα άτομα. Αυτό είναι απαραίτητο διότι σαν φορτισμένοι πυρήνες θα απωθούνταν από το πλάσμα. Για τη διέλευση του υδρογόνου στο πλάσμα είναι απαραίτητο να ανοιγοκλείσουν τόσο γρήγορα οι ειδικές προς τούτο θύρες, ώστε να μη γίνει διαφυγή υδρογόνου έξω από τη συσκευή. Και ενώ αυτά είναι εφικτά, το κόστος τους είναι τεράστιο λόγω των υψηλών προδιαγραφών που απαιτούνται. Μια άλλη εναλλακτική λύση για τη θέρμανση είναι η χρήση ειδικών ραδιοσυχνοτήτων μεγάλης ενέργειας. Και αυτή η λύση όμως είναι πολυέξοδη. Επιπλέον για την επίτευξη των υψηλών θερμοκρασιών, σύμφωνα με τη μέχρι τώρα πείρα, χρειάζονται τουλάχιστον δυο συσκευές διαφορετικού τύπου. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, για την αξιοποίηση της ενέργειας της σύντηξης είναι απαραίτητη η μεταφορά της θερμότητας που παράγεται στο στρώμα του λίθιου σε ένα συμβατικό ατμοστρόβιλο ο οποίος θα κινεί μια ηλεκτρική γεννήτρια. Θα μπορούσαμε να περιγράψουμε και άλλες συσκευές που είναι ενσωματωμένες στο τοκαμάκ, νομίζω όμως αυτές που ήδη ανέφερα είναι επαρκείς για να δείξουν την πολυπλοκότητα της μηχανής σύντηξης και επομένως και του κεφαλαιουχικού της κόστους.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η ενέργεια της σύντηξης θα έχει μεγάλο κόστος, ένεκα του κόστους της ίδιας της μηχανής και όχι του καυσίμου. Παρά το ότι μπορεί εν τω μεταξύ να έχουμε κάποιες επιστημονικές και τεχνολογικές προόδους που θα μπορούσαν να μειώσουν το κόστος, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του γράφοντος, που ας σημειωθεί έζησε το πρόγραμμα της πυρηνικής σύντηξης από μέσα, συμμετέχοντας για δώδεκα χρόνια στην Εκτελεστική Επιτροπή του JET, η ανταγωνιστικότητα της πυρηνικής σύντηξης μέχρι και το 2050 είναι αμφίβολη. Πρέπει να πάρει κανείς υπόψη ότι η ανάπτυξη της επιστήμης και της τεχνολογίας δεν συμβάλλει μόνο στην ανάπτυξη νέων μεθόδων παραγωγής ενέργειας, αλλά

μειώνει δραστικά το κόστος των παλιών. Έτσι η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έδωσε τη δυνατότητα καλύτερης ανάλυσης των γεωφυσικών και γεωλογικών δεδομένων για τον εντοπισμό των διάφορων ορυκτών, επεκτείνοντας τη σφαίρα αναζήτησής τους σε μεγαλύτερα βάθη. Με την τελειοποίηση των γεωτροπάνων, μειώθηκε δραστικά το κόστος εξόρυξης υδρογονανθράκων, ενώ έγινε οικονομική η εκμετάλλευση κοιτασμάτων που βρίσκονται σε μεγαλύτερη βάθη. Για το λόγο αυτό, οι εκθέσεις που παρουσιάζονταν στη δεκαετία του 1970 από διάφορους οργανισμούς, όπως π.χ. τον ΟΟΣΑ, καθώς και από μεμονωμένους μελετητές, που προέβλεπαν εξάντληση των καυσίμων στη δεκαετία του 1990 και ως εκ τούτου δραματική αύξηση της τιμής τους, δεν επαληθεύτηκαν. Κατά την άποψη του γράφοντος, οι εκθέσεις αυτές δεν αγνοούσαν απλώς ηθελημένα ή άθελα τις συνέπειες των εξελίξεων της τεχνολογίας, αλλά είχαν σκοπό να προωθήσουν την πυρηνική ενέργεια σχάσης, την οποία παρουσίαζαν ως μόνη διέξοδο.

Η σχετικά πρόσφατη απόφαση των ΗΠΑ να περικόψουν δραστικά το πρόγραμμά τους για έρευνα στην πυρηνική σύντηξη ενισχύει την άποψή μου για επάρκεια των συμβατικών καυσίμων τον επόμενο αιώνα. Η απόφαση αυτή δυσχεραίνει την κατασκευή του μεγάλου τοκαμάκ του προγράμματος ITER, που αποτελεί κοινοπραξία των ΗΠΑ, της Ευρωπαϊκής Ένωσης, της Ιαπωνίας και της Ρωσίας. Το πλήγμα αυτό συνδυάστηκε με τα προβλήματα που προέκυψαν στη θεωρητική σχεδίασή της, λόγω αμφισβήτησης της άποψης που υποστηρίζει ότι μια μεγαλύτερη μηχανή από αυτή του JET θα οδηγήσει σε αντίστοιχη αύξηση όλων των σχετικών παραμέτρων και επομένως σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Οι φόβοι αυτοί δεν είναι αδικαιολόγητοι, αν πάρει κανείς υπόψη ότι τα σημερινά πειράματα με υψηλή θερμοκρασία και πίεση έχουν μέγιστη διάρκεια μέχρι δύο λεπτά, ενώ μια μηχανή που θα λειτουργεί σε συνεχή βάση φαίνεται ακόμη ανέφικτη.

Η ενέργεια της σύντηξης ακόμη και μετά το 2030 θα είναι ανταγωνιστική μόνο εφόσον επιβληθεί διεθνώς φόρος περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οπότε ο άνθρακας και οι υδρογονάνθρακες θα φορολογηθούν εκτός των άλλων και λόγω ενίσχυσης του φαινομένου του θερμοκηπίου. Μια τέτοια απόφαση θα επηρέαζε δραματικά τις υπό ανάπτυξη χώρες. Ένα τέτοιο μέτρο όμως θα ήταν άδικο, καθότι οι χώρες αυτές, ένεκα της μικρής βιομηχανικής τους δραστηριότητας, ελάχιστα συνέβαλαν στη μόλυνση του περιβάλλοντος γενικά. Η επιβολή μονομερώς φόρου στις αναπτυγμένες χώρες δεν φαίνεται να είναι αποδεκτή, λόγω του επιχειρήματος της ανταγωνιστικότητας.

Τελικά συμπεραίνουμε ότι η εποχή που θα γίνεται εκμετάλλευση της πυρηνικής σύντηξης για ειρηνικούς σκοπούς βρίσκεται ακόμη μακριά.

### Σημειώσεις

1. Α.Κ. Θεοφίλου, *Πυρηνικά Όπλα*, ΕΠΕΔΙΚΑ, Αθήνα, 1984.
2. R. Herman, *Σύντηξη*, εκδ. Κωσταράκη, Αθήνα, 1993.
3. Α.Κ. Θεοφίλου, *Πυρηνική Ενέργεια-Ραδιενέργεια*, εκδ. Κτίστη, Αθήνα, 1986.
4. E.N. Shaw, *Europe's Experiment in Fusion*, North Holland, Amsterdam, 1990.