

ΠΑΝΤΕΙΟΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

PANTEION UNIVERSITY OF SOCIAL AND POLITICAL SCIENCES



ΣΧΟΛΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΦΕΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

**Χωρική ανάλυση 3D μοντέλων πόλεων σε περιβάλλον Γεωγραφικών
Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και η αξιοποίηση τους από
τεχνολογίες Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR)**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Θεόδωρος Π. Λιάμης

Αθήνα, 2024

Τριμελής Επιτροπή

Μιμής Άγγελος

*Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Οικονομικής και Περιφερειακής Ανάπτυξης του Παντείου
Πανεπιστημίου (Επιβλέπων)*

Τασόπουλος Αναστάσιος

*Ομότιμος Καθηγητής του Τμήματος Οικονομικής και Περιφερειακής Ανάπτυξης του Παντείου
Πανεπιστημίου*

Αζαριάδης-Τοπάλογλου Φύλιππος

*Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου
Δυτικής Αττικής*



Copyright © Θεόδωρος Π. Λιάμης, 2024

All rights reserved. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διδακτορικής διατριβής εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της διδακτορικής διατριβής για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από το Πάντειον Πανεπιστήμιο Κοινωνικών και Πολιτικών Επιστημών δε δηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.

*Στη σύζυγό μου Βαρβάρα
και στον γιο μου Παύλο*

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή με τίτλο «Χωρική ανάλυση 3D μοντέλων πόλεων σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και η αξιοποίηση τους από τεχνολογίες Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR)» εκπονήθηκε στο Τμήμα Οικονομικής και Περιφερειακής Ανάπτυξης, του Παντείου Πανεπιστημίου Αθηνών κατά την περίοδο 2017-2024. Η υποστήριξη της διατριβής έγινε στις 15/05/2024, ενώπιον της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής.

Η πραγματοποίηση της παρούσας Διδακτορικής διατριβής θα ήταν αδύνατη χωρίς τη βοήθεια και συμβολή ορισμένων ανθρώπων.

Πρώτα από όλους επιθυμώ να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Άγγελο Μιμή. Η επιστημονική και ηθική του υποστήριξη, ήταν καθοριστικής σημασίας για την ολοκλήρωσή της. Του οφείλω ευγνωμοσύνη όχι μόνο για την καθοδήγηση του αλλά και για την αμέριστη εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την πρώτη ημέρα της συνεργασίας μας.

Ευχαριστώ θερμά τα μέλη της Τριμελούς Επιτροπής, τον κ. Αναστάσιο Τασόπουλο Ομότιμο Καθηγητή του Τμήματος Οικονομικής και Περιφερειακής Ανάπτυξης του Παντείου Πανεπιστημίου και τον κ. Φίλιππο Αζαριάδη-Τοπάλογλου, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για τις διορθώσεις τους και τις εύστοχες παρατηρήσεις τους.

Ευχαριστώ τον κ. Αντώνη Ροβολή, Καθηγητή του Τμήματος Οικονομικής και Περιφερειακής Ανάπτυξης του Παντείου Πανεπιστημίου, τον κ. Αναστάσιο Καραγάνη, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Οικονομικής και Περιφερειακής Ανάπτυξης του Παντείου Πανεπιστημίου, τον κ. Δημήτρη Καβρουδάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Γεωγραφίας του Πανεπιστημίου Αιγαίου και την κ. Ευτέρπη Δημοπούλου, Καθηγήτρια της Σχολής Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών - Μηχανικών Γεωπληροφορικής του ΕΜΠ για τη συμμετοχή τους στην Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν ανιδιοτελώς στο να κατανοήσω έννοιες και χώρους τους οποίους δεν γνώριζα. Ιδιαίτερος να ευχαριστήσω την Πόπη Κωνσταντάρα και τον Μιλτιάδη Μερκούρη για την προθυμία τους και την βοήθειά τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και να αφιερώσω την διατριβή στην οικογένειά μου, για την υπομονή και τη κατανόησή τους σε όλη αυτήν τη μακρόχρονη προσπάθεια. Στη σύζυγο μου Βαρβάρα η οποία με παρότρυνε να κυνηγήσω ένα όνειρο ζωής τη στιγμή που νόμιζα ότι είχε παρέλθει. Στάθηκε δίπλα μου σε όλη τη διαδρομή, οι παρατηρήσεις της, οι παραιτήσεις της και η δική της οπτική ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής. Στον γιο μου Παύλο για τη βοήθεια και ιδιαίτερα για την κατανόηση του την στιγμή που έδινε τη δική του μάχη για την εισαγωγή του στην τριτοβάθμια εκπαίδευση. Ο δικός του αγώνας ήταν έμπνευση για εμένα.

Περίληψη

Στόχος της διατριβής είναι η ανάδειξη των βέλτιστων λύσεων για τη χωρική ανάλυση τριδιάστατων (3D) μοντέλων πόλεων σε περιβάλλον Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS¹) και η δυνατότητα αξιοποίησης τους μέσω τεχνολογιών επαυξημένης πραγματικότητας (AR²). Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος επιχειρήθηκε να απαντηθούν μία σειρά από ερωτήματα που αφορούν: Την αδυναμία εξεύρεσης κατάλληλων δεδομένων 3D μοντελοποίησης, την ενσωμάτωση χωρικής πληροφορίας σε αυτά και τέλος τις δυνατότητες οπτικοποίησης τους μέσω τεχνολογίας AR.

Στα πλαίσια της διατριβής αναπτύχθηκαν τρεις πρωτότυπες εφαρμογές που επιχειρούν να δώσουν απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα της διατριβής. Η διατριβή αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο και γίνεται παράθεση των ερευνητικών ερωτημάτων. Αξιολογείται ο ρόλος της πληροφορίας και παρουσιάζεται η περιγραφική ικανότητα των χωρικών πληροφοριών. Επίκεντρο της διατριβής είναι η ενσωμάτωση αυτής της πληροφορίας σε 3D μοντέλα και στη συνέχεια η οπτικοποίησή τους. Καταγράφονται οι περιορισμοί της διδιάστατης (2D) αναπαράστασης, παρατίθενται οι βασικές έννοιες της 3D μοντελοποίησης και αναλύεται το πώς η 3D μοντελοποίηση άλλαξε τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε τον κόσμο που μας περιβάλλει. Παρουσιάζεται το σημαντικότερο σημασιολογικό πρότυπο CityGML και καταγράφονται οι περιορισμοί του. Το πρώτο μέρος της διατριβής ολοκληρώνεται με την παρουσίαση της τεχνολογίας AR.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται τρεις πρωτότυπες εφαρμογές, οι οποίες αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής. Η πρώτη εφαρμογή που υλοποιήθηκε είναι μια αυτοματοποιημένη μεθοδολογία δημιουργίας μαζικών δεδομένων για τη δημιουργία εκτεταμένων 3D αστικών χώρων. Η δεύτερη αφορά μία πρόταση επέκτασης (GRextADE) της τρέχουσας έκδοσης του προτύπου CityGML προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες 3D σχεδιασμού του αστικού χώρου για την περίπτωση της Ελλάδας. Η τρίτη εφαρμογή, που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της

¹ GIS (Geographical Information Systems)

² AR (Augmented Reality)

διατριβής, αφορά την αξιοποίηση της τεχνολογίας AR προκειμένου να οπτικοποιηθεί η χωρική πληροφορία που έχει ενσωματωθεί στα 3D μοντέλα.

Η διατριβή ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των συμπερασμάτων και την αξιολόγηση των υλοποιούμενων εφαρμογών.

Abstract

The goal of this thesis is to showcase the best solutions for 3D city spatial analysis within GIS, and the possibility of using Augmented Reality – AR – technology. To do this, three core issues of 3D modelling had to be solved: the lack of suitable 3D modelling data, the incorporation of spatial information in 3D models, and their visualisation via AR technology.

In the framework of this thesis, three original applications were developed to solve these core problems of 3D modelling. The thesis is split into two parts. In the first part the theoretical framework is discussed and the research questions are summarised. The role of data and more specifically the descriptive capabilities of spatial data are presented. Then, the limitations of 2D visualisation are discussed, as well as the main concepts of 3D modelling. The thesis then analyses how 3D modelling changed the way we perceive the world around us. It also presents the most important semantic model, CityGML, before discussing its limitations. The first part of the thesis concludes with the presentation of AR.

The second part of the thesis presents the three original applications, developed for the purposes of this thesis. The first is an automated methodology for the creation of mass data for the creation of extensive 3D city spaces. The second deals with a proposal for an expansion (GRextADE) of the current version of the CityGML model, so that it may cover the needs of 3D modelling of the city space when it comes to Greece. Finally, AR technology is adopted in order to visualise spatial information that has been integrated into 3D models.

The thesis ends with the conclusions and the evaluation of the developed applications.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη.....	vi
Abstract	viii
Περιεχόμενα	ix
Ευρετήριο Εικόνων	xiii
Ευρετήριο Πινάκων.....	xvii
Ευρετήριο Συντομογραφιών	xviii
Α Μέρος - Θεωρητικό πλαίσιο	1
Κεφάλαιο 1, Εισαγωγή.....	1
1.1 Ερευνητικό πρόβλημα της διατριβής.....	1
1.1.1 Ερωτήματα που αφορούν τη συλλογή και δημιουργία δεδομένων κατάλληλων για 3D μοντελοποίηση.....	3
1.1.2 Ερωτήματα που αφορούν τη βέλτιστη πρακτική 3D μοντελοποίησης	3
1.1.3 Ερωτήματα που αφορούν την επέκταση μοντέλου CityGML.....	3
1.1.4 Ερωτήματα που αφορούν τη διαχείριση δεδομένων.....	4
1.1.5 Ερωτήματα που αφορούν τις Εφαρμογές απεικόνισης 3D μοντέλων.....	4
1.2 Ερευνητικοί στόχοι και συμβολή της διατριβής - καινοτομικά στοιχεία.....	5
1.3 Διάρθρωση της διατριβής.....	8
Κεφάλαιο 2, Οπτικοποίηση πληροφορίας	10
2.1 Εισαγωγή.....	10
2.2 3D Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (3D GIS)	10
2.2.1 Οι λειτουργίες ενός συστήματος 3D GIS	11
2.2.2 Η αξιοποίηση των 3D GIS	12
2.3 3D αναπαράσταση και βασικοί ορισμοί.....	13
2.3.1 Απεικόνιση περιεχομένου στα συστήματα GIS.....	13
2.3.2 Το προβολικό σκηνικό μιας 3D αναπαράστασης.....	14
2.3.3 Υπόβαθρο αναπαράστασης	15
2.3.4 Προσδιορισμός μεγέθους αντικειμένων.....	15
2.3.5 Μοντέλο δεδομένων αναπαράστασης.....	16
2.4 Η σημασία της 3D μοντελοποίησης.....	16
2.5 Μοντελοποίηση και οπτικοποίηση διαδικασιών	19
2.5.1 Φωτογραμμετρική μοντελοποίηση (Photogrammetric modeling).....	19
2.5.2 Μοντελοποίηση βάσει εικόνων (Image-based modeling).....	22
2.5.3 Παραμετρική μοντελοποίηση (Parametric modeling)	24

2.5.4 Κανονιστική μοντελοποίηση (Procedural Modeling)	26
2.6 Εφαρμογές 3D αστικού χώρου	28
2.6.1 Επισκόπηση αξιοποιήσιμων 3D μοντέλων.....	30
2.6.2 Παραδείγματα 3D μοντελοποίησης αστικών χώρων	32
2.6.2.1 Διαχείριση και πολεοδομικός σχεδιασμός αστικού περιβάλλοντος.....	33
2.6.2.2 Εκτίμηση ενεργειακής ζήτησης	34
2.6.2.3 3D Κτηματολόγιο	35
2.6.2.4 Πλοήγηση	35
2.6.2.5 Χρήση εκτός αστικού περιβάλλοντος.....	36
2.6.2.6 Οπτικοποίηση αστικών πληροφοριών	37
2.6.2.7 Διαχείριση εγκαταστάσεων	37
2.6.2.8 Ασφάλεια και καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.....	37
2.6.2.9 Πληθυσμιακή εκτίμηση	38
2.6.2.10 Φυσικές καταστροφές.....	38
Κεφάλαιο 3, Τύποι 3D μοντέλων.....	40
3.1 Εισαγωγή.....	40
3.2 3D Γεωμετρικά Μοντέλα	40
3.3 3D Τοπολογικά Μοντέλα	42
3.3.1 Επισκόπηση τοπολογικών μοντέλων	44
3.3.1.1 Formal Data Structure (3D FDS)	45
3.3.1.2 Simplified Spatial Model (SSM).....	47
3.3.1.3 Urban Data Model (UDM)	49
3.3.1.4 Tetrahedral Network (TEN)	49
3.4 3D Σημαιολογικά Μοντέλα.....	50
3.4.1 North American Data Model (NADM).....	51
3.4.2 Geology Science Markup Language (GeoSciML).....	53
Κεφάλαιο 4, Σημαιολογικό Πρότυπο - CityGML.....	56
4.1 Εισαγωγή.....	56
4.2 Η δομή του CityGML	57
4.2.1 Αναπαράσταση θεματικών ενοτήτων στο CityGML	59
4.3 Level of detail (LOD)	63
4.4 Application Domain Extension (ADE)	64
4.4.1 Επισκόπηση εφαρμογών ADE.....	69
4.5 Οπτικοποίηση CityGML και ADE	71
4.5.1 FZKViewer.....	72
4.5.2 citygml4j	73

4.5.3 Azul.....	73
4.5.4 3Dfier	74
4.5.5 FME Inspector	74
4.5.6 3DCityDB	75
4.6 Ανοιχτά θέματα CityGML	76
Κεφάλαιο 5, Επαυξημένη Πραγματικότητα (Augmented Reality -AR)	78
5.1 Εισαγωγή.....	78
5.2 AR vs VR	78
5.3 Η τεχνολογία AR	79
5.3.1 Τα δομικά στοιχεία της τεχνολογίας AR.....	80
5.3.2 Οι κατηγορίες της τεχνολογίας AR.....	82
5.4 Εργαλεία ανάπτυξης εφαρμογών AR.....	83
5.4.1 SDK's.....	84
5.4.1.1 ARKit	84
5.4.1.2 ARCore.....	85
5.4.1.3 Vuforia	85
5.5 AR και χωρική πληροφορία	85
5.5.1 AR και συστήματα GIS.....	86
5.5.2 Εφαρμογές AR στα GIS.....	87
Β Μέρος – Ανάπτυξη εφαρμογών.....	91
Κεφάλαιο 6, Δημιουργία 3D δεδομένων από δυναμικούς διαδραστικούς χάρτες	92
6.1 Εισαγωγή.....	92
6.2 3D Δεδομένα	92
6.3 Αποτύπωση διεθνούς κατάστασης – Βιβλιογραφική έρευνα	92
6.4 Πεδίο εφαρμογής	93
6.5 Λογισμικά.....	94
6.6 Μεθοδολογία	94
6.7 Πεδία εφαρμογής.....	101
6.8 Παρατηρήσεις και σχολιασμός.....	102
Κεφάλαιο 7, GRextADE – Η επέκταση του CityGML	103
7.1 Σχετικές εργασίες- αποτύπωση κατάστασης στην Ελλάδα	103
7.1.1 Δημιουργία εθνικών προτύπων 3D μοντελοποίησης	103
7.1.2 Αποτύπωση κατάστασης στην Ελλάδα, επισκόπηση υποδομής και ανάλυση αναγκών	105
7.1.3 Ηλεκτρονική Ταυτότητα Κτιρίου	107
7.2 Μεθοδολογία ανάπτυξης GRextADE	108

7.3	Εφαρμογή της επέκτασης	110
7.4	Τα διαγράμματα UML του GExtADE	112
7.5	Η μετατροπή του GExtADE σε XML σχήμα	116
7.6	Η δημιουργία του αρχείου gml	117
7.7	Οπτικοποίηση του GExtADE	118
7.8	Παρατηρήσεις και σχολιασμός	120
Κεφάλαιο 8, 3D αναπαράσταση δικτύων κοινής ωφελείας με χρήση τεχνολογιών AR		122
8.1	Εισαγωγή	122
8.2	Πεδίο εφαρμογής	122
8.3	Μεθοδολογία ανάπτυξης εφαρμογής AR	123
8.4	Μετασχηματισμός χαρακτηριστικών ενός σημείου	126
8.4.1	Αλλαγή γεωμετρίας σημείου	126
8.4.2	Αντικατάσταση σημειακών γεωμετριών με 3D μοντέλο	127
8.5	Μετασχηματισμός γραμμικών χαρακτηριστικών	129
8.6	Θέση πρόσδεσης αντικειμένου	130
8.7	Οπτικοποίηση μέσω AR	130
8.8	Παρατηρήσεις και σχολιασμός	132
Συμπεράσματα		133
Αξιολόγηση μεθοδολογίας συλλογής/δημιουργίας συνόλων δεδομένων		133
Αξιολόγηση επέκτασης GExtADE		135
Αξιολόγηση αναπαράστασης δικτύων κοινής ωφελείας με χρήση τεχνολογιών AR		139
Γενικά συμπεράσματα επί της διατριβής		141
Μελλοντική εργασία		142
Βιβλιογραφία		144
Παράρτημα Α - Η ροή εργασιών ανάπτυξης της επέκτασης GExtADE		171
Παράρτημα Β – UML διαγράμματα της επέκτασης GExtADE		172
Παράρτημα Γ –Configuration File της επέκτασης GExtADE		176
Παράρτημα Δ – XML κώδικας της επέκτασης GExtADE		178

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1:Αναπαράσταση αεροπορικών διαδρομών (Πηγή: openflights.org)	14
Εικόνα 2:Σημεία ενδιαφέροντος από το κέντρο της Αθήνας (Πηγή: Google Earth)	15
Εικόνα 3:" Bird's-eye view " Ντουμπάι, νικήτρια φωτογραφία διαγωνισμού Dronestagram 2017, στην κατηγορία Αστικός περιβάλλον, (Πηγή: https://www.dronestagr.am/).....	18
Εικόνα 4: 3D Μοντελοποίηση και οπτικοποίηση διαδικασιών, οι πιο σημαντικές τεχνικές (Πηγή: Ιδία εργασία).....	19
Εικόνα 5:Χρήση φωτογραμμετρίας για τη μοντελοποίηση κτίσματος (Πηγή: https://wikifactory.com/)	21
Εικόνα 6:Image-based modeling, για την παραγωγή της 3D γεωμετρίας και την απόδοση υφών σε ένα αντικείμενο αξιοποιούνται πολλές εικόνες. (Πηγή: https://www.agisoft.com) .	23
Εικόνα 7:Σύννεφο σημείων (point cloud) κτίσματος από το λογισμικό 3DS Max της Autodesk (Πηγή: www.autodesk.com)	24
Εικόνα 8:Παράδειγμα τριών διαφορετικών λύσεων για τη δημιουργία της ίδιας γεωμετρίας (Πηγή: Geometric Variability in Parametric 3D Models: Implications for Engineering Design, Aranburu A, Justel D, Camba J, Procedia CIRP (2022) 109 383-388).....	25
Εικόνα 9:Παραμετρική μοντελοποίηση μέσω του open source λογισμικού FreeCAD (Πηγή: https://www.freecadweb.org/)	25
Εικόνα 10:Procedural Modeling (Πηγή: https://vcg.leeds.ac.uk/projects/procec/).....	27
Εικόνα 11: Παραμετρική μοντελοποίηση με κανόνες CGA μέσω του λογισμικού City Engine (Πηγή: https://doc.arcgis.com/en/cityengine/2020.0/help/help-cga-modeling-overview.htm)	27
Εικόνα 12:Σταδιακή μοντελοποίηση πόλης (Biljecki κ.ά. 2016)	29
Εικόνα 13: Web εφαρμογή 3D αναπαράστασης της πόλης του Ρότερνταμ (Ολλανδία). Τα 2D δεδομένα του IMGeo μπορούν να αναπαρασταθούν σε 2,5D (δηλαδή ως αναπαράσταση επιφάνειας ύψους) και 3D (ως ογκομετρική αναπαράσταση) (Πηγή: https://3dbag.nl/en/viewer)	32
Εικόνα 14: 3D γεωμετρικό μοντέλο αστικού περιβάλλοντος με βάση τους κτιριακούς όγκους (Πηγή: Huang κ.ά., 2020).....	41
Εικόνα 15: Πιθανές σχέσεις μεταξύ δύο 3D αντικειμένων με βάση το πλαίσιο του μοντέλου Egenhofer και Herrting. (Πηγή: Egenhofer και Herrting, 1990)	43
Εικόνα 16: Το γενικό τοπολογικό μοντέλο. Ένα χαρακτηριστικό με γεωμετρία σημείου συσχετίζεται με ένα στοιχείο μεμονωμένου κόμβου, ένα χαρακτηριστικό με γεωμετρία γραμμής σχετίζεται με ένα ή περισσότερα στοιχεία ακμών και ένα χαρακτηριστικό με γεωμετρία πολυγώνου σχετίζεται με ένα ή περισσότερα στοιχεία προσώπου (Πηγή: Hoel, 2009).	44
Εικόνα 17:3D Formal Data Structure (3D FDS), σχεσιακή υλοποίηση (Πηγή: Zlatanova, 2000a).....	46
Εικόνα 18:Simplified Spatial Model (SSM), (Πηγή: Zlatanova, 2000)	47
Εικόνα 19:Urban Data Model (UDM), (Πηγή: Coors, 2003).....	49
Εικόνα 20:Tetrahedral Network (TEN): σχεσιακή υλοποίηση για 3D (Πηγή: Pilouk, 1996) .	50
Εικόνα 21: Τριδιάστατη (3D) μοντελοποίηση με ενσωματωμένες σημασιολογικές τάξεις (Πηγή: Ledoux κ.ά., 2019)	51
Εικόνα 22:Έννοιες και περιγραφές με βάση το NADM και χρήση διαγράμματος UML (Πηγή: https://ngmdb.usgs.gov/www-nadm/)	52

Εικόνα 23: Γεωλογικός χάρτης με αξιοποίηση γεωλογικών χαρακτηριστικών που υποστηρίζει το σημασιολογικό μοντέλο GeoSciML (Πηγή: https://cgi-iugs.org/project/geosciml/#what-is-geosciml)	53
Εικόνα 24: Διάγραμμα UML των τάξεων GeoSciML GeologicUnit και EarthMaterial, που δείχνει κληρονομικότητα, συσχετισμούς και ρόλους και χαρακτηριστικά κλάσεων, με τύπους δεδομένων και ιδιότητα (Πηγή: Simons κ.ά., 2006)	54
Εικόνα 25: Επισκόπηση των ενοτήτων του CityGML (Πηγή: Gröger κ.ά. 2012).....	58
Εικόνα 26: Σχηματική αναπαράσταση του προτύπου CityGML 2.0 (Πηγή: OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard)	58
Εικόνα 27: Παράδειγμα μοντέλου κτιρίου LOD2 στο CityGML, αριστερά γραφική αναπαράσταση και δεξιά ιεραρχία των επιμέρους στοιχείων που το αποτελούν (Πηγή: OGC City Geography Markup Language, Encoding Standard).	59
Εικόνα 28: Απόσπασμα σε XML του κτιριακού μοντέλου (Πηγή: OGC City Geography Markup Language, En-coding Standard).....	60
Εικόνα 29: Η μοντελοποίηση ενός κτιρίου (AbstractBuilding) μέσω διαγράμματος UML (Πηγή: OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard).	62
Εικόνα 30: Τα πέντε επίπεδα λεπτομέρειας του CityGML (Πηγή: Gröger & Plümer, 2012).63	
Εικόνα 31: Διάγραμμα UML που απεικονίζει την επέκταση της κλάσης CityGML Building με νέο χαρακτηριστικό τύπο Garage ως υποκλάση με στερεότυπο «featureType» (Πηγή: Biljecki κ.ά., 2018a).....	65
Εικόνα 32: XML schema που απεικονίζει την επέκταση της κλάσης CityGML Building με νέο χαρακτηριστικό τύπο Garage ως υποκλάση με στερεότυπο «featureType» (Πηγή: Biljecki κ.ά., 2018a).....	66
Εικόνα 33: Οπτικοποίηση αρχείου CityGML μέσω του λογισμικού FZKViewer (Πηγή: KIT - Karlsruhe Institute of Technology, 2021).....	72
Εικόνα 34: Οπτικοποίηση τμήματος της πόλης του Βερολίνου με χρήση του Java API citygml4j μέσω της πλατφόρμας Cesium (Πηγή: https://cesium.com)	73
Εικόνα 35: Ανύψωση πολυγώνων στη 3η διάσταση μέσω του λογισμικού 3dfier (Πηγή: https://github.com/tudelft3d/3dfier)	74
Εικόνα 36: Οπτικοποίηση 3D μοντέλου πόλης με χρήση του λογισμικού FME Inspector (Using CityGML to Work with Large-Scale 3D Data, Tiana Warner, February 1, 2022, https://www.safe.com/blog/).....	75
Εικόνα 37: 3D σημασιολογικό μοντέλο του Βερολίνου. Περιλαμβάνει περίπου 550.000 κτιριακά αντικείμενα LoD2 με χρήση της 3DCityDB. (Πηγή: https://www.3dcitydb.org/3dcitydb/visualizationberlin/)	76
Εικόνα 38: Η ιστορία της Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR), (Πηγή: Ιδία εργασία)	78
Εικόνα 39: Το συνεχές της "εικονικότητας" όπως ορίστηκε από τους Miligram & Kishino (1994) (Πηγή: A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays, 1994)	79
Εικόνα 40: Τα τρία κύρια στοιχεία αλληλεπίδρασης στα συστήματα AR ο χρήστης, η διαπεφύχρηστη και το εικονικό περιεχόμενο (Πηγή: Ghazwani & Smith, 2020).	80
Εικόνα 41: Τα μέρη του συστήματος τρισδιάστατης απεικόνισης (Πηγή: Sutherland Ivan, 1968)	81
Εικόνα 42: Οι χρήσεις της τεχνολογίας AR και η αξιοποίηση διαφόρων συσκευών σε διαφορετικού είδους εφαρμογών (Πηγή: Augmented Reality, Where We Will All Live, Peddie 2017)	82

Εικόνα 43: Προβολή ψηφιακού πληκτρολογίου και οθόνης με δυνατότητα αλληλεπίδρασης (Πηγή:.....)	83
Εικόνα 44: Προβολή μέσω AR επίπλων στον χώρο του πελάτη με την εφαρμογή IKEA app (Πηγή:.....)	90
Εικόνα 45: Τα πέντε επίπεδα λεπτομέρειας LODs του CityGML 2.0. (Πηγή: Geo Connection International Magazine, 2015)	94
Εικόνα 46: Ίχνη κτιρίων LOD0 (Πηγή: OpenStreetMap)	94
Εικόνα 47: Η περιοχή του Κουκακίου με 2D διανυσματικά πολύγωνα, με υπόβαθρο και χωρίς υπόβαθρο χάρτη (Qgis) (Πηγή: Ιδία εργασία)	96
Εικόνα 48: Διαθέσιμες πληροφορίες ληφθέντων δεδομένων (Πηγή: OpenStreetMap)	96
Εικόνα 49: 3D απεικόνιση κτιρίων γειτονιάς στο Κουκάκι μετά την ανύψωση κατ' ύψος από 2D (Πηγή: Ιδία εργασία)	99
Εικόνα 50: Απόσπασμα από τον html κώδικα (Πηγή: Ιδία εργασία).....	100
Εικόνα 51: Η Διασωλήνωση (pipeline) των εργασιών (Πηγή: Ιδία εργασία)	101
Εικόνα 52: Το διαδραστικό 3D μοντέλο μέσα από τον Edge browser (Πηγή: Ιδία εργασία)	101
Εικόνα 53: Η ροή εργασιών ανάπτυξης της επέκτασης GRextADE / The development workflow of the GRextADE extension	110
Εικόνα 54: Παράθεση ορθοφωτογραφιών της περιοχής του Αγίου Κοσμά Ελληνικού κατά τις περιόδους 1945-1960 και 2015-2016 (Πηγή: Ελληνικό Κτηματολόγιο ΑΕ)	111
Εικόνα 55: Τα ίχνη των κτιρίων της περιοχής Αγίου Κοσμά Ελληνικού στο λογισμικό ArcGIS (Πηγή: Ιδία εργασία)	112
Εικόνα 56: Η επέκταση GRextADE του CityGML / The GRextADE extension of CityGML (Πηγή: Ιδία εργασία)	113
Εικόνα 57: Το UML διάγραμμα του BDID (Building Digital ID) (Πηγή: Ιδία εργασία)	114
Εικόνα 58: Το UML διάγραμμα του PROPERTY DETAILS / UML diagram of the PROPERTY DETAILS (Πηγή: Ιδία εργασία).....	115
Εικόνα 59: Το UML διάγραμμα του PROPERTY FACTORS (Πηγή: Ιδία εργασία)	116
Εικόνα 60: Απόσπασμα από το CofigurationFile της εφαρμογής ShapeChange για την επέκταση GRextADE (Πηγή: Ιδία εργασία).....	117
Εικόνα 61: Απόσπασμα τη μετατροπή του "FeatureType" BIR στο αρχείο σχήματος XML (CityGML-GRextADE.xsd) (Πηγή: Ιδία εργασία)	117
Εικόνα 62: Σχηματοποίηση των διασυνδέσεων μέσω FME και η μετάδοση των ερμηνευμένων δεδομένων στα αντίστοιχα σύνολα δεδομένων ADE (Πηγή: Ιδία εργασία).	118
Εικόνα 63: Οπτικοποίηση 3D κτιρίων της περιοχής Ελληνικού, σε επίπεδο λεπτομέρειας LOD1 και προβολή πληροφοριών του GRextADE μέσω του λογισμικού FME Inspector (Πηγή: Ιδία εργασία)	119
Εικόνα 64: Οπτικοποίηση 3D κτιρίων της περιοχής Ελληνικού, σε επίπεδο λεπτομέρειας LOD1 και προβολή πληροφοριών του GRextADE μέσω του λογισμικού FZK (Πηγή: Ιδία εργασία).....	119
Εικόνα 65: Η προβολή μέσω του Google Earth Pro πληροφοριών που ενσωματώθηκαν στα 3D μοντέλα με την επέκταση GRextADE (Πηγή: Ιδία εργασία).....	120
Εικόνα 66: Η επέκταση των πινάκων του CityGML με βάση το GRextADE στη βάση δεδομένων 3DCityDB με χρήση του εργαλείου Importer/Exporter (Πηγή: Ιδία εργασία) ...	121

Εικόνα 67:Επισκόπηση του CityGML 3.0. Τα κάθετα πλαίσια δείχνουν τις θεματικές ενότητες. Οι οριζόντιες ενότητες καθορίζουν έννοιες που ισχύουν για όλες τις θεματικές ενότητες (Πηγή: Kutzner κ.ά., 2020a).....	121
Εικόνα 68:Περιοχή μελέτης, η συμβολή των οδών Λ. Φλέμινγκ και Π. Μελά στο κέντρο του δήμου του Αγίου Ιωάννη του Ρέντη (Πηγή: Ιδία εργασία)	123
Εικόνα 69:Δείγμα αρχείου με πληροφορίες για το δίκτυο ύδρευσης του Δήμου Α.Ι.Ρέντη (Πηγή: Ιδία εργασία)	124
Εικόνα 70:Η διασολήνωση των εργασιών κατά τη διαδικασία μετασχηματισμού των δεδομένων σε αρχείο AR (Πηγή: Ιδία εργασία)	125
Εικόνα 71:Διαδικασία κλιμάκωσης και εξώθησης γεωμετρίας στο λογισμικό FME (Πηγή: Ιδία εργασία).....	127
Εικόνα 72:3D μοντέλο βάνας νερού από το Sketchfab (Πηγή: https://sketchfab.com/)	128
Εικόνα 73:Καθορισμός εμφάνισης των προβαλλόμενων 3D αντικειμένων (Πηγή: Ιδία εργασία).....	128
Εικόνα 74:Διαδικασία αντιστοίχισης σημείων με τις βάνες νερού (Πηγή: Ιδία εργασία).....	129
Εικόνα 75:Περιστροφή βανών κατά μήκος σωλήνα (Πηγή: Ιδία εργασία).....	129
Εικόνα 76:Δημιουργία 3D σωλήνα από γραμμή (Πηγή: Ιδία εργασία)	129
Εικόνα 77:Τοποθέτηση αντικειμένου στον φυσικό κόσμο (Πηγή: Ιδία εργασία)	130
Εικόνα 78:Προβολή της θέσης δικτύου νερού μέσω της εφαρμογής AR (Πηγή: Ιδία εργασία)	131
Εικόνα 79:Οπτικοποίηση δικτύου ύδρευσης (μπλε), όμβριων υδάτων (κόκκινο) και υπόδειξη πυροσβεστικού κρουνού, μέσω τεχνολογίας AR στον Δήμο Αγ. Ι. Ρέντη (Πηγή: Ιδία εργασία)	132

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Πόλεις και περιοχές σε όλο τον κόσμο με ανοιχτά σύνολα δεδομένων	30
Πίνακας 2: Τα χαρακτηριστικά των γνωστών 3D τοπολογικών μοντέλων (Oosterom κ.ά., 2003)	45
Πίνακας 3: Οι προτεινόμενες απαιτήσεις ακρίβειας για LOD 0-4 του CityGML (Albert J κ.ά., 2003)	64
Πίνακας 4: Κατάλογος αναγνωρισμένων ADE (Biljecki κ.ά., 2018b)	67
Πίνακας 5: Μέγιστο επιτρεπόμενο ύψος κτιρίου συναρτήσει του συντελεστή δόμησης της περιοχής (Πηγή: Νέος Οικοδομικός Κανονισμός, http://www.opengov.gr/minenv).....	98
Πίνακας 6: Συνολική αποτίμηση της επέκτασης GExtADE.....	138

Ευρετήριο Συντομογραφιών

2D	Two Dimensional
3D	Three Dimensional
ADE	Application Domain Extension
AI	Artificial intelligence
API	Application Programming Interface
AR	Augmented Reality
AV	Augmented Virtuality
BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer Aided Design
CAD/CAM	Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing
CAM	Computer Aided Manufacturing
CGA	Computer Generated Architecture
CGI	Commission of Geoscience Information
DB	Data Base
DEM	Digital Elevation Model
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
EA	Enterprise Architect
ETL	Extract Transform Load
FDS	Formal Data Structure
FME	Feature Manipulation Engine
GeoSciML	Geology Science Markup Language
GIS	Geographical Information Systems
GML	Geography Markup Language
GPS	Global Positioning System
HTML	HyperText Markup Language
HTTP	HyperText Transfer Protocol
iOS	iPhone Operating System
ISO	International Organization Standards

LIDAR	Light Detection and Ranging
LOD	Level Of Detail
MR	Mixed Reality
NADM	North American Data Model
NURBS	Non-Uniform Rational B-Spline
OGC	Open Geospatial Consortium
OSM	Open Street Map
PPGIS	Public Participation GIS
QGIS	Quantum Geographic Information System
RDBMS	Relational Database Management System
SQL	Structured Query Language
SSM	Simplified Spatial Model
TEN	Tetrahedral Network
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
UDM	Urban Data Model
UML	Unified Modeling Language
VGI	Volunteered Geographic Information
VIO	Visual Inertial Odometer
VR	Virtual Reality
W3C	World-Wide-Web Consortium
XML	Extensible Markup Language
XSD	XML Schema Definition
ΓΣΠ	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών
HTK	Ηλεκτρονική Ταυτότητα Κτηρίων
ΣΔΒΔ	Σύστημα Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων

Α Μέρος - Θεωρητικό πλαίσιο

Κεφάλαιο 1, Εισαγωγή

1.1 Ερευνητικό πρόβλημα της διατριβής

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί η τρισδιάστατη (3D) μοντελοποίηση αστικού περιβάλλοντος και η ενσωμάτωση χωρικής πληροφορίας σ' αυτό. Είναι γεγονός ότι πολλοί οργανισμοί έχουν αναπτύξει πλήθος προτύπων που αφορούν την αναπαράσταση 3D μοντέλων πόλεων. Οι διαφορές τους προσδιορίζονται στην προσέγγιση μοντελοποίησης, τη γεωμετρία και τη σημασιολογία του υποκείμενου αντικειμένου (Ellul & Haklay, 2006a). Τα προβλήματα που ανακύπτουν κατά τη μετατροπή και τον συνδυασμό 3D μοντέλων πόλης είναι η απώλεια πληροφοριών (Y. Tan κ.ά., 2023), η ακατάλληλη μετατροπή, η απώλεια σχέσεων και οι τοπολογικές ασυνέπειες (K. A. Ohori κ.ά., 2018). Αυτή η προβληματική κατάσταση δυσχεραίνει την ανταλλαγή και τη χρήση των εν λόγω μοντέλων σε εφαρμογές και καθιστούν τη διαλειτουργικότητα τους ένα κρίσιμο ζήτημα (Nouvel, Kaden, κ.ά., 2015; Zucker κ.ά., 2016).

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάζει τις μεθοδολογίες μοντελοποίησης και διαχείρισης 3D μοντέλων αστικού περιβάλλοντος καθώς και την ενσωμάτωση χωρικής πληροφορίας σ' αυτά. Αναζητούνται οι βέλτιστες πρακτικές προκειμένου να εξασφαλιστεί η ανταλλαγή και επαναχρησιμοποίηση δεδομένων σε 3D μοντέλα σε διαφορετικές εφαρμογές.

Έως σήμερα για τη διαχείριση διαφόρων αναγκών (χωρικών ή λειτουργικών) μιας πόλης αξιοποιούνταν ως επί το πλείστον διδιάστατους (2D) χάρτες και διαγράμματα (Jia & Guo, 2011). Το γεγονός αυτό σε πολλές περιπτώσεις, προκαλούσε ασάφειες και προβλήματα, εξαιτίας του γεγονότος ότι τόσο οι χάρτες όσο και τα διαγράμματα αναπαριστούν τον 3D κόσμο με 2D τρόπο (Sun & Chen, 2006). Αναγνωρίζοντας την παραδοξότητα αυτή, την προηγούμενη δεκαετία, πολλές ερευνητικές προσπάθειες εστίασαν σε διάφορες εναλλακτικές μεθοδολογίες, που ακολουθούνται σε περιπτώσεις 3D μοντελοποίησης του χώρου (Jia & Guo, 2011; Weinhaus & Devaajan, 1997a), από τη συλλογή δεδομένων για τη σχεδίαση και την καταγραφή πληροφοριών χωρικών αντικειμένων έως την απεικόνισή τους με όσο το

δυνατόν υψηλής ακρίβειας 3D μοντέλα (Harman, 2000; Weinhaus & Devarajan, 1997b, 1997a). Τα μοντέλα αυτά σήμερα μπορούν να έχουν ταυτοχρόνως γεωμετρική, τοπολογική και σημασιολογική διάσταση (Molenaar, 1992).

Προκειμένου να είναι αξιοποιήσιμες οι δομές που αποτελούν ένα αστικό περιβάλλον, είναι απαραίτητη η χρήση 3D μοντέλων πόλεων, με τις αντίστοιχες τεχνολογίες διαχείρισής τους. Μια σειρά από εργασίες όπως:

- ο πολεοδομικός σχεδιασμός (X. Zhang κ.ά., 2004),
- η διαχείριση ακίνητης περιουσίας (Tikhonova κ.ά., 2021),
- η προσομοίωση του περιβάλλοντος (Breunig κ.ά., 2017),
- η διαχείριση καταστροφών (Kemec & Duzgun, 2006),
- οι τηλεπικοινωνίες (Leberl κ.ά., 1998),
- η διαχείριση εγκαταστάσεων (Fassi κ.ά., 2015) κλπ.

προϋποθέτουν τη χρήση 3D μοντέλων πόλεων. Η αυξημένη πολυπλοκότητα τους, που προκύπτει από τη χρήση της τρίτης διάστασης, απαιτεί την ύπαρξη μιας σημασιολογικής βάσης προκειμένου να είναι εφικτή η περιγραφή των γεωμετρικών και τοπολογικών τους χαρακτηριστικών (Jamali, 2012).

Οι ερευνητικές προσπάθειες συγκλίνουν και εν πολλοίς συμφωνούν στην αναγκαιότητα της 3D μοντελοποίησης και στα χαρακτηριστικά τα οποία θα πρέπει να έχει (Billen κ.ά., 2014). Επιπρόσθετα όμως κοινή πεποίθηση είναι πως τρία σημαντικά προβλήματα αποτελούν τροχοπέδη στην αξιοποίηση της 3D μοντελοποίησης αστικών χώρων (Biljecki κ.ά., 2015a; Billen κ.ά., 2014).

- i. Η ύπαρξη κατάλληλων δεδομένων μοντελοποίησης (Biljecki, Ledoux, κ.ά., 2017).
- ii. Η ενσωμάτωση χωρικής πληροφορίας στα υπό μοντελοποίηση αντικείμενα (Over κ.ά., 2010).
- iii. Οπτικοποίηση και θέαση αντικειμένων εμπλουτισμένων με πληροφορίες (Prieto & Izgara, 2012).

1.1.1 Ερωτήματα που αφορούν τη συλλογή και δημιουργία δεδομένων κατάλληλων για 3D μοντελοποίηση

Όσον αφορά την ύπαρξη κατάλληλων μαζικών συνόλων δεδομένων (datasets) προκειμένου να είναι δυνατή η 3D αναπαράσταση εκτεταμένου χώρου υπάρχουν διάφορα προβλήματα τα οποία λειτουργούν ανασταλτικά. Καταρχήν τα δεδομένα αυτά είναι δυσεύρετα κυρίως λόγω του υψηλού κόστους και της χρονοβόρας διαδικασίας συλλογής τους. Συνεπώς είναι εύλογα τα ερωτήματα:

- Είναι δυνατή η συλλογή τους με ένα μαζικό τρόπο (Biljecki κ.ά., 2023); Εάν ναι, είναι δυνατόν να γίνεται συνεργατικά από ερευνητές ή ομάδες οι οποίες θα λειτουργούν και θα εργάζονται αυτόνομα και εκτός πεδίου σε διαφορετικά έργα;
- Είναι εφικτό η συλλογή δεδομένων να αφορά το σύνολο της υφελίου (Josepbat κ.ά., 2015);
- Είναι δυνατή η μοντελοποίηση και διασώληνωση των εργασιών συλλογής-δημιουργίας έτσι ώστε να αποτελούν έναν οδικό χάρτη (Pepe κ.ά., 2020);
- Θα είναι εφικτή η διαχείριση των δεδομένων αυτών έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα και η ενημέρωσή τους (Alshammari κ.ά., 2021; Mantha κ.ά., 2021);
- Το οπτικοποιημένο 3D μοντέλο θα είναι εντός του πλαισίου ανοχής σφάλματος που υπαγορεύει διεθνής έρευνα (Biljecki κ.ά., 2015a);.

1.1.2 Ερωτήματα που αφορούν τη βέλτιστη πρακτική 3D μοντελοποίησης

Διερευνώνται μια σειρά ερωτημάτων που σχετίζονται με τον τύπο της μοντελοποίησης και πώς αυτός επηρεάζει την ανταλλαγή και χρήση 3D μοντέλων πόλεων σε διαφορετικές εφαρμογές (Fischer & Wang, 2011).

- Είναι δυνατή η ενσωμάτωση χωρικής πληροφορίας σε όλα τα 3D μοντέλα ασχέτως προέλευσης (Billen κ.ά., 2014);
- Τι είδους πληροφορίας μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα 3D μοντέλο αστικού περιβάλλοντος (Biljecki κ.ά., 2015a);
- Βάση ποιας μεθοδολογίας μπορεί να εξασφαλιστεί η διαλειτουργικότητα και η ανταλλαγή των ενσωματωμένων δεδομένων ενός 3D μοντέλου (Biljecki κ.ά., 2015a; Breunig κ.ά., 2017);

1.1.3 Ερωτήματα που αφορούν την επέκταση μοντέλου CityGML

Αν και η ύπαρξη των δεδομένων είναι πολύ σημαντική στη διαδικασία μοντελοποίησης

ο κύριος στόχος της διατριβής είναι η διερεύνηση επέκτασης του βασικού προτύπου μοντελοποίησης, ενός 3D μοντέλου (CityGML) προκειμένου να ενσωματωθούν σε αυτό επιπρόσθετες πληροφορίες (Edert & Gesquière, 2016; Kutzner κ.ά., 2017). Μια σειρά από επιμέρους ερευνητικά ερωτήματα διαμορφώθηκαν κατά την υλοποίηση της διατριβής. Αρχικά αφορούσαν τις καταγεγραμμένες μεθοδολογίες μοντελοποίησης και τη διαλειτουργικότητα τους. Στη συνέχεια όμως επεκτάθηκαν σε όλο το φάσμα των υπό εξέταση στοιχείων και βοήθησαν στο να δομηθεί ένα ενιαίο πλαίσιο έρευνας που αποκρυσταλώνει τη διαδικασία μοντελοποίησης σε όλα τα επιμέρους στάδια (Brink κ.ά., 2014). Αναλυτικότερα, τα επιμέρους ερευνητικά ερωτήματα που διατυπώθηκαν και επιχειρήθηκε να απαντηθούν στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι τα εξής:

- Είναι εφικτή η επέκταση του προτύπου (Kumar κ.ά., 2017);
- Τυχόν επέκταση επηρεάζει τη διαλειτουργικότητα (Cor κ.ά., 2018);
- Είναι εφικτή η μείωση της πολυπλοκότητάς του;
- Μπορεί να μειωθεί ο όγκος των αρχείων του;
- Είναι εφικτή η επέκταση του μοντέλου με διασφάλιση της λειτουργικότητάς του στην αναμενόμενη αναβάθμισή του (έκδοση CityGML 3.0) (Date κ.ά., 2021; Model & Swg, 2018);
- Είναι εφικτή η δημιουργία και υιοθέτηση ενός εθνικού προτύπου 3D μοντελοποίησης (Biljecki κ.ά., 2018a);
- Είναι δυνατή η ανάπτυξη ενός εθνικού προτύπου για τις ανάγκες της Ελλάδας με βάση τις υπάρχουσες υποδομές και ιδιαιτερότητες;

1.1.4 Ερωτήματα που αφορούν τη διαχείριση δεδομένων

Η ύπαρξη μιας βάσης δεδομένων (DB) για την αποθήκευση και διαχείριση ενός 3D μοντέλου είναι απαραίτητη (Υao κ.ά., 2018).

- Είναι εφικτή η αυτόματη παραγωγή ενός συμπαγούς σχεσιακού μοντέλου βάσης δεδομένων από ένα επεκταμένο πρότυπο;
- Πώς επηρεάζεται η διαχείριση ενός επεκταμένου μοντέλου στη βάση δεδομένων;

1.1.5 Ερωτήματα που αφορούν τις Εφαρμογές απεικόνισης 3D μοντέλων

Η οπτικοποίηση ενός 3D μοντέλου και των πληροφοριών που ενσωματώνονται σε αυτό είναι το επιστέγασμα όλων των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στη

μοντελοποίησή του. Προκύπτουν εύλογα ερωτήματα με ποιο τρόπο και πώς θα μπορούσε αυτή να περιέχει πληροφορίες για το προβαλλόμενο αντικείμενο (Blut & Blankenbach, 2020). Μάλιστα η δυνατότητα ταυτόχρονης θέασης 3D αντικειμένου και ενσωματωμένης πληροφορίας μεγιστοποιεί την αξιοποίηση από καθημερινές δραστηριότητες και συνεπώς αυξάνει και τη βιωσιμότητα ενός τέτοιου εγχειρήματος (Lim κ.ά., 2020). Βασική προϋπόθεση είναι η επίτευξη του προαναφερθέντος στόχου να είναι εφικτή με απλές προσιτές καθημερινές συσκευές επί του πεδίου και όχι με τη χρήση εξεζητημένων κατασκευών. Μάλιστα επίκεντρο της έρευνας αποτελεί η τεχνολογία επαυξημένης πραγματικότητας (Augmented Reality) και κατά πόσο είναι δυνατή η αξιοποίηση της για θέαση 3D αντικειμένων που έχουν εμπλουτιστεί με επεκτεινόμενα στοιχεία του βασικού προτύπου CityGML.

Κατά συνέπεια μια σειρά από εύλογα ερωτήματα διατυπώνονται με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία:

- Είναι δυνατή η ταυτόχρονη θέαση ενός 3D αντικειμένου εμπλουτισμένου με πληροφορίες (Blut & Blankenbach, 2020);
- Είναι δυνατή η αξιοποίηση της τεχνολογίας AR (Augmented Reality -AR) στην οπτικοποίηση εμπλουτισμένων 3D αστικών χώρων με χωρική πληροφορία (OGC, 2019; Wendel κ.ά., 2017);
- Είναι δυνατή η θέαση, μέσω τεχνολογίας AR, πληροφορίας που έχει ενσωματωθεί μέσω επέκτασης του προτύπου CityGML (OGC, 2019; Postert κ.ά., 2021);
- Είναι δυνατή η εξασφάλιση της ακεραιότητας της πληροφορίας (Alzahrani & Alfouzan, 2022);
- Είναι δυνατή η διαβάθμιση της οπτικοποιημένης πληροφορίας και η εξασφάλιση της ακεραιότητάς της (Alzahrani & Alfouzan, 2022; (OGC), 2019);
- Θα μπορούσε η πληροφορία αυτή να ενημερώνεται δυναμικά και να μην αποθηκεύεται μόνο στη συσκευή του χρήστη (Wendel κ.ά., 2017);

1.2 Ερευνητικοί στόχοι και συμβολή της διατριβής - καινοτομικά στοιχεία

Κύριος στόχος της παρούσας διατριβής είναι η ανάδειξη των βέλτιστων λύσεων για τη χωρική ανάλυση 3D μοντέλων πόλεων και η δυνατότητα αξιοποίησης αυτών μέσω τεχνολογιών AR. Θα επιχειρηθεί να απαντηθούν τρία σημαντικά προβλήματα (βλ. 1.1)

που αποτελούν τροχοπέδη στην αξιοποίηση της 3D μοντελοποίησης αστικών χώρων (Biljecki κ.ά., 2015a; Billen κ.ά., 2014).

Δηλαδή την ύπαρξη κατάλληλων δεδομένων 3D μοντελοποίησης, την ενσωμάτωση πληροφορίας σε 3D μοντελοποιημένα αντικείμενα και τις δυνατότητες οπτικοποίηση τους (Ghazwani & Smith, 2020).

Έχοντας αξιολογήσει τη σημαντικότητα της συλλογής δεδομένων για τη διαδικασία τρισδιάστατης μοντελοποίησης στα πλαίσια αυτής της διδακτορικής διατριβής θα επιχειρηθεί να διερευνηθούν δυνατότητες συλλογής ή δημιουργίας μαζικών δεδομένων χωρίς κόστος (Kavisha, 2020). Επίκεντρο της προσπάθειας αυτής θα είναι οι δωρεάν διαδικτυακοί χάρτες (Fan κ.ά., 2016).

Όσον αφορά την ενσωμάτωση χωρικής πληροφορίας εντός τρισδιάστατων αντικειμένων που αποτελούν ένα εκτεταμένο 3D αστικό χώρο θα επιχειρηθεί η επέκταση του διεθνούς ανοιχτού προτύπου CityGML προκειμένου να είναι δυνατή η κατά περίπτωση εμπλουτισμού με πληροφορία του υπό αναπαράσταση αντικειμένου (Brink κ.ά., 2014; OGC, 2019). Η επέκταση αυτή (GRextADE) θα εστιάσει στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της Ελληνικής πραγματικότητας και θα προσπαθήσει να εντάξει στοιχεία και χαρακτηριστικά, ώστε να μπορεί να αποτελέσει εθνικό κανονιστικό πρότυπο 3D μοντελοποίησης για την περίπτωση της Ελλάδας.

Τέλος, η υιοθέτηση τεχνολογιών AR θα επιφέρει ανάπτυξη εφαρμογών διαχείρισης χωρικών δεδομένων σε 3D μοντέλα πόλεων λόγω της δημοφιλίας των φορητών συσκευών απεικόνισης (smartphones, tablets) και της εύκολης πρόσβασης σε αυτά. Κατά συνέπεια θα αυξηθεί το ενδιαφέρον από οργανισμούς, φορείς, εταιρίες για εξατομίκευση αυτών των υπηρεσιών με ταυτόχρονη συμμετοχή τους στην 3D μοντελοποίηση, συλλογή και ενημέρωση πληροφοριών (Azuma, 1997). Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής θα επιχειρηθεί η ανάπτυξη μιας εφαρμογής AR κατάλληλης για οπτικοποίηση ενσωματωμένης πληροφορίας 3D αντικειμένων.

Η πρωτοτυπία της διδακτορικής διατριβής έγκειται στο ότι:

1. Παρουσιάζεται μια διαδικασία 3D μοντελοποίησης με την αυτοματοποίηση ενός μηχανισμού δημιουργίας μαζικών συνόλων δεδομένων .
2. Προτείνονται επιλογές μοντελοποίησης με βάση τις απαιτήσεις διαχείρισης και μελέτης του 3D μοντέλου.

3. Αναπτύχθηκε μεθοδολογία επέκτασης του μοντέλου CityGML, το GReXtADE, προκειμένου να ενσωματώσει πληροφορίες για την αξιοποίηση ακινήτων.
4. Διασφαλίζεται η διαλειτουργικότητα του μοντέλου επέκτασης, με τις επερχόμενες αναβαθμίσεις του προτύπου CityGML.
5. Δημιουργήθηκε ένα μοντέλο ψηφιακής ταυτότητας ακινήτων με πληροφορίες προερχόμενες από ανομοιογενείς πηγές.
6. Επιπρόσθετα, δημιουργήθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα χαρτογράφησης της διαλειτουργικότητας των εμπλεκόμενων εφαρμογών και των τύπων των αρχείων.
7. Αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα με χρήση διαφορετικής φιλοσοφίας λογισμικών οπτικοποίησης και αναπαράστασης 3D περιεχομένου.

Εκτιμάται ότι η επίτευξη των στόχων της διατριβής:

1. Συνεισφέρει στην ολοκληρωμένη μοντελοποίηση 3D αστικού περιβάλλοντος, ιδιαίτερα των κτιρίων, παρουσιάζοντας έναν οδικό χάρτη που απλοποιεί τις διαδικασίες.
2. Προτείνει έναν σαφή τρόπο επέκτασης του προτύπου CityGML προκειμένου να ενσωματώνει πληροφορίες πέρα αυτών που αρχικά προβλέφθηκαν από τους δημιουργούς του.
3. Συμβάλλει στην αξιολόγηση μια σειράς λογισμικών που αξιοποιούνται τα τελευταία χρόνια στην κατασκευή και διασύνδεση 3D μοντέλων.
4. Επισημαίνει τα προβλήματα εύρεσης, διαχείρισης και επαναχρησιμοποίησης δεδομένων για την 3D μοντελοποίηση.
5. Αναδεικνύει τους περιορισμούς στη διαλειτουργικότητα των υπαρχόντων συστημάτων και την ανάγκη υιοθέτησης κοινών προτύπων από τους δημιουργούς 3D μοντέλων.
6. Παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη διαγραμματική αποτύπωση όλου του φάσματος εργασιών προκειμένου να διευκολύνει τις μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες στον τομέα 3D μοντελοποίησης.
7. Η επέκταση δύναται να αποτελέσει εθνικό πρότυπο διαχείρισης 3D δεδομένων για την περίπτωση της Ελλάδας, όπως αντίστοιχα έχουν αναπτύξει διάφορες χώρες.
8. Και θέτει τις βάσεις για την υιοθέτηση ενός εθνικού προτύπου μοντελοποίησης με βάση τη διεθνή εμπειρία.

1.3 Διάρθρωση της διατριβής

Το κείμενο της διατριβής απαρτίζεται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος (Α' Μέρος) αποτελείται από πέντε επιμέρους κεφάλαια που δομούν το θεωρητικό πλαίσιο της διατριβής συμπεριλαμβανομένου και του πλαισίου που βασίστηκαν οι τρεις (3) εφαρμογές που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και παρουσιάζονται στο δεύτερο μέρος της (Β' Μέρος).

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται παράθεση των ερευνητικών ερωτημάτων και καθορίζεται η στοχοθεσία της διατριβής. Στα υπόλοιπα κεφάλαια (δεύτερο έως και το πέμπτο), έχει επιχειρηθεί να παρουσιασθούν, σε πυραμοειδή μορφή από το γενικό στο ειδικό και από το παλαιότερο στο νεότερο, όλα τα δεδομένα που συναποτελούν τον ευρύτερο επιστημονικό χώρο που λαμβάνουν χώρα τα ερευνητικά ερωτήματα αλλά και οι λύσεις-απαντήσεις αυτών.

Στο Κεφάλαιο 2 αξιολογείται ο ρόλος της πληροφορίας, παρουσιάζεται η περιγραφική ικανότητα των χωρικών δεδομένων και αξιολογείται η καθοριστικότητα των 3D GIS στη δόμηση της πληροφορίας.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύονται οι βασικές έννοιες της 3D μοντελοποίησης και παρουσιάζονται οι τύποι των 3D μοντέλων.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται και αναλύεται το σημαντικότερο σημασιολογικό πρότυπο CityGML και επιχειρείται μια εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση του μηχανισμού επέκτασης του προτύπου (ADE) με τους εγγενείς περιορισμούς του.

Το Α' μέρος της διατριβής ολοκληρώνεται με την παρουσίαση στο Κεφάλαιο 5 της τεχνολογίας Επαυξημένη Πραγματικότητα (Augmented Reality -AR). Αρχικά παρουσιάζονται τα δομικά στοιχεία της τεχνολογίας. Στη συνέχεια η συσχέτισή της με τα συστήματα GIS και τη χωρική πληροφορία και τέλος παρουσιάζονται οι προκλήσεις σύζευξης των τεχνολογιών AR και GIS.

Στο Β' μέρος παρουσιάζονται τρεις (3) πρωτότυπες εφαρμογές, οι οποίες αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής και επιχειρούν να επιλύσουν και να απαντήσουν ζητήματα και προκλήσεις που διατυπώθηκαν με τη μορφή ερευνητικών ερωτημάτων στο Κεφάλαιο 1.

Η πρώτη εφαρμογή που υλοποιήθηκε είναι μια μεθοδολογία δημιουργίας μαζικών δεδομένων για τη δημιουργία εκτεταμένων 3D αστικών χώρων και παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6. Ουσιαστικά πρόκειται για μια απάντηση στο μείζον πρόβλημα της εξεύρεσης δεδομένων για τις επιχειρούμενες 3D μοντελοποιήσεις. Διερευνήθηκαν οι δυνατότητες δημιουργίας και συλλογής μεγάλης κλίμακας δεδομένων (datasets) από δυναμικούς διαδικτυακούς χάρτες όπως το OpenStreetMap (OSM), προκειμένου να αξιοποιηθούν στην 3D μοντελοποίηση αστικού χώρου από εφαρμογές ΓΣΠ (Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών)³ και την οπτικοποίησή τους από διαδικτυακές εφαρμογές (web applications).

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται το GRextADE. Μία πρόταση επέκτασης (ADE) της τρέχουσας έκδοσης του προτύπου CityGML προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες 3D σχεδιασμού του αστικού περιβάλλοντος για την περίπτωση της Ελλάδας. Επιπροσθέτως επιχειρείται η ενσωμάτωση σημασιολογικών χαρακτηριστικών στα 3D κτιριακά μοντέλα. Επίκεντρο της προτεινόμενης επέκτασης είναι το νέο πληροφοριακό σύστημα Ηλεκτρονική Ταυτότητα Κτηρίων – HTK που υιοθετήθηκε από τις ελληνικές αρχές με την έλευση του 2021.

Η τρίτη εφαρμογή που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής αφορά την αξιοποίηση της τεχνολογίας επαυξημένης πραγματικότητας (AR) προκειμένου να οπτικοποιηθεί η χωρική πληροφορία που έχει ενσωματωθεί στα 3D μοντέλα. Σαν αποτέλεσμα της έρευνας αυτής στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται η δημιουργία ενός 3D μοντέλου υποδομών κοινής ωφελείας (δίκτυο ύδρευσης, αποχέτευσης και οπτικών ινών) και θέαση αυτού μέσω μιας εφαρμογής AR.

Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διατριβής με την αξιολόγηση των επιμέρους ευρημάτων κατά τη διαδικασία υλοποίησης των τριών εφαρμογών αλλά και της τελικής εφαρμογής τους.

Με σχόλια [am1]: Βάλε την υποσημείωση για το GIS στο σημείο που εμφανίζεται για 1η φορά ο όρος

³ GIS (Geographical Information Systems)

Κεφάλαιο 2, Οπτικοποίηση πληροφορίας

2.1 Εισαγωγή

Η ανάγκη για την άρση των περιορισμών της 2D αναπαράστασης στη δημιουργία και την οπτικοποίηση οδήγησε στην ένταξη της τρίτης διάστασης στον χώρο του σχεδιασμού και της αναπαράστασης αντικειμένων και περιβάλλοντος. Σημαντικό ρόλο σ' αυτό έπαιξε η εξέλιξη της τεχνολογίας κατά τις τελευταίες δεκαετίες (Huang κ.ά., 2016).

Η αναπαράσταση αντικειμένων και γεγονότων στις τρεις διαστάσεις σε σχέση με τις δύο παρουσιάζει μια σειρά από πλεονεκτήματα (Hassan κ.ά., 2021) όπως η ταχύτητα αντίληψης του περιβάλλοντος και η ευκολία προσανατολισμού (Leberl κ.ά., 1998; Zlatanova, 2002). Τα περισσότερα από τα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης αναπαράστασης οφείλονται στο γεγονός ότι ο φυσικός χώρος δραστηριοποίησης του ανθρώπου είναι ο τρισδιάστατος κόσμος που τον περιβάλλει (Hassan κ.ά., 2021; Wexler & Van Boxtel, 2005). Η τρίτη διάσταση στην αναπαράσταση προσφέρει ταχύτερη και πιο ολοκληρωμένη κατανόηση του περιγραφόμενου θέματος και κατά συνέπεια αποτελεσματικότερη λήψη αποφάσεων (Rock κ.ά., 1981).

Τα 3D μοντέλα αξιοποιούνται σε όλο και περισσότερες εφαρμογές και ανθρώπινες δραστηριότητες. Διάφοροι τομείς χρησιμοποιούν σαν δομικό στοιχείο τη χρήση 3D αναπαραστάσεων προκειμένου να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα της (Garner & Singla, 2018; George κ.ά., 2017; Roopavath & Kalaskar, 2017).

2.2 3D Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (3D GIS)

Για πολλές δεκαετίες η γενικότερη αίσθηση ήταν ότι η αποτύπωση της πραγματικότητας στις δύο διαστάσεις επαρκούσε για την περιγραφή του κόσμου παρότι αυτός είναι τρισδιάστατος (Josephat κ.ά., 2015). Η τεχνολογική εξέλιξη λειτούργησε διττά για το μέλλον των συστημάτων GIS. Έδειξε καταρχήν τους περιορισμούς αλλά παράλληλα έδωσε και την ευκαιρία να αξιοποιηθεί η τρίτη διάσταση για την περιγραφή του κόσμου που μας περιβάλλει (Zlatanova κ.ά., 2002). Σύντομα οι εφαρμογές GIS υιοθέτησαν τις τεχνολογικές καινοτομίες που επέτρεπαν στις μηχανές να περιγράψουν σύνθετες καταστάσεις αξιοποιώντας την τρίτη διάσταση (Norris, 2017).

Οι πρώτες προσπάθειες δημιουργίας 3D GIS αντιμετώπισαν πολλές τεχνικές δυσκολίες και αρκετή αμφισβήτηση (Giertsen & Lucas, 1994; Nguyen-Gia κ.ά., 2017).

Το ζητούμενο για τα νέα συστήματα ήταν να καταφέρουν να συνδυάσουν τη λειτουργικότητα των 2D συστημάτων ενσωματώνοντας την τρίτη διάσταση προκειμένου να περιγράψουν χωρικά φαινόμενα (Giertsen & Lucas, 1994).

Πλέον είναι ξεκάθαρο ότι τα παραδοσιακά 2D GIS δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις των προηγμένων 3D εργασιών που απαιτούνται στην εποχή μας. Για να είναι δυνατή η περιγραφή της πολυπλοκότητας του σύγχρονου κόσμου επιβάλλεται η αξιοποίηση των 3D GIS, έτσι ώστε να είναι εφικτή η παροχή πληροφοριών χωρικών δεδομένων και η εκτέλεση εργασιών 3D ανάλυσης. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο GIS (2D και 3D) είναι η δυνατότητα απεικόνισης και χωρικής ανάλυσης των 3D εφαρμογών (Zlatanova, 2002).

2.2.1 Οι λειτουργίες ενός συστήματος 3D GIS

Ένα 3D GIS σύστημα θα πρέπει να είναι σε θέση να εκτελέσει μία σειρά από χωρικές λειτουργίες όπως (Rahman, 2017) :

- Δυνατότητα ανάκτησης πληροφορίας.
- Εκτέλεση ερωτημάτων, βάση συγκεκριμένων κριτηρίων.
- Ανάλυση χωρικών και σημασιολογικών δεδομένων (ταξινόμηση, μέτρηση κ.τ.λ.)
- Λειτουργίες γεωμετρίας
- Λειτουργίες συνδεσιμότητας
- Υπολογισμούς (αποστάσεις, εμβαδό, όγκος στην τρίτη διάσταση).

Στα σύγχρονα συστήματα οι περισσότερες από τις παραπάνω λειτουργίες είναι διαθέσιμες μόνο για τις δύο διαστάσεις. Αρκετές εφαρμογές GIS είναι σε θέση να δομήσουν 2D τοπολογικά μοντέλα, ενώ μια σειρά από λογισμικά CAD είναι σε θέση να κάνουν έλεγχο τοπολογικής συνέπειας. Παρ' όλα αυτά η μετάβαση από τις δύο διαστάσεις στις τρεις απαιτεί τον καθορισμό νέων προσεγγίσεων, κανόνων και οπτικοποιήσεων, αφού και η πολυπλοκότητα των σχέσεων θα αυξηθεί.

Η πολυπλοκότητα ενός συστήματος καθορίζεται από την ποσοτική και ποιοτική ενσωμάτωση χωρικών και θεματικών δεδομένων 3D μορφής, σε συνδυασμό βέβαια με τις διαμορφωθείσες συσχετίσεις τους. Εκ της φύσεως τους τα 3D GIS είναι η ενδεδειγμένη λύση για τη διατήρηση της χωρικής και θεματικής πληροφορίας καθώς και της 3D τοπολογίας. Είναι αδύνατον για τα παραδοσιακά 2D GIS συστήματα να επιτελέσουν τον παραπάνω ρόλο, δηλαδή να διαχειριστούν την 3D γεωμετρία και πολύ περισσότερο να υποστηρίξουν εκτεταμένη χωρική και θεματική ανάλυση.

Με σχόλια [am2]: Σε κάποια σημεία αφήνεις κενό σε κάποια όχι

2.2.2 Η αξιοποίηση των 3D GIS

Αν θέλαμε να περιγράψουμε την κατάσταση θα μπορούσαμε να την παρομοιάσουμε με τη συζήτηση που διεξάγεται σήμερα για τα 5G δίκτυα (Younis κ.ά., 2017; Azpilicueta κ.ά., 2020). Η συζήτηση επικεντρώνεται στις μελλοντικές χρήσεις και εφαρμογές, τις αλλαγές που θα επιφέρουν στη ζωή των ανθρώπων χωρίς να έχουμε με επάρκεια δημιουργήσει τις απαιτούμενες υποδομές (Awange & Kiema, 2019).

Η αποτύπωση μιας σκηνής του φυσικού περιβάλλοντος μέσω ενός σύγχρονου 3D συστήματος GIS είναι σαν μια εξελιγμένη μορφή ενός σκίτσου ή σχεδιαγράμματος της 3D πραγματικότητας. Οι παραδοσιακοί 2D χάρτες προσφέρουν μια περιορισμένη αίσθηση για τον κόσμο, ο οποίος βέβαια εκτείνεται στις τρεις διαστάσεις. Δεν μπορούν να αντιπαρέλθουν της εγγενούς τους αδυναμίας αξιοποίησης ορθογώνιων προβολών της γης, σε αντίθεση με τα 3D συστήματα GIS (Pilouk, 1996). Έχει ιδιαίτερη σημασία να γίνει η διάκριση μεταξύ της πραγματικότητας από τη θέαση της. Η ανάπτυξη των συστημάτων GIS προς την τρίτη διάσταση αποτέλεσε μια αναγκαιότητα. Επιστήμες και κλάδοι όπως η γεωλογία, γεωγραφία, αρχιτεκτονική, κατασκευές και μηχανολογία εξαρτώνται άμεσα από τις 3D αναπαραστάσεις αλλά και τη φέρουσα πληροφορία αυτών.

Η αξιοποίηση των εφαρμογών 3D GIS παρουσιάζει αξιοθαύμαστο εύρος (Zlatanova, 2002). Παρόλα αυτά, θα μπορούσαμε να κατατάξουμε τις χρήσεις και την αξιοποίησή τους κυρίως στις παρακάτω κατηγορίες:

- *Διαχείριση*

Αύξηση αντιληπτικότητας στην κατανόηση των παραμέτρων για την επιλογή των ενδεδειγμένων αποφάσεων (Zlatanova & Tempfli, 2000).

- *Προσομοίωση*

Δυνατότητα αναπαράστασης και ανάλυσης σεναρίων λήψης αποφάσεων. Βελτιωμένη πρόβλεψη επιπτώσεων με τη χρήση εναλλακτικών σεναρίων (Huang κ.ά., 2016).

- *Διαμοιρασμός*

Κατανόηση της δομής του περιβάλλοντος ακόμα και από μη ειδικούς. Ο διαμοιρασμός και η επαναχρησιμοποίηση των μοντέλων με την πληροφορία που περιέχουν αυξάνει τη χρηστικότητα τους και τα καθιστά πολύτιμα σε μεγάλο φάσμα εργασιών και τομέων της παραγωγικής ζωής (Borouhaki & Malczewski, 2010).

- *Ψυχαγωγία*

Αξιοποίηση τους σε εφαρμογές και σε τομείς όπως η διασκέδαση και η ψυχαγωγία. Τα 3D GIS μπορούν να αξιοποιηθούν για τη δημιουργία και οπτικοποίηση περιβάλλοντος το οποίο θα βασίζεται στον φυσικό κόσμο αλλά και στον εικονικό για εφαρμογές Virtual Reality (VR), Video Games και ταινίες (Landeschi κ.ά., 2016; J. Lee, 2004).

Η διάδοση των 3D GIS εφαρμογών προϋποθέτει την ύπαρξη αποτελεσματικών 3D μοντέλων. Η διεθνής έρευνα έχει εστιάσει στην τρίτη διάσταση και διερευνά τις δυνατότητες ανάπτυξης ενός διαλειτουργικού 3D μοντέλου. Παρόλες τις προσπάθειες δεν είναι ακόμα εφικτή η δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο να είναι σε θέση να ικανοποιεί όλους τους τομείς εφαρμογών (Awange & Kiema, 2019). Η εμπειρία έχει δείξει ότι είναι θέμα χρόνου να επιτευχθεί η συνθήκη αυτή και να ικανοποιηθούν όλες αυτές οι προϋποθέσεις που θα επιτρέψουν την ανάπτυξη ενός κοινού συστήματος μοντελοποίησης, οπτικοποίησης και διαχείρισης 3D μοντέλων, ικανών να ανταποκριθούν στις νέες απαιτήσεις.

2.3 3D αναπαράσταση και βασικοί ορισμοί

Τα σύγχρονα συστήματα GIS έχουν την αναπαράσταση δεδομένων και αντικειμένων τόσο στις δύο διαστάσεις (2D) όσο και στις τρεις (3D). Η παράθεση των αναπαραστάσεων γίνεται σε επίπεδα (layers) πληροφοριών με δυνατότητες ανάλυσης και επεξεργασίας.

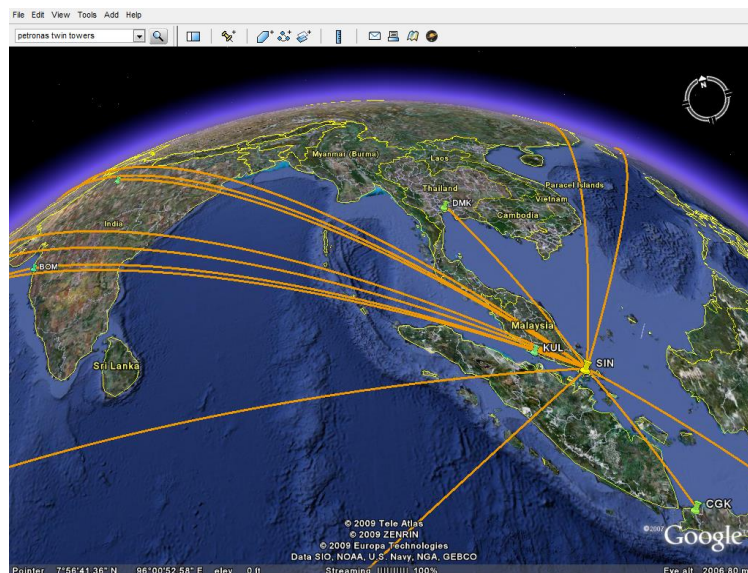
2.3.1 Απεικόνιση περιεχομένου στα συστήματα GIS

Την τελευταία δεκαετία τα λογισμικά GIS είναι σε θέση να οπτικοποιήσουν δεδομένα τόσο σε 2D όσο και σε 3D (Awange & Kiema, 2019; Ellul & Haklay, 2006b). Στους δύο αυτούς τρόπους απεικόνισης συναντούμε αρκετές κοινές δυνατότητες και λειτουργίες. Όπως δόμηση πληροφορίας σε επίπεδα (layers), χωρικές αναφορές (spatial references) αλλά και υποστήριξη λειτουργιών GIS (selection, analysis, editing κλπ.).

Οι διαφοροποιήσεις αφορούν κυρίως τον τρόπο και τις δυνατότητες προβολής. Για παράδειγμα η απεικόνιση ενός κτιρίου στις δύο διαστάσεις προβάλλεται ως ένα πολύγωνο σε διδιάστατη μορφή, ενώ χρησιμοποιώντας την τρίτη διάσταση η μορφή του θα αναπαρίσταται ως ογκομετρικό μοντέλο, που έχει τοποθετηθεί και περιστραφεί αναλόγως στην ακριβή του θέση (Ellul & Haklay, 2006b). Επίσης, για τη δημιουργία ενός 2D χάρτη δεν είναι δυνατή η αξιοποίηση ιδιοτήτων όπως η απαίτηση για επιφανειακό πλέγμα εδάφους, η ύπαρξη μιας πηγής φωτός και ατμοσφαιρικά φαινόμενα (Christian Harder, 2015).

2.3.2 Το προβολικό σκηνικό μιας 3D αναπαράστασης

Η 3D αναπαράσταση περιεχόμενου είναι δυνατόν να γίνει τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε τοπικό επίπεδο (Pilouk, 1996). Όσο αναφορά μια επιχειρούμενη οπτικοποίηση σε παγκόσμιο επίπεδο, ο δημοφιλέστερος τρόπος προβολής είναι η απεικόνιση του μοντέλου σε ένα παγκόσμιο προβολικό σύστημα με τη μορφή μιας υδρόγειου σφαίρας. Η αξιοποίηση της υδρόγειου σαν προβολικό σκηνικό επιτρέπει την αναπαράσταση δεδομένων που εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις και όπου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η καμπυλότητα της γης, όπως για παράδειγμα οι παγκόσμιες αεροπορικές διαδρομές (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Αναπαράσταση αεροπορικών διαδρομών (Πηγή: openflights.org)

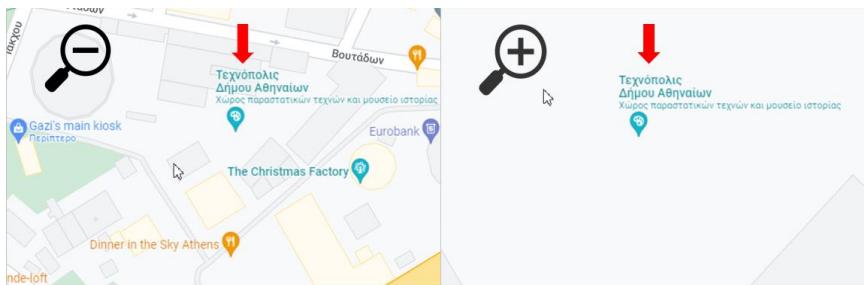
Η προβολή αναπαραστάσεων σε τοπικό επίπεδο έχει σαν χαρακτηριστικό ότι παρουσιάζεται αμετάβλητη η θέση τους σε μια καθορισμένη και οριοθετημένη περιοχή όπου απουσιάζει η καμπυλότητα. Συνεπώς, ενδείκνυται για αναπαράσταση μικρής έκτασης δεδομένων (Awange & Kiema, 2019) και με υπόβαθρο προβολής σε επίπεδες διδιάστατες επιφάνειες. Αυτού του είδους η προβολή σε οριοθετημένο πλαίσιο (δηλαδή σε τοπικό επίπεδο) ενδείκνυται για επιστημονική προβολή δεδομένων, όπου πρωτεύον είναι το σχετικό μέγεθος των χαρακτηριστικών και όχι η φυσική θέση των αντικειμένων (Harder, 2015).

2.3.3 Υπόβαθρο αναπαράστασης

Το υπόβαθρο αναπαράστασης (επιφάνεια) μπορεί να είναι μία φυσική οντότητα που μέσω της είναι δυνατή η οπτικοποίηση ενός θέματος που μπορεί να υφίσταται μόνο ως έννοια, όπως ενδεχομένως η επιφάνεια πυκνότητας πληθυσμού (Fra κ.ά., 2017). Όσο αναφορά την ακρίβεια αναπαράστασης μπορεί να είναι υψηλής ή χαμηλής ανάλυσης. Η πλειοψηφία των αναπαραστάσεων έχει σαν θεμελιώδη δομική μονάδα την επιφάνεια. Μπορεί να είναι είτε το επίκεντρο μιας αναπαράστασης για παράδειγμα μια κοιλάδα, ένα βουνό ή το υπόβαθρο πάνω στο οποίο θα αναπαρασταθούν κάποια άλλα δεδομένα όπως για παράδειγμα τα διοικητικά όρια μιας περιοχής (Zlatanova, 2000b). Πλέον είναι εφικτή η ενσωμάτωση πληροφορίας στις επιφάνειες για το ύψος των τρισδιάστατων διανυσματικών συμβόλων που αναπαρίστανται σε αυτές όπως για παράδειγμα κτίρια, φυσικά αντικείμενα, δέντρα, κλπ. που έως τώρα δεν ήταν δυνατόν να προσδιοριστεί η κατακόρυφη θέση τους μέσα στο απεικονιζόμενο περιβάλλον (Harder, 2015).

2.3.4 Προσδιορισμός μεγέθους αντικειμένων

Η πρόκληση στη κατασκευή ενός 3D περιβάλλοντος είναι η αναπαράσταση των αντικειμένων (κτίρια, βλάστηση, αντικείμενα) στο ίδιο σχετικό μέγεθος που έχουν στον φυσικό κόσμο. Επιπροσθέτως, ζητούμενο είναι κατά τη προσαρμογή του μεγέθους της οθόνης, και τις αυξομειώσεις του σκηνικού, τα αντικείμενα στην απεικόνιση να έχουν σταθερό μέγεθος. Ανεξαρτήτως αν πραγματοποιείται μεγέθυνση ή σμίκρυνση το αναπαριστώμενο αντικείμενο να παρουσιάζεται με τον ίδιο αριθμό εικονοστοιχείων (Rusu, 2010). Δηλαδή θα παρουσιάζεται όπως και στους 2D χάρτες, όπου το μέγεθος των συμβόλων δεν αλλάζει καθώς μεταβάλλεται η κλίμακα (Εικόνα 2) (Harder, 2015).



Εικόνα 2: Σημεία ενδιαφέροντος από το κέντρο της Αθήνας (Πηγή: Google Earth)

2.3.5 Μοντέλο δεδομένων αναπαράστασης

Ως μοντέλο δεδομένων ορίζεται “ένα ολοκληρωμένο σύνολο λεπτομερειών της επιφάνειας της γης” (Καϊμάρης & Καρανικόλας, 2014). Για παράδειγμα σε ένα ψηφιδωτό μοντέλο δεδομένων περιέχονται οι ιδιότητες της επιφάνειας της γης σε κελιά. Οι πληροφορίες που περιέχονται σε ένα τέτοιο μοντέλο αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων (ΒΔ), εξασφαλίζοντας ότι είναι προσβάσιμες και διαχειρίσιμες με ένα οργανωμένο τρόπο. Ουσιαστικά το μοντέλο δεδομένων σε ψηφιακή μορφή είναι η ίδια η βάση δεδομένων (ΒΔ) και εντός της περιέχονται κανόνες αλλά και λειτουργίες που είναι δυνατόν να αλληλοεπιδρούν μεταξύ στοιχείων και δεδομένων για την αλλαγή της κατάστασης τους και ανεξάρτητα από τον τρόπο αποθήκευσής τους. Τα στοιχεία εντός μίας ΒΔ ανάλογα με το Σύστημα Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων (ΣΔΒΔ), διατηρούνται σε σύνολα δεδομένων ή χωριστά. Στην πραγματικότητα λόγω της πολυπλοκότητας και του μεγέθους του αναπαριστώμενου μοντέλου δεν είναι εφικτή πάντοτε η διατήρηση και διαχείριση του από μια ΒΔ. Κατά συνέπεια είναι ανέφικτη η αναπαράσταση όλων των πτυχών της πραγματικότητας ενός εκτεταμένου μοντέλου. Η ποιότητα ενός μοντέλου καθορίζεται από το σκοπό του και τη χρήση του. Για να περιγραφούν αντιπροσωπευτικά διάφορες απόψεις της πραγματικότητας απαιτείται ένα ολοκληρωμένο μοντέλο. Λόγω αυτής της ικανότητας του είναι δυνατόν να εξυπηρετήσει περισσότερους και πιο σύνθετους σκοπούς και συνεπώς αποκτά μεγαλύτερη αξία και ειδικό βάρος (Pilouk, 1996).

2.4 Η σημασία της 3D μοντελοποίησης

Η έλευση της ψηφιακής εποχής επέφερε μεγάλες αλλαγές στις συνήθειες των ανθρώπων (Chaturvedi & Kolbe, 2016). Πολλά πράγματα άλλαξαν και κυρίως στο πώς αντιλαμβανόμαστε τον κόσμο (Ταο, 2013). Καθοριστικό ρόλο στη νέα πραγματικότητα που διαμορφώθηκε έπαιξε η τεχνολογική ανάπτυξη αλλά και η εξοικείωση όλο και μεγαλύτερου μέλους του πληθυσμού με τις νέες τεχνολογίες. Η δυνατότητα αξιοποίησης της τρίτης διάστασης μέσω των εξελιγμένων ψηφιακών μέσων συνετέλεσε στην 3D αναπαράσταση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων (Biljecki κ.ά., 2015). Η αντιληπτική ικανότητα του ανθρώπου βελτιώθηκε ποιοτικά αλλά και χρονικά. Πλέον είναι πολύ πιο εύκολο να αντιληφθεί πληροφορίες οι οποίες του παρατίθενται μέσω της τρίτης διάστασης μιας και είναι κάτι που προσομοιάζει περισσότερο στον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβάνεται τα πράγματα. Δεν πρέπει να αμελούμε ότι ο άνθρωπος ζει και λειτουργεί στον φυσικό κόσμο, ο οποίος ορίζεται από τις τρεις

Με σχόλια [am3]: Επαναφέρεις το 4.5 μετά από αυτό.

Με σχόλια [AL4R3]: OK

διαστάσεις (De La Losa & Cervelle, 1999). Για εκατοντάδες χρόνια ήταν αναγκασμένος να δημιουργεί, να κατανοεί και να διαμοιράζεται πληροφορίες για τον κόσμο που τον περιβάλλει στις δύο διαστάσεις (χάρτη, πίνακα). Πλέον με την τρισδιάστατη αναπαράσταση μπορεί να αντιλαμβάνεται ευκολότερα, ταχύτερα και αναλόγως να διαχειρίζεται τις πληροφορίες (Quijano-Sánchez κ.ά., 2020). Η αντίληψη και ο χρόνος αντίδρασης βελτιώνονται σημαντικά όταν οι πληροφορίες και τα δεδομένα αναπαρίστανται τρισδιάστατα (Joshi κ.ά., 2016).

Η επιστημονική έρευνα τα τελευταία χρόνια εστιάζει συστηματικά προς την τρίτη διάσταση εκμεταλλευόμενη τις δυνατότητες που αυτή προσφέρει. Πολλοί επιστημονικοί χώροι έχουν επικεντρώσει τις έρευνές τους προς αυτή την κατεύθυνση. Από τους ιδιαίτερα προνομαχικούς χώρους έρευνας, μέσω της 3D μοντελοποίησης, είναι η απεικόνιση φυσικών φαινομένων, οι γεωγραφικές επιστήμες, ο σχεδιασμός αλλά και η ανάλυση της πολύπλοκης αστικής πραγματικότητας (Garner & Singla, 2018). Ο ρόλος της τεχνολογικής ανάπτυξης είναι ιδιαίτερα σημαντικός στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Η χρήση των φορητών συσκευών και κυρίως των κινητών τηλεφώνων, σχεδόν σε όλες τις καθημερινές ανθρώπινες δραστηριότητες, δημιούργησε έναν νέο προνομαχικό χώρο για την αξιοποίηση της 3D μοντελοποίησης (Papagiannakis κ.ά., 2008). Οι φορητές συσκευές δεν είναι μόνο αντιληπτικά μέσα για τους χρήστες τους, παράλληλα είναι και τα εργαλεία συλλογής και δημιουργίας μαζικών δεδομένων τα οποία ήταν αξιοποιήσιμα από εφαρμογές, ερευνητές και εταιρείες (Musolesi, 2014).

Όσον αφορά τα συστήματα GIS η ερευνητική προσπάθεια επικεντρώθηκε στη 3D μοντελοποίηση αστικών χώρων, κάτι αναμενόμενο αν αναλογιστεί κάποιος ότι ο αστικός πληθυσμός είναι παραπάνω από το 50% του παγκόσμιου πληθυσμού της Γης⁴. Δομικό στοιχείο των υλοποιήσεων αυτών είναι τα δεδομένα που θα ορίσουν τα αντικείμενα και θα περιγράψουν τις συσχετίσεις μεταξύ τους.

Αρκετές φορές η συζήτηση γύρω από την τρισδιάστατη απεικόνιση εξαντλείται στις προσλαμβάνουσες μέσω των αντικειμένων που αναπαρίστανται και δεν αξιολογείται ίσως το σημαντικότερο πλεονέκτημα μέσω αυτού του είδους των αναπαραστάσεων που είναι η δυνατότητα ενσωμάτωσης κάθετης πληροφορίας (Arens κ.ά., 2005), όπως για παράδειγμα ογκομετρικά στοιχεία (ύψος βουνών, κτιρίων κλπ.).

⁴ Το 1960 κυμαινόταν γύρω στο 30% του συνολικού (Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας).

Ένα κρίσιμο ζήτημα που αντιμετωπίζεται με την 3D αναπαράσταση είναι και η δυνατότητα ενσωμάτωσης με εύκολο τρόπο αναγνωρίσιμων συμβόλων που υποβοηθούν την κατανόηση του αναπαριστώμενου χώρου. Εν ολίγοις, είναι δυνατή η αναπαράσταση εκτεταμένων χώρων που με την υποβοήθηση συμβόλων και αντικειμένων γίνονται ευκολότερα αναγνωρίσιμοι και κατανοητοί αυξάνοντας τη χρηστικότητα των αναπαραστάσεων αυτών.

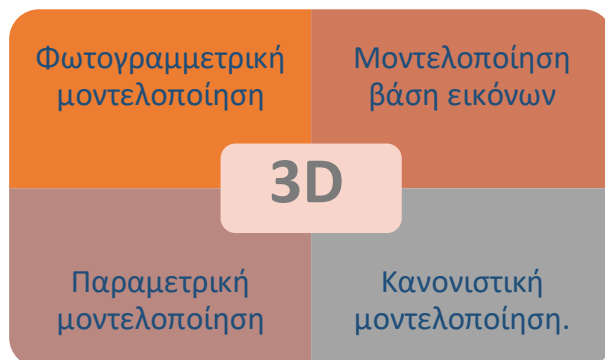
Μια άλλη απόδειξη της σημαντικότητας και της σημασίας της 3D μοντελοποίησης είναι η αύξηση της ταχύτητας προσανατολισμού και κατανόησης του χώρου. Μια από τις πιο επιτυχημένες προσπάθειες κατανόησης ενός εκτεταμένου χώρου είναι η οπτικοποίηση του ως στατικές 3D προβολές εναέριας άποψης (Yousef, 2015). Αυτού του είδους η προβολή, γνωστή ως *Bird's-eye view*, είναι από τις πιο οικείες για το κοινό που έχει να εξοικειωθεί να τις προβάλλει μέσω των συσκευών που χρησιμοποιεί (Εικόνα 3). Με τον τρόπο αυτό η ταχύτητα προσανατολισμού και η κατανόηση χώρου έχει αυξηθεί κατακόρυφα. Η κατανόηση του περιβάλλοντος γίνεται διαισθητικά από τον χρήστη (Harder, 2015) και η πλοήγηση φιλικότερη, αφού τα δεδομένα απεικονίζονται στον πραγματικό τους κόσμο και μέγεθος αλλά και στη σωστή τους θέση.



Εικόνα 3: "Bird's-eye view" Ντουμπάι, νικήτρια φωτογραφία διαγωνισμού Dronestagram 2017, στην κατηγορία Αστικός περιβάλλον, (Πηγή: <https://www.dronestagr.am/>)

2.5 Μοντελοποίηση και οπτικοποίηση διαδικασιών

Στον χώρο των 3D γραφικών η αναφορά στην 3D μοντελοποίηση περιγράφει στην πραγματικότητα τη διαδικασία δημιουργίας μιας μαθηματικής αναπαράστασης κάθε επιφάνειας ενός αντικειμένου που επιχειρείται να αναπαρασταθεί τρισδιάστατα. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών και το τελικό αποτέλεσμα ονομάζεται 3D μοντέλο του περιγραφόμενου αντικειμένου (Gingold κ.ά., 2009).



Εικόνα 4: 3D Μοντελοποίηση και οπτικοποίηση διαδικασιών, οι πιο σημαντικές τεχνικές (Πηγή: Ιδία εργασία)

Η 3D μοντελοποίηση είναι δυνατό να επιτευχθεί αυτοματοποιημένα ή χειροκίνητα. Στη σημερινή εποχή και με τις τεχνολογικές δυνατότητες που έχουμε στη διάθεσή μας υπάρχουν αρκετοί τρόποι τρισδιάστατης μοντελοποίησης (Εικόνα 4). Αν επιχειρούσαμε μια καταγραφή των σημαντικότερων τεχνικών, θα έπρεπε να σταθούμε στις εξής (Kolbe κ.ά., 2021; Brenner & Haala, 2001):

- Φωτογραμμετρική μοντελοποίηση (Photogrammetric modeling)
- Μοντελοποίηση βάσει εικόνων (Image-based modeling)
- Παραμετρική μοντελοποίηση (Parametric modeling)
- Κανονιστική μοντελοποίηση (Procedural Modeling).

2.5.1 Φωτογραμμετρική μοντελοποίηση (Photogrammetric modeling)

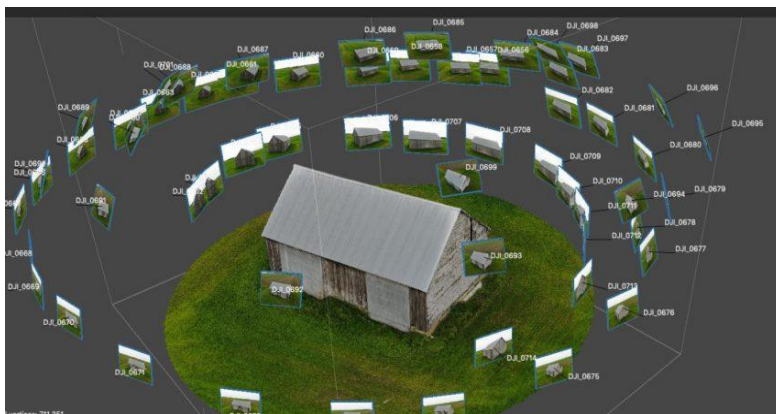
Η φωτογραμμετρία⁵ είναι μια τεχνολογία απόκτησης αξιόπιστων πληροφοριών για φυσικά αντικείμενα και το περιβάλλον μέσω εικόνων και τη δημιουργία τρισδιάστατων αναπαραστάσεων από αυτές (Morgenroth & Gomez, 2014). Όπως υποδηλώνει το

⁵ Ο όρος φωτογραμμετρία επινοήθηκε από τον αρχιτέκτονα Albrecht Meydenbauer (1843-1921). Παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1967, στο άρθρο "Die Photometrographie. In: Wochenblatt des Architektenvereins zu Berlin Jg. 1, 1867, Nr. 14, S. 125-126".

όνομα η φωτογραμμετρία έχει να κάνει με τις φωτογραφίες, οι οποίες εισάγονται στο λογισμικό μοντελοποίησης όπου χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι για να καθοριστούν οι διαστάσεις και το σχήμα του αντικειμένου (Tingdahl & Van Gool, 2011), παρόλο που οι φωτογραφίες είναι διδιάστατες (Kolbe, 2009). Στη συνέχεια δημιουργείται ένα 3D μοντέλο με βάση αυτά τα δεδομένα.

Είναι προφανές ότι μέσω των ερευνών πεδίου μπορούμε να έχουμε μια πιο αξιόπιστη διαδικασία σε σχέση με τις φωτογραμμετρικές μετρήσεις. Παρ' όλα αυτά η φωτογραμμετρική μοντελοποίηση δίνει τη δυνατότητα, χωρίς ιδιαίτερο κόστος και αξιοθαύμαστη ταχύτητα, τη συλλογή δεδομένων που προκύπτουν από την καταγραφή εικόνων (Bourke, 2014). Τα δεδομένα που προκύπτουν από την ανάλυση των φωτογραφιών είναι μετρήσιμες ποσότητες από τις οποίες προκύπτουν τρισδιάστατα σημεία που συνθέτουν τα αντίστοιχα μοντέλα. Γίνεται ουσιαστικά λήψη πολλαπλών επικαλυπτόμενων φωτογραφιών και εξαγωγή μετρήσεων από αυτές για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων αντικειμένων ή σκηνών (Zhigalov κ.ά., 2017). Η βασική αρχή είναι αρκετά παρόμοια με τον τρόπο που πολλές κάμερες δημιουργούν ένα πανόραμα συρράπτοντας μεταξύ τους επικαλυπτόμενες φωτογραφίες σε ένα δισδιάστατο (2D) μωσαϊκό.

Η τεχνική της φωτογραμμετρίας μπορεί να υλοποιηθεί με χειροκίνητες διαδικασίες ή αυτοματοποιημένες (Portalés κ.ά., 2010). Ένα σύστημα φωτογραμμετρίας και τηλεπισκόπησης αποτελείται από το υλικό (κάμερες, φακοί) και λογισμικό (εφαρμογή εξαγωγής 3D σημείων). Μέσω του υλικού κατά κύριο λόγο γίνεται η καταγραφή των εικόνων και με το λογισμικό η επεξεργασία τους. Το λογισμικό και ο αλγόριθμος που έχει βασιστεί έχει τον πρωταρχικό ρόλο σ' αυτού του είδους μοντελοποίησης. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η εξαγωγή, με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, των τρισδιάστατων μοντέλων (Sužiedelytė-Visockienė κ.ά., 2015). Η φωτογραμμετρία στη σημερινή εποχή είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη με κύρια χαρακτηριστικά το χαμηλό κόστος, ευκολία υλοποίησης, την ταχύτητα συλλογής δεδομένων, καταγραφή σε δυσπρόσιτα σημεία αλλά και την αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια 3D αναπαράστασης, όπως βλέπουμε για παράδειγμα στην *Εικόνα 5* (Zhigalov κ.ά., 2017).



Εικόνα 5: Χρήση φωτογραμμετρίας για τη μοντελοποίηση κτίσματος (Πηγή: <https://wikifactory.com/>)

Οι εικόνες οι οποίες εισάγονται στο λογισμικό φωτογραμμετρικής μοντελοποίησης προκειμένου να γίνει η επεξεργασία πρέπει να είναι ψηφιακές⁶. Επίσης απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός εικόνων και αυστηρά προκαθορισμένη σειρά και θέση λήψης τους σε σχέση με την Image based διαδικασία που περιγράφεται στο 4.4.2. Για να μοντελοποιηθεί τρισδιάστατα ένα αντικείμενο θα πρέπει αρχικά να εντοπιστούν τα σημεία που είναι εύκολο να αναγνωριστούν. Τέτοια είναι τα σημεία αναφοράς όπως για παράδειγμα οι γωνίες σε ένα κτίριο και στη συνέχεια να διαχωριστούν. Κρίσιμο σημείο είναι η αναγνώριση και ο διαχωρισμός των βασικών σημείων αναφοράς στο σύνολο εικόνων που περιέχονται. Η τελική μορφή του 3D μοντέλου γίνεται διαδραστικά με τμηματοποίηση των σημείων σε ξεχωριστά αντικείμενα και με την ανάλογη επεξεργασία του παραγόμενου αποτελέσματος. Αν για παράδειγμα θέλουμε να μοντελοποιήσουμε ένα κτίριο, πρώτα γίνεται τρισδιάστατη ανασύσταση του σκελετού δηλαδή αναδεικνύονται και μοντελοποιούνται οι κορυφές και οι ακμές που απεικονίζουν τη γενική μορφή του κτιρίου και στη συνέχεια προστίθενται οι υφές των επιφανειών προκειμένου να γίνει ρεαλιστικό το τελικό μοντέλο. Τόσο η φωτογραμμετρία όσο και η τηλεπισκόπηση αποτελούν μια αποτελεσματική λύση για τη δημιουργία και οπτικοποίηση τρισδιάστατων αντικειμένων και είναι δυνατόν να εξάγουν γεωμετρική όσο και σημασιολογική πληροφορία από εικόνες ακόμα και με τη χρήση υπέρυθρων ακτινών (Dai κ.ά., 2014; Qin & Gruen, 2020).

⁶ Στην περίπτωση αναλογικών εικόνων, θα πρέπει να γίνει σάρωση προκειμένου να ψηφιοποιηθούν

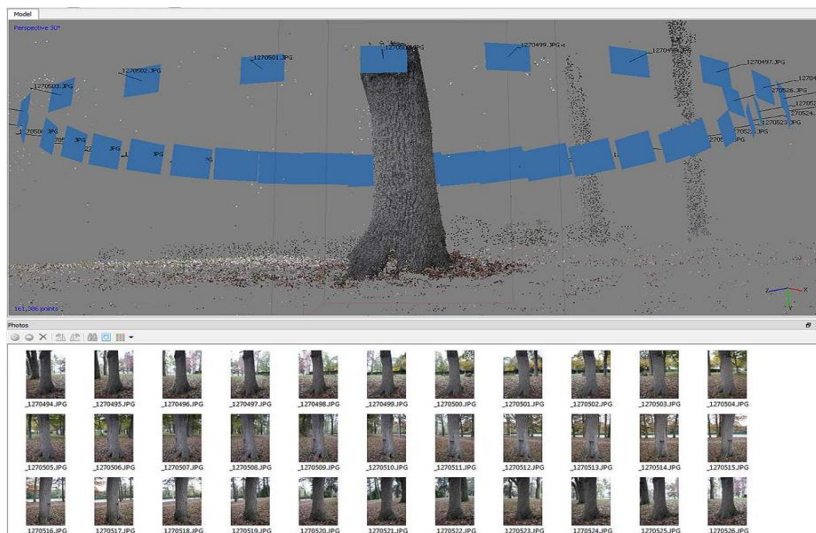
2.5.2 Μοντελοποίηση βάσει εικόνων (Image-based modeling)

Στη μοντελοποίηση βάσει εικόνων (Image-based modeling) χρησιμοποιούνται εικόνες για την ανασύσταση αντικειμένων που υπάρχουν στο φυσικό περιβάλλον (Tan, 2014) και προσομοιάζει αρκετά με τη φωτογραμμετρική μοντελοποίηση (4.4.1). Υλοποιείται, κατά βάση, μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών και θεωρείται περισσότερο ως μια πρόχειρη μοντελοποίηση παρά ως αλγοριθμικά ελεγχόμενη διαδικασία 3D αναπαράστασης που βασίζεται σε πραγματικές γεωμετρίες (Li κ.ά., 2019; Zhong κ.ά., 2020). Σε σχέση με τη φωτογραμμετρία απαιτούνται λιγότερες φωτογραφίες, χωρίς να είναι αυστηρά προκαθορισμένη η σειρά λήψης τους. Βασική απαίτηση είναι ο εμπλουτισμός τους με πληροφορίες διαστάσεων και αποστάσεων και η όλη διαδικασία ανακατασκευής του 3D μοντέλου είναι περισσότερο χειροκίνητη. Η διασωλήνωση των εργασιών είναι η εξής:

- η λήψη όσο το δυνατό καλύτερων φωτογραφιών γύρω από το αντικείμενο - στόχο
- μέτρηση και καταχώρηση κύριων και δευτερευουσών διαστάσεων σε φωτογραφίες
- τρισδιάστατη μοντελοποίηση με βάση τις φωτογραφικές αναφορές

Ουσιαστικά τα βήματα εργασίας είναι λιγότερα από τη φωτογραμμετρία. Ωστόσο, η διαφορά εδώ είναι ο ανθρώπινος παράγοντας που θα αναλάβει την τελική φάση ανασύστασης του 3D μοντέλου με τη βοήθεια των φωτογραφικών αναφορών. Η εξειδίκευση και η εμπειρία παίζει καθοριστικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα. Η μεθοδολογία αυτή έχει εφαρμογή σε διάφορους κλάδους με ένα βασικό πλεονέκτημα τη σχετική ευκολία δημιουργίας ρεαλιστικών τρισδιάστατων μοντέλων. Επιπρόσθετα η αποδοχή της είναι υψηλή στον τομέα των γραφικών υπολογιστών.

Ενώ η μοντελοποίηση αυτού του είδους βασίζεται σε ένα σύνολο 2D εικόνων μιας σκηνής, έχοντας ως σκοπό την οπτικοποίηση ενός 3D αντικειμένου και τη δυνατότητα θέασης αυτής της σκηνής από διαφορετικές προοπτικές τίθενται μια σειρά από περιορισμούς οι οποίοι δημιουργούνται λόγω της φύσης της διαδικασίας (Zhong κ.ά., 2020). Εν ολίγοις η διαδικασία αυτή αφενός αφορά περιορισμένου μεγέθους αναπαραστάσεων και αφετέρου δεν ενδείκνυται για εκτεταμένη 3D μοντελοποίηση εξωτερικών χώρων (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Image-based modeling, για την παραγωγή της 3D γεωμετρίας και την απόδοση υφών σε ένα αντικείμενο αξιοποιούνται πολλές εικόνες. (Πηγή: <https://www.agisoft.com>)

Αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη λύση για την αστική ανοικοδόμηση αλλά απαιτείται ακόμα περισσότερη εξέλιξη στους μηχανισμούς επεξεργασίας και εξαγωγής. Εν κατακλείδι, όσον αφορά τα πλεονεκτήματα της μεθοδολογίας αυτής θα σημειώναμε την ικανότητα καταγραφής λεπτομερειών και τις επιδράσεις του πραγματικού κόσμου που σχετίζονται με ατέλειες της πραγματικότητας, κάτι που αγνοούνταν έως τώρα (Mostafa & Hegazy, 2021). Τέλος δύο σημαντικά και χρόνια προβλήματα των γραφικών υπολογιστών μπορούν να αντιμετωπιστούν από την περιγραφείσα μέθοδο:

- α) Η απαίτηση απλουστευμένων τεχνικών τρισδιάστατης μοντελοποίησης, κατάλληλες για τη μοντελοποίηση αυξημένης πολυπλοκότητας.
- β) Η αναγκαιότητα αύξησης της ταχύτητας μοντελοποίησης επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη απόδοση.

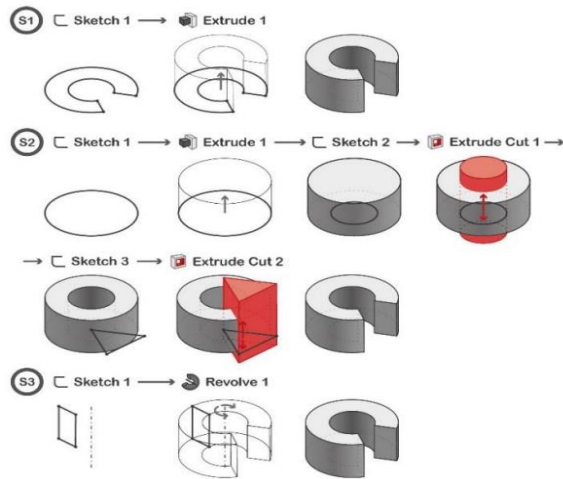
Άξια αναφοράς είναι η δυνατότητα, των σύγχρονων λογισμικών, δημιουργίας 3D μοντέλων υψηλής ακρίβειας από νέφη σημείων (point cloud) που προκύπτουν από ένα σύνολο εικόνων (Εικόνα 7) (Mostafa & Hegazy, 2021; Tan, 2014).



Εικόνα 7: Σύννεφο σημείων (point cloud) κτίσματος από το λογισμικό 3DS Max της Autodesk (Πηγή: www.autodesk.com)

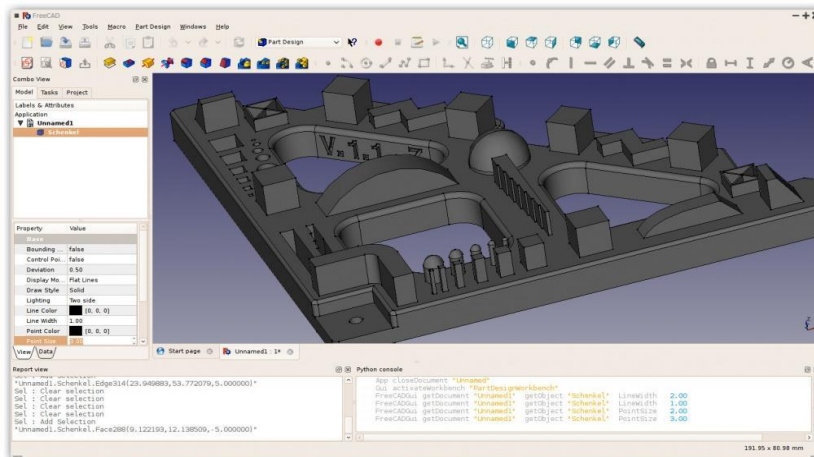
2.5.3 Παραμετρική μοντελοποίηση (Parametric modeling)

Η παραμετρική μοντελοποίηση ή αλγοριθμική μοντελοποίηση (algorithmic modeling) βασίζεται σε μεθόδους οπτικοποίησης που υλοποιούνται μέσω υπολογιστικών ή αλγοριθμικών τεχνικών (Shah, 1996). Κατ' αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ο αυτοματισμός των διαδικασιών 3D μοντελοποίησης (Εικόνα 8), η εύκολη αναπροσαρμογή των αποτελεσμάτων και η εξοικονόμηση χρόνου (Parametric κ.ά., 2022). Επίκεντρο αυτής της μεθοδολογίας είναι ένα σύνολο κανόνων βάσει των οποίων αναδομούνται τρισδιάστατα τα αντικείμενα. Δομικό στοιχείο της διαδικασίας είναι ένα ολοκληρωμένο δίκτυο αλληλοσυσχετίσεων μεταξύ μεμονωμένων αντικειμένων και όχι στη σταθερή μέτρηση των ποσοτήτων όπως γίνεται στον παραδοσιακό σχεδιασμό (Sacks κ.ά., 2004).



Εικόνα 8: Παράδειγμα τριών διαφορετικών λύσεων για τη δημιουργία της ίδιας γεωμετρίας (Πηγή: *Geometric Variability in Parametric 3D Models: Implications for Engineering Design*, Aranburu A, Justel D, Camba J, *Procedia CIRP* (2022) 109 383-388)

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατές αλλαγές σε ένα μόνο στοιχείο, ενώ συσχετίζεται με άλλα εντός ενός ολοκληρωμένου συστήματος (Εικόνα 9). Αυτού του είδους η μοντελοποίηση έχει σαν κύρια χαρακτηριστικά τη ταχύτητα και το χαμηλό κόστος υλοποίησης. Έχει εφαρμογές στον κατασκευαστικό τομέα, στη δημιουργία προσομοιώσεων αλλά και στον τομέα της ψυχαγωγίας (videogames, κινηματογράφος, κλπ.).



Εικόνα 9: Παραμετρική μοντελοποίηση μέσω του open source λογισμικού FreeCAD (Πηγή: <https://www.freecadweb.org/>)

Ειδικά στη διαδικασία 3D μοντελοποίησης ενός κτιρίου η μέθοδος αυτή ενδείκνυται για την τροποποίηση του επιπέδου λεπτομέρειας LOD με παρόμοια μεθοδολογία όπως της μοντελοποίησης βάσει εικόνων (Muller, Wonka, Haegler, & Ulmer, 2006).

2.5.4 Κανονιστική μοντελοποίηση (Procedural Modeling)

Η έλλειψη ποσοτικών και ποιοτικών δεδομένων αποτελεί σημαντικό εμπόδιο στον χώρο της 3D μοντελοποίησης. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού γίνεται αξιοποίηση ενός πεδίου της τεχνητής νοημοσύνης Artificial intelligence (AI) της μηχανικής/υπολογιστικής όρασης (computer vision⁷). Μία από τις βασικές προκλήσεις του τομέα είναι η συγκέντρωση μεγάλων συνόλων δεδομένων με υψηλό εύρος διακύμανσης. Στην πραγματικότητα έχουμε την αλγοριθμική δημιουργία μεγάλου πλήθους δεδομένων (datasets) μέσω εφαρμογής συνόλων κανόνων (Biljecki κ.ά., 2016). Αφού δημιουργηθούν τα σύνολα δεδομένων αξιοποιείται μια σειρά τεχνικών, του χώρου των γραφικών για υπολογιστές, για τη δημιουργία 3D μοντέλων και υφών που υπακούν στους δομικούς κανόνες που έχουν υπαγορευτεί στους αλγορίθμους.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό της κανονιστικής μοντελοποίησης είναι η δημιουργία μοντέλων από ένα σύνολο κανόνων ή μέσω αυτοβελτίωσης των μοντέλων. Η μεθοδολογία αυτή ακολουθείται όταν είναι δύσκολο να δημιουργηθεί ένα 3D μοντέλο λόγω έλλειψης ή περιορισμένου αριθμού δεδομένων εισόδου (Turksever, 2015). Εκ του αποτελέσματος μπορεί να επιτευχθεί ένας αξιοσημείωτος πλουραλισμός δεδομένων εξόδου (Εικόνα 10) που μπορεί να αναπαραστήσει με αξιοθαύμαστο ρεαλισμό ένα φυσικό περιβάλλον (αυτό συμβαίνει συχνά για αντικείμενα όπως κτίρια, φυτά ή τοπία).

⁷ Computer Vision είναι ένα πεδίο τεχνητής νοημοσύνης (AI) που επιτρέπει σε υπολογιστές και συστήματα να αντλούν σημαντικές πληροφορίες από ψηφιακές εικόνες, βίντεο και άλλες οπτικές εισροές. Εάν η τεχνητή νοημοσύνη επιτρέπει στους υπολογιστές να σκέφτονται, η όραση του υπολογιστή τους δίνει τη δυνατότητα να βλέπουν, να παρατηρούν και να κατανοούν.



Εικόνα 10: Procedural Modeling (Πηγή: <https://vcg.leeds.ac.uk/projects/procex/>)

Ως διαδικασία είναι ιδιαίτερα αποδοτική και αποδεικνύεται πως με τη χρήση λειτουργιών και κανόνων είναι δυνατή η δημιουργία ιδιαίτερα πολύπλοκων σχημάτων⁸. Η δυναμική της παρούσας τεχνικής μοντελοποίησης οφείλεται κατά κύριο λόγο στο ότι με τη σύνθεση απλών κανόνων πραγματοποιείται η κωδικοποίηση σημασιολογικών και γεωμετρικών σχέσεων. Η όλη διαδικασία πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού CGA (Computer Generated Architecture). Η CGA είναι μια γλώσσα προγραμματισμού για τη δημιουργία αρχιτεκτονικού περιεχομένου που επιτρέπει τη δημιουργία κανόνων για τον έλεγχο και διαχείριση συνόλων κανόνων που αφορούν τη γεωμετρία, τις αναλογίες και τις υφές των επιμέρους στοιχείων ενός αστικού περιβάλλοντος (κτίρια, δρόμοι κλπ.).

Η μοντελοποίηση γίνεται βάσει γραμματικής για τον ορισμό κανόνων που βελτιώνουν επαναληπτικά ένα σχέδιο δημιουργώντας όλο και περισσότερες λεπτομέρειες. Οι κανόνες CGA λειτουργούν σε σχήματα που αποτελούνται από μια γεωμετρία σε ένα τοπικά προσανατολισμένο πλαίσιο οριοθέτησης (το λεγόμενο πεδίο εφαρμογής). Στη *Εικόνα 11* παρουσιάζεται η διαδικασία εξαγωγής μέσω του City Engine⁹. Στην αριστερή πλευρά εμφανίζεται το αρχικό σχήμα και στη δεξιά πλευρά εμφανίζεται το τελικό μοντέλο.



Εικόνα 11: Παραμετρική μοντελοποίηση με κανόνες CGA μέσω του λογισμικού City Engine (Πηγή: <https://doc.arcgis.com/en/cityengine/2020.0/help/help-cga-modeling-overview.htm>)

⁸ Ακόμα και κτίρια με σύνθετη και πολύπλοκη γεωμετρία.

⁹ Το ArcGIS CityEngine είναι ένα εμπορικό λογισμικό 3D μοντελοποίησης που αναπτύχθηκε από την Esri R&D Center Zurich (πρώην Procedural Inc) το 2008 και ειδικεύεται στη δημιουργία τρισδιάστατων αστικών περιβαλλόντων.

2.6 Εφαρμογές 3D αστικού χώρου

Όταν αναφερόμαστε σε τρισδιάστατα μοντέλα αστικού χώρου ουσιαστικά περιγράφουμε τη γραφική αναπαράσταση των αντικειμένων που υπάρχουν και συναντούμε σε μία πόλη. Τα αντικείμενα αυτά αναπαρίστανται σε ψηφιακά μοντέλα και για τη μοντελοποίησή τους αξιοποιούνται τρεις βασικές γεωχωρικές προσεγγίσεις:

1. Αξιοποίηση συμβατικών τεχνικών π.χ. δεδομένα από Διανυσματικούς Χάρτες (Vector Map data), Ψηφιακά Μοντέλα Υψομέτρων¹⁰ (DEM), Αεροφωτογραφίες
2. Υψηλής ανάλυσης δορυφορικές φωτογραφίες από LASER scanning
3. Επίγειες εικόνες Φωτογραμμετρίας (Close Range φωτογραμμετρίας) με Ψηφιακά Μοντέλα Επιφανείας (Digital Surface Model - DSM) και χαρτογράφηση υφής.

Τα τρισδιάστατα μοντέλα που είναι προϊόντα των παραπάνω γεωχωρικών προσεγγίσεων, μπορούν να αξιοποιηθούν σε διάφορους τομείς διαχείρισης δραστηριοτήτων μιας πόλης (Joshi κ.ά., 2016; Quijano-Sánchez κ.ά., 2020; Tao, 2013) όπως:

- Στις μεταφορές και την πλοήγηση.
- Την περιβαλλοντική διαχείριση και τον αστικό σχεδιασμό.
- Την εμπορική δραστηριότητα της πόλης.
- Την προμήθεια ενέργειας και τον ενεργειακό σχεδιασμό.
- Τη δημόσια τάξη και ασφάλεια.
- Την αγορά ακινήτων.
- Τη διαχείριση της κυκλοφορίας και εκδηλώσεων.
- Στην πρόληψη και αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών.

Αν επιχειρούσαμε να μοντελοποιήσουμε τη μεθοδολογία κατασκευής αστικού περιβάλλοντος, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία (Biljecki & Ledoux, κ.ά., 2017; Brenner & Haala, 2001; Turksever, 2015), θα έπρεπε να υλοποιηθεί σε δύο βασικές φάσεις (Εικόνα 12). Η πρώτη αφορά τη δημιουργία ενός μικρού σχετικά μοντέλου πόλης με χαμηλό επίπεδο λεπτομέρειας με σκοπό τη γενικότερη αναπαράσταση του

¹⁰ Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους θεωρείται κάθε “ψηφιακή αναπαράσταση της συνεχούς μεταβολής του αναγλύφου στο χώρο. DEM: Digital Elevation Model, DEM: Digital Elevation Matrix, DTM: Digital Terrain Model

αστικού χώρου και η δεύτερη την εισαγωγή λεπτομέρειας σε συγκεκριμένα τμήματα και περιοχές αυξημένου ενδιαφέροντος του περιορισμένου αρχικού 3D μοντέλου.



Εικόνα 12: Σταδιακή μοντελοποίηση πόλης (Biljecki κ.ά. 2016)

Από τη στιγμή που θα δημιουργηθεί ένα 3D μοντέλο πόλης προκύπτει το ζήτημα της βιωσιμότητας του (Nouvel κ.ά., 2017). Για να επιτευχθεί θα πρέπει να τηρηθούν απαραίτητα μια σειρά από προϋποθέσεις κατά την ανάπτυξή του, τη διαχείριση και τον διαμοιρασμό του. Η βιωσιμότητα είναι μια πρόκληση που αντιμετώπισαν όλες οι πόλεις (χώρες) οι οποίες δημιούργησαν τρισδιάστατα μοντέλα του αστικού τους περιβάλλοντος. Είτε οι προσπάθειες αφορούσαν εθνική μοντελοποίηση είτε είχαν τοπικό χαρακτήρα ή ακόμα και μοντελοποιήσεις ιδιωτικών φορέων στο τέλος είχαν να αντιμετωπίσουν ερωτήματα που αφορούσαν τη βιωσιμότητα της επιχειρούμενης αναπαράστασης. Κρίσιμο ζήτημα για τη μακροημέρευση μιας επιχειρούμενης μοντελοποίησης είναι κατά πόσο είναι δυναμική, δηλαδή να εξασφαλίζεται η διόρθωση, συμπλήρωση και επέκταση του μοντέλου.

Μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση είναι αυτή η εξασφάλιση κινήτρων σε οργανισμούς, ιδρύματα και εταιρίες όχι μόνο για την αξιοποίηση τρισδιάστατων μοντέλων αλλά και την αναβάθμισή τους. Στο κεφάλαιο 8 της παρούσας διατριβής θα αναλυθούν οι προϋποθέσεις που θα πρέπει να ικανοποιεί ο σχεδιασμός και ο ρόλος της προτυποποίησης δομών και χωρικών βάσεων (πχ. CityGML) (de Vries & Zlatanova, 2011).

2.6.1 Επισκόπηση αξιοποιήσιμων 3D μοντέλων

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μία έντονη δραστηριοποίηση όσο αφορά τη δημιουργία 3D συνόλων δεδομένων με σκοπό την αναπαράσταση αστικών χώρων. Ουσιαστικά οι περισσότερες από τις προσπάθειες αυτές αφορούν μοντελοποιήσεις οι οποίες λαμβάνουν χώρα αξιοποιώντας ανοιχτά δεδομένα τα οποία συλλέγουν κυρίως οι τοπικές αρχές¹¹. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν ιδρύματα και εθελοντικές ομάδες γεωπληροφορικής που συνεισφέρουν στη δημιουργία αυτών των συνόλων (Aguíario, 2016b; Hecht κ.ά., 2015a).

Ουσιαστικά καμία χώρα δεν έχει καταφέρει να έχει ολοκληρωμένο 3D μοντέλο του συνόλου της επικράτειας της. Εξαιρέση αποτελεί η Ολλανδία (βλ. 7.1.1) η οποία έχοντας ένα εθνικό πρότυπο μοντελοποίησης¹², (Aydar κ.ά., 2016; van den Brink κ.ά., 2013), αρχικά για διδιάστατη αναπαράσταση αστικών χώρων, δημιούργησε την κατάλληλη υποδομή προκειμένου να συλλέξει δεδομένα για τρισδιάστατη μοντελοποίηση και την αξιοποίηση τους για οπτικοποίηση αστικών χώρων. Αντιθέτως, υπάρχουν αρκετές υλοποιήσεις τρισδιάστατων μοντέλων πόλεων (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Πόλεις και περιοχές σε όλο τον κόσμο με ανοιχτά σύνολα δεδομένων
(Πηγή: <https://3d.bk.tudelft.nl/opensource/opencities/>)

dataset	country	year	building LoD	other classes	textures
Adelaide	Australia	2015	LoD1/LoD2	Terrain	TRUE
American cities	USA	2019	LoD1		FALSE
Austin	USA	2013	LoD2		FALSE
Berlin	Germany	2013	LoD2		TRUE
Bogotá	Colombia	2019	LoD1		FALSE
Bordeaux	France	2012	LoD2		TRUE
Boston	USA	2017	LoD1+LoD2	Terrain	FALSE
Brussels	Belgium	2014	LoD2		FALSE
Cambridge	UK		LoD1		FALSE
Dresden	Germany	2009	LoD1/LoD2/LoD3		partially
Espoo	Finland	2019	LoD1-3		TRUE
Estonia	Estonia	2021	LoD1+LoD2		FALSE
Fredericton	Canada	2016	LoD2		TRUE
Greater Geelong	Australia	2016	LoD1/LoD2	Terrain	FALSE
Hamburg	Germany	2017	LoD1 and LoD2		
Helsinki	Finland	2016	LoD2		TRUE
Ingolstadt (by research project)	Germany	2020	LoD3	mainly buildings	TRUE
Japan (PLATEAU)	Japan	2021	LoD1+LoD2		FALSE
Linz	Austria	2011	LoD2		FALSE
Luxembourg	Luxembourg	2017	LoD1+LoD2.3		FALSE

¹¹ Στις περιπτώσεις που υπάρχει ένα οργανωμένο πλαίσιο συλλογής όπως για παράδειγμα το κτηματολόγιο.

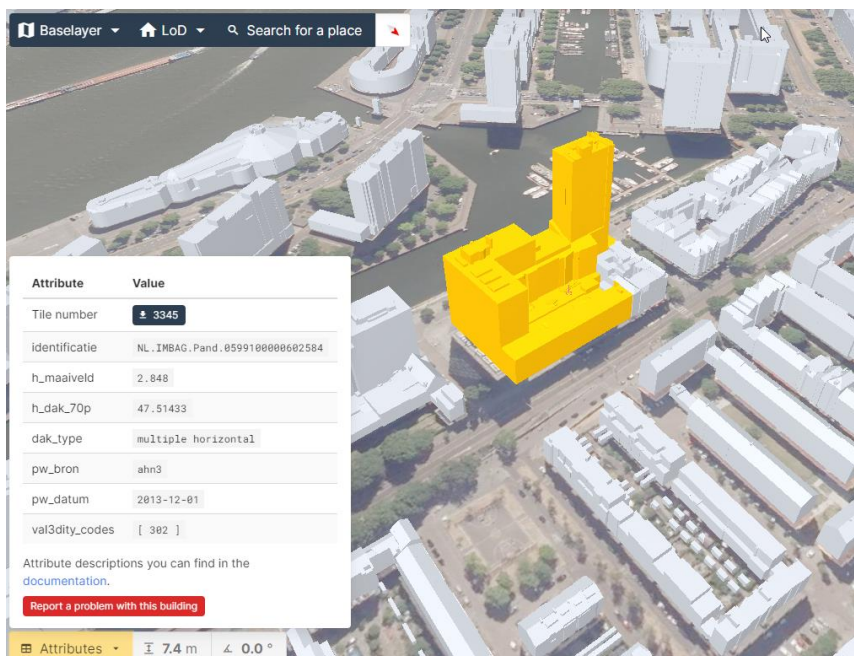
¹² IMGeo (Information Model Geography)

Με σχόλια [am5]: Επαναφέρει την 4.6 και γράφεις και για συγκεκριμένες εφαρμογές στον αστικό χώρο από τη βιβλιογραφία (νέο κομμάτι)

Με σχόλια [AL6R5]: Οκ, επαναφορά και προσθήκη νέο κομμάτι 2.6.2

Lyon	France	2009, 2012, 2015	LoD2	Terrain, water	TRUE
Montréal	Canada	2013	LoD2	Terrain (TIN in CityGML format)	TRUE
Namur	Belgium	2018	LoD2		TRUE
Netherlands 3D BAG	the Netherlands	2021	LoD1+LoD2		FALSE
New York City (by DoITT)	United States	2016	LoD2		FALSE
New York City (by TUM)	United States	2015	LoD1	Roads, lots, parks, water, terrain	FALSE
North Rhine-Westphalia (state)	Germany	2016	LoD1+LoD2		FALSE
Philadelphia	USA	2015	LoD2		TRUE
Potsdam	Germany	2018	LoD2		FALSE
Poznań	Poland	2019	LoD1+LoD2		FALSE
Rotterdam	Netherlands	2010	LoD2		TRUE
San Francisco	USA	2017	LoD1		FALSE
Singapore	Singapore	2019	LoD1		FALSE
The Hague	Netherlands	2018	LoD2	Terrain	FALSE
Toronto	Canada	2016	LoD1		
Vancouver	Canada	2009	LoD1		FALSE
Vantaa	Finland	2017	LoD1+LoD2		TRUE
Various CityJSON datasets	Netherlands, Canada, USA, Austria	2018	LoD2		some
Vienna	Austria	2018	LoD2		FALSE
Zürich	Switzerland	2019	LoD1+LoD2	Terrain	FALSE

Από τον Πίνακα 1 γίνεται αντιληπτό ότι τα τελευταία χρόνια έχουν αυξηθεί οι προσπάθειες συλλογής και διάθεσης 3D δεδομένων κατάλληλων για την αναπαράσταση εκτεταμένων αστικών χώρων. Άλλωστε επιβεβαιώνεται η τάση αυτή και από τις web εφαρμογές που υπάρχουν στο διαδίκτυο που αξιοποιούν τα δεδομένα αυτά για να αναπαραστήσουν 3D κυρίως μοντέλα πόλεων (Εικόνα 13) (Biljecki κ.ά., 2018a).



Εικόνα 13: Web εφαρμογή 3D αναπαράστασης της πόλης του Ρότερνταμ (Ολλανδία). Τα 2D δεδομένα του IMGeo μπορούν να αναπαρασταθούν σε 2,5D (δηλαδή ως αναπαράσταση επιφάνειας ύψους) και 3D (ως ογκομετρική αναπαράσταση) (Πηγή: <https://3dbag.nl/en/viewer>)

2.6.2 Παραδείγματα 3D μοντελοποίησης αστικών χώρων

Τις τελευταίες δεκαετίες τα 3D μοντέλα πόλεων έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως για οπτικοποίηση. Ωστόσο, σήμερα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε διάφορους τομείς και για ένα μεγάλο εύρος εργασιών πέρα από την οπτικοποίηση. Ένα 3D μοντέλο πόλης είναι μια αναπαράσταση ενός αστικού περιβάλλοντος με μια 3D γεωμετρία κοινών αστικών αντικειμένων και δομών, με τα κτίρια ως το πιο εξέχον χαρακτηριστικό (Billen κ.ά., 2014). Ένα τυπικό 3D μοντέλο πόλης είναι δυνατόν να κατασκευαστεί μέσω διαφόρων τεχνικών, για παράδειγμα φωτογραμμετρία και σάρωση με λέιζερ (Suveg & Vosselman, 2004), εξώθηση από 2D ίχνη κτιρίων (Ledoux & Meijers, 2011), αρχιτεκτονικά μοντέλα και σχέδια (Donkers κ.ά., 2016), φορητές συσκευές (Rosser κ.ά., 2015), διαδικαστική μοντελοποίηση (Tsiliakou κ.ά., 2014) αλλά και εθελοντική γεωπληροφορία¹³ (Goetz & Zipf, 2012). Φαινομενικά, η οπτικοποίηση κυριάρχησε στις πρώτες χρήσεις των 3D μοντέλων πόλεων. Ωστόσο, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, τα 3D μοντέλα πόλεων έχουν γίνει πολύτιμα για πολλούς σκοπούς

¹³ Volunteered geographic information (VGI)

πέρα από την οπτικοποίηση και χρησιμοποιούνται σε ευρύ φάσμα εφαρμογών (Kolbe, 2003; Rosser κ.ά., 2015).

2.6.2.1 Διαχείριση και πολεοδομικός σχεδιασμός αστικού περιβάλλοντος

Η 3D γεωπληροφορία είναι πανταχού παρούσα στον πολεοδομικό σχεδιασμό για διάφορες εργασίες, ειδικά την οπτικοποίηση του αστικού περιβάλλοντος (Lewis κ.ά., 2012; Métral κ.ά., 2007). Ο πολεοδομικός σχεδιασμός εμπεριέχει και συνυπολογίζει έναν ευρύτατο αριθμό παραγόντων (Isikdag & Zlatanova, 2010). Ωστόσο, υπάρχουν αρκετές τεκμηριωμένες και συγκεκριμένες περιπτώσεις αξιοποίησης της 3D γεωπληροφορίας για τη διευκόλυνση του αστικού σχεδιασμού όπως πάρκων (Iyendo Jnr & Alibaba, 2015), διερεύνησης αστικών αντικειμένων που θα παρεμπόδιζαν τον σχεδιασμό μιας νέας γραμμής μετρό (Biljecki κ.ά., 2015), χρονική ανάλυση των αλλαγών στο περιβάλλον (Kaňuk κ.ά., 2015), την ανάλυση του αστικού ορίζοντα (Czyńska & Rubinowicz, 2014) και την προσομοίωση κυκλοφορίας (Wang κ.ά., 2008).

Τα 3D μοντέλα πόλεων έχουν χρησιμοποιηθεί για μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών που σχετίζονται με αναλύσεις μικροκλίματος: για την εκτίμηση της ροής του ανέμου και την αξιολόγηση της άνεσης του ανέμου (Amorim κ.ά., 2012), για την κατανόηση του αστικού θερμικού περιβάλλοντος με εκτίμηση πολλών περιβαλλοντικών μεταβλητών (Maragkogiannis κ.ά., 2014), πρόβλεψη της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους (Upadhyay κ.ά., 2014), διερεύνηση της επίδρασης των συστημάτων διαχείρισης απόρριψης θερμότητας κλιματισμού κτιρίων κατοικιών (Hsieh κ.ά., 2011) και για την πρόβλεψη ποιότητα αέρα (Zheng κ.ά., 2010).

Επίσης τα 3D μοντέλα πόλεων χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί πόσο εκτίθεται ένα κτίριο στον ήλιο προκειμένου να αξιολογηθεί η καταλληλότητα της εγκατάστασης ηλιακών (φωτοβολταϊκών) πάνελ σε στέγες (Fath κ.ά., 2015). Οι πληροφορίες σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένας από τους παράγοντες για την εκτίμηση των τιμών των ακινήτων (Helbich κ.ά., 2013). Τέλος, 3D μοντέλα πόλης που περιέχουν παράθυρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη του εσωτερικού φωτισμού (Saran κ.ά., 2015).

Η εκτίμηση των σκιών που ρίχνουν τα κτίρια χρησιμοποιείται συχνά στον πολεοδομικό σχεδιασμό (Herbert & Chen, 2015), για παράδειγμα, για την αξιολόγηση της επίδρασης ενός υπό ανέγερση κτιρίου στο περιβάλλον του. Μάλιστα τέτοιου είδους

αναλύσεις θεωρούνται προαπαιτούμενο για την έκδοση πολεοδομικής άδειας από ορισμένους δήμους (Biljecki κ.ά., 2017; Fath κ.ά., 2015), όπως η Χάγη στην Ολλανδία (Voorstel van Het College Inzake Beleid Dakopbouwen Gemeente Den Haag, 2011) και η Mississauga στον Καναδά (Standards for shadow studies - City of Mississauga, 2014.).

Τα 3D δεδομένα χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μοντέλων που απαντούν πώς βλέπτονται οι πολίτες των πόλεων από την ηχορύπανση (de Kluijver & Stoter, 2003; Kuffer, 2008) και πώς να μετριάστεί, δηλαδή πού να τοποθετηθούν τα ηχητικά φράγματα (Reza Ranjbar κ.ά., 2012).

Μερικές επιπλέον χρήσεις των 3D μοντέλων αφορούν την αξιολόγηση της προβολής (πρόσοψης) των κτιρίων για λόγους μάρκετινγκ (Albrecht κ.ά., 2013), στον προσδιορισμό της βέλτιστης θέσης για κάμερες παρακολούθησης (Ying κ.ά., 2002), στην αξιολόγηση τοποθέτησης αισθητήρων¹⁴ (Afghantoloe κ.ά., 2014), στη βελτίωση της οδικής ασφάλειας (Bassani κ.ά., 2015), αξιολόγηση κινδύνου για τρομοκρατικές ενέργειες (VanHorn & Mosurinjoh, 2010) και στη μαζική αποτίμηση ακινήτων στις αστικές περιοχές, με βάση την υπόθεση ότι η θέα από ένα διαμέρισμα είναι ένας από τους παράγοντες που καθορίζουν την τιμή του (Yu κ.ά., 2007).

Τέλος, είναι δυνατός ο υπολογισμός πυκνότητας του δομημένου περιβάλλοντος και των επιπτώσεων στον αστικό χώρο (Ghassoun, Löwner, κ.ά., 2015). Τα 3D μοντέλα πόλεων είναι χρήσιμα για ογκομετρικές αναλύσεις και παρέχουν σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των δεδομένων 2D καθώς περιέχουν το ύψος των κτιρίων (Hamaina κ.ά., 2013). Οι πληροφορίες για την ογκομετρική πυκνότητα μπορούν για παράδειγμα να χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση της διασποράς των αστικών ρύπων (Ghassoun, Löwner, κ.ά., 2015; Ghassoun, Ruths, κ.ά., 2015).

2.6.2.2 Εκτίμηση ενεργειακής ζήτησης

Τα τελευταία χρόνια ερευνητές, κυρίως στη Γερμανία, χρησιμοποίησαν 3D μοντέλα πόλεων για να συνδυάσουν τα δεδομένα του όγκου των κτιρίων, του αριθμού των ορόφων, του τύπου του κτιρίου και άλλων χαρακτηριστικών για να προβλέψουν την ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση ή/και ψύξη (Kaden & Kolbe, 2014). Οι Previtali κ.ά. (Previtali κ.ά., 2014) αξιολόγησαν τη χρήση 3D μοντέλων πόλης για την εκτίμηση του

¹⁴ Smart cities

κόστους μετασκευής ενός κτιρίου. Σε μια σχετική ανάλυση σχεδιασμού μετασκευής, οι Tabrizi και Sanguinetti (Tabrizi & Sanguinetti, 2013) χρησιμοποίησαν τις πληροφορίες των υλικών, των καιρικών δεδομένων και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

2.6.2.3 3D Κτηματολόγιο

Ορισμένες κυβερνήσεις εστιάζουν τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη της εγγραφής ιδιοκτησίας σε 3D για να παρέχουν πληροφορίες για περίπλοκες καταστάσεις ιδιοκτησίας, όπως κάθετες ιδιοκτησία σε κτίρια και υπόγειες κατασκευές (π.χ. καλώδια και αγωγοί, γκαράζ στάθμευσης). Τα 3D μοντέλα πόλεων έχουν χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση και διαχείριση δεδομένων σχετικά με τα αντίστοιχα φυσικά (Billen & Zlatanova, 2003; Vandyshcheva κ.ά., 2012).

Τα 3D μοντέλα πόλεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του εσωτερικού μεγέθους ενός κτιρίου εντός του νομικού πλαισίου (δηλαδή καθαρή επιφάνεια, χώρος ορόφου) (Boeters κ.ά., 2015; Shiravi κ.ά., 2015). Για παράδειγμα σύμφωνα με την ολλανδική νομοθεσία αν το ύψος είναι χαμηλότερο από 1,5 m δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς της επιφάνειας. Ο προσδιορισμός του ύψους του εκάστοτε επιπέδου (ορόφου) μπορεί να υπολογιστεί από το εξωτερικό ενός κτιρίου χωρίς εσωτερικά δεδομένα. Αυτή η περίπτωση χρήσης έχει δυνατότητα φορολογίας και αποτίμησης κτιρίων.

Οι Sharkawi και Abdul-Rahman (Sharkawi & Rahman, 2014), Pédrinis κ.ά. (Pédrinis κ.ά., 2015) και ο Qin (Qin, 2014) χρησιμοποιούν 3D μοντέλα πόλεων για ανίχνευση αλλαγών και καταπατήσεων εντός αστικού ιστού. Για παράδειγμα δύναται να εντοπιστεί εάν έχει κατασκευαστεί μια παράνομη επέκταση σε ένα σπίτι ή η ανέγερση ενός αυθαίρετου κτιρίου (Rotterdam Analyses City Lidar Data with New Technique | GIM International, 2015).

2.6.2.4 Πλοήγηση

Τα 3D μοντέλα πόλεων, ή σε κάποιες περιπτώσεις 3D αντικείμενα όπως κτίρια, χρησιμοποιούνται για τη διευκόλυνση του προσανατολισμού του χρήστη στο χώρο για σκοπούς πλοήγησης. Η πλοήγηση στους αστικούς χώρους με χρήση 3D μοντέλων πόλεων μπορεί να βοηθήσει στον προσανατολισμό καθώς προσφέρει αναγνωρίσιμα ορόσημα. Άλλωστε έχει αναδειχθεί η «πιο διαισθητική» φύση των 3D μοντέλων σε σχέση με τους 2D χάρτες (Jobst & Germachis, 2007; Nurminen, 2008).

Σε πρόσφατες μελέτες υπολογίστηκε ότι οι άνθρωποι χρησιμοποιούν 3D απεικονίσεις περίπου στο ένα τρίτο των πλοηγήσεων τους (Limpisathian κ.ά., 2015). Όσο πιο ρεαλιστικές είναι οι αναπαραστάσεις τόσο περισσότερο συμβάλλουν στην ταχύτερη αναγνώριση αντικειμένων και σχημάτων (Bemasocchi κ.ά., 2012).

Οι Slingsby και Raper (Slingsby & Raper, 2008) διερευνούν την πλοήγηση πεζών ενισχυμένη από δεδομένα που δεν είναι διαθέσιμα σε 2D, όπως ράμπες και σκαλοπάτια.

Τα 3D μοντέλα που εμπεριέχουν και εσωτερικό χώρο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εύρεση βέλτιστης διαδρομής και προσβασιμότητας προς κάποιο σημείο ενδιαφέροντος (Thill κ.ά., 2011), σε περιπτώσεις εκκένωσης (Zhang κ.ά., 2012), πλοήγησης σε μεγάλους χώρους (σιδηροδρομικούς σταθμούς, αεροδρόμια, εμπορικά κέντρα) (Schaap κ.ά., 2011), καθορισμός εσωτερικών διαδρομών για άτομα με ειδικές ανάγκες (Kim & Wilson, 2015) και εντοπισμό διαδρομής προς τον πλησιέστερο σημείο ιατρικής βοήθειας (πχ. προς έναν απινιδωτή) (Dao κ.ά., 2012). Οι πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση εσωτερικής και εξωτερικής πλοήγησης για τη διευκόλυνση αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης σε εσωτερικούς χώρους (Tashakkori κ.ά., 2015).

2.6.2.5 Χρήση εκτός αστικού περιβάλλοντος

Οι Roßmann κ.ά. (Roßmann κ.ά., 2013) ανέπτυξαν ένα σύστημα διαχείρισης δασών που χρησιμοποιεί 3D ογκομετρικά δεδομένα βλάστησης σε συγκρίσιμο επίπεδο λεπτομέρειας με τα μοντέλα κτιρίων. Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς όπως: πλοήγηση στα δάση, ανάπτυξη στρατηγικής βιώσιμης διαχείρισης για τη συγκομιδή και πρόβλεψη ανάπτυξης δέντρων. Η τηλεπισκόπηση έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τη δασοκομία, σε τομείς όπως η εκτίμηση του όγκου της ξυλείας (Rahlf κ.ά., 2014). Ωστόσο, αυτές οι εφαρμογές εξαιρούνται από αυτήν την ανάλυση καθώς δε μπορούν να θεωρηθούν ως 3D μοντέλα πόλεων.

Η χρήση 3D μοντέλων έχει επίσης εφαρμογή στη γεωργία. Για παράδειγμα η για την εκτίμηση της σκιασμένης επιφάνεια εδάφους (λόγω γεωγραφίας, ύπαρξης δάσους ή κτιρίων) και κατά επέκταση τον υπολογισμό απόδοσης γεωργικών εκτάσεων (InGeoForum: Information and Cooperation Forum for Geodata of ZGDV e.V., 2013).

2.6.2.6 Οπτικοποίηση αστικών πληροφοριών

Μια εφαρμογή οπτικοποίησης των 3D μοντέλων πόλεων είναι η παρουσίαση της υπάρχουσας πόλης και η διάδοση αστικών πληροφοριών στους πολίτες (Wu κ.ά., 2010), και οι προτεινόμενες εξελίξεις και βελτιώσεις σε ένα 3D εικονικό περιβάλλον (Maciej Serda κ.ά., 2013). Για παράδειγμα, το μοντέλο της πόλης της Αδελαΐδας στην Αυστραλία παρέχει ένα εργαλείο δημόσιας διαβούλευσης για να βοηθήσει στην οπτικοποίηση των μεταφορών, του αστικού σχεδιασμού και του σχεδιασμού (3D Model of the City of Adelaide - Dataset - Data.Sa.Gov.Au, 2012).

Τα 3D μοντέλα χρησιμοποιούνται επίσης για τη διερεύνηση της τοπικής δυναμικής και των καταλληλότερων αστικών δεικτών ανάπτυξης (Marina κ.ά., 2012), και βρίσκουν πεδίο εφαρμογής και στον τουρισμό για εικονικές περιηγήσεις (Koutsoudis κ.ά., 2007).

Η εφαρμογή της επικοινωνίας αστικών πληροφοριών στους πολίτες, ο αντίκτυπος των προτεινόμενων έργων και η παρουσίαση της ανάπτυξης μιας πόλης συχνά οδηγεί στην υλοποίηση των 3D μοντέλων πόλεων ως φυσικά μοντέλα (Prilaz, 2009). Επιπλέον, σε αυτήν την περίπτωση χρήσης, τα 3D μοντέλα πόλεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μορφή επικοινωνίας της πολιτιστικής κληρονομιάς (Trapp κ.ά., 2010).

Το 3D GIS χρησιμοποιείται στην αρχαιολογία, για παράδειγμα, για την αστική ανακατασκευή αρχαίων πόλεων, τη μοντελοποίηση αρχαιολογικών 3D αντικειμένων και των ιδιοτήτων τους, τη διαχείριση ανασκαφών, τον έλεγχο υποθέσεων ανακατασκευής και την ανάλυση της ανάπτυξης των τοποθεσιών με την πάροδο του χρόνου (Apollonio κ.ά., 2012; De Roo κ.ά., 2017).

2.6.2.7 Διαχείριση εγκαταστάσεων

Η γεωπληροφορία είναι πανταχού παρούσα στη διαχείριση εγκαταστάσεων. Πρόσφατα έχουν χρησιμοποιηθεί 3D μοντέλα για τον σκοπό αυτό στη διαχείριση λιμένων (Zlatanova & Beetz, 2012), αεροδρομίων (Tang & Xu, 2012) και δικτύων κοινής ωφελείας (R. Liu & Issa, 2012).

2.6.2.8 Ασφάλεια και καταστάσεις έκτακτης ανάγκης

Τα 3D μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαχείριση καταστροφών και την αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, μπορούν να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες όπως η θέση των σημείων εισόδου του κτιρίου (Kwan & Lee, 2005;

Tashakkori κ.ά., 2015). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της βέλτιστης θέσης των θυρών έκτακτης ανάγκης και των σημείων προσέγγισης των πυροσβεστών σε περίπτωση φωτιάς στο κτίριο (Chen κ.ά., 2014). Επίσης είναι δυνατή η εκτίμηση των φυσικών επιπτώσεων μιας έκρηξης για τον προσδιορισμό των κινδύνων για ανθρώπους και υποδομές (Willenborg, 2015),

2.6.2.9 Πληθυσμιακή εκτίμηση

Ορισμένοι τομείς εφαρμογής μπορεί να απαιτούν τον αριθμό των κατοίκων σε μια συγκεκριμένη περιοχή, για παράδειγμα την αξιολόγηση του πληθυσμού και του αριθμού των επηρεαζόμενων κτιρίων που επηρεάζονται από τον θόρυβο ενός αιολικού πάρκου (InGeoForum, 2013).

Δεδομένου ότι το μέγεθος ενός κτιρίου και ο τύπος του παρέχουν μια ένδειξη για τον αριθμό των κατοίκων, η χρήση 3D γεωπληροφοριών για την εκτίμηση του πληθυσμού έχει αποτελέσει θέμα πολλών ερευνητικών εργασιών (Kunze & Hecht, 2015; Ural κ.ά., 2011).

Το αποτέλεσμα αυτής της περίπτωσης χρήσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλούς τομείς εφαρμογών. Για παράδειγμα για τη βελτιστοποίηση της κάλυψης της κάλυψης ραδιοφωνικού σήματος κινητής τηλεφωνίας (δηλαδή για τη βελτιστοποίηση του δικτύου για κάλυψη περισσότερων ατόμων) (Tutschku, 1998), και την απόκριση έκτακτης ανάγκης για παράδοση βοήθειας και εκκένωση (Schneiderbauer & Ehrlich, 2005) (π.χ. εκτιμώντας τον πληθυσμό που έχει πληγεί από μια πλημμύρα (Akbar κ.ά., 2013)).

2.6.2.10 Φυσικές καταστροφές

Οι Χριστοδούλου κ.ά. (Christodoulou κ.ά., 2010) και Kemec κ.ά. (Kemec κ.ά., 2010) χρησιμοποιούν 3D μοντέλα πόλεων για την πρόβλεψη και την απεικόνιση ζημιών σε κτίρια από σεισμούς. Αυτή η περίπτωση χρήσης σχετίζεται με την ασφάλεια, μετριασμό των επιπτώσεων των σεισμών και αντιμετώπιση έκτακτων περιστατικών.

Η εκτίμηση της έκτασης των πλημμυρών είναι ένα παραδοσιακό θέμα στο GIS, κυρίως με ψηφιακά μοντέλα εδάφους (Y. B. Liu κ.ά., 2003). Ωστόσο, τα μοντέλα της διάδοσης και των επιπτώσεων των πλημμυρών από υπερχειλίση νερού από υδάτινα σώματα ή έντονη βροχόπτωση μπορούν να βελτιωθούν χρησιμοποιώντας 3D μοντέλα πόλεων (Shen κ.ά., 2020).

Οι Varduhn κ.ά. (Varduhn κ.ά., 2015) και (Sam Amirebrahimi Abbas Rajabifard & Ngo, 2016) χρησιμοποιούν 3D μοντέλα για να αξιολογήσουν τον κίνδυνο πλημμύρας και τις πιθανές ζημιές σε μικροκλίμακα. Αυτή η περίπτωση χρήσης είναι σημαντική για ασφάλειες (διαχείριση κινδύνου), εκκένωση και διαχείριση κοινής ωφελείας.

Κεφάλαιο 3, Τύποι 3D μοντέλων

3.1 Εισαγωγή

Τα 3D μοντέλα εξελίχθηκαν στο πέρασμα των χρόνων με βάση τη χρήση τους και τις απαιτήσεις που δημιουργήθηκαν. Η βασική απαίτηση από τα πρώτα 3D μοντέλα ήταν η σωστή τοπολογική αναπαράσταση των γεωμετριών. Σε δεύτερο χρόνο η ενσωμάτωση και διαχείριση δεδομένων και η τελική εξέλιξη για αυτά ήταν η αποτελεσματική αποθήκευση και εφαρμογή ερωτημάτων σε μεγάλα σύνολα δεδομένων (Breunig & Zlatanova, 2011).

Ειδικά όσο αναφορά τους τομείς της τοπογραφίας και των γραφικών υπολογιστών, λόγω της τεχνολογικής προόδου, οι τρισδιάστατες απεικονίσεις χαρτών έχουν γίνει πολύ δημοφιλείς σε διάφορες εφαρμογές, ειδικά αυτών που αφορούν αστικά περιβάλλοντα (πχ. πλοήγηση). Τα μοντέλα κτιρίων είναι τα πιο σημαντικά στοιχεία των τρισδιάστατων αστικών χαρτών και η πολυπλοκότητά τους επηρεάζει άμεσα την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής (Glander & Dollner, 2008).

3.2 3D Γεωμετρικά Μοντέλα

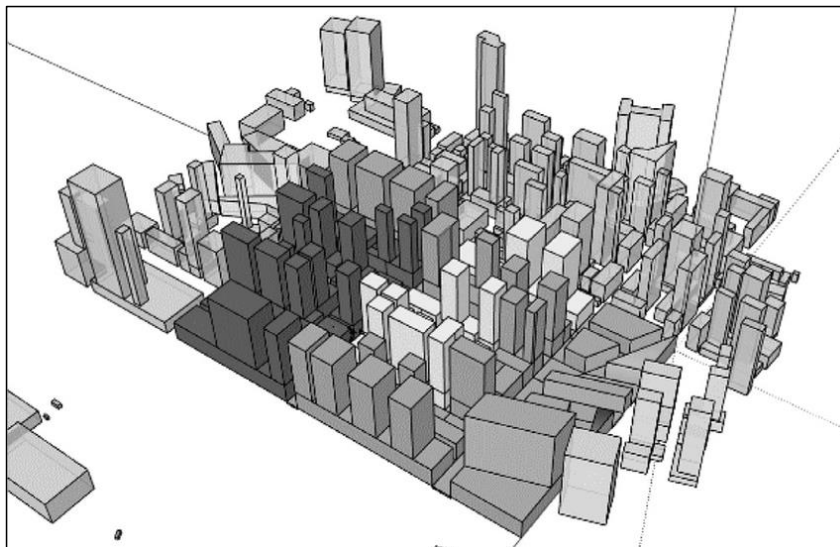
Η 3D γεωμετρική μοντελοποίηση είναι η μαθηματική αναπαράσταση της γεωμετρίας ενός αντικειμένου (*Εικόνα 14*). Ουσιαστικά πρόκειται για τα πιο απλά 3D μοντέλα με κύριο χαρακτηριστικό τους τη διατήρηση των συντεταγμένων τους μαζί με τα αντικείμενα (Li κ.ά., 2013). Διακρίνονται για την απλότητά τους και την ταχύτητα μοντελοποίησης τους (Δημοπούλου, 2015).

Η κατασκευή ενός 3D γεωμετρικού μοντέλου απαιτεί την ύπαρξη ενός υπολογιστικού συστήματος με το κατάλληλο λογισμικό για την περιγραφή των γεωμετρικών σχέσεων και της φυσικής έκτασης του υπό μοντελοποίησης στοιχείου (Zhao κ.ά., 2023). Η κατασκευή περιλαμβάνει γραφικές αλλά και μη γραφικές πληροφορίες και είναι δυνατόν να δημιουργηθούν μέσω διαφόρων μεθόδων (3D σάρωση με laser, λήψη πολλαπλών εικόνων κλπ.).

Κατά βάση, υπάρχουν τρία στάδια για τη δημιουργία ενός γεωμετρικού μοντέλου (Kim κ.ά., 2023; Zhao κ.ά., 2023): i) Η δημιουργία βασικών γεωμετρικών στοιχείων με χρήση γραμμών, σημείων και κύκλων. ii) Εφαρμογή μετασχηματισμών στα γεωμετρικά στοιχεία χρησιμοποιώντας εντολές όπως περιστροφή, αλλαγή κλίμακας και άλλες σχετικές συναρτήσεις μετασχηματισμών και iii) τέλος η κατασκευή του τελικού γεωμετρικού μοντέλου με χρήση λειτουργιών που θα επιφέρουν το

επιθυμητό σχήμα. Το μοντελοποιημένο αντικείμενο εμπεριέχει πληροφορίες που αφορούν τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του (πχ. υλικό, μάζα).

Λόγω της ευκολίας δημιουργίας τους και του χαμηλού κόστους τα γεωμετρικά μοντέλα χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα εφαρμογών και είναι ευρέως διαθέσιμα. Η μοντελοποίηση τους παράγει μεγάλο όγκο δεδομένων¹⁵ και κατά συνέπεια είναι βασική απαίτηση η χρήση μιας ισχυρής και ευέλικτης βάσης δεδομένων (πχ. PostgreSQL¹⁶) με ένα αντίστοιχο σύστημα διαχείρισής της (ΣΔΒΔ). Η διατήρηση των τρισδιάστατων δεδομένων στα ΣΔΒΔ γίνεται με ένα σχετικά τυποποιημένο τρόπο που επιτρέπει την επεξεργασία και την ανάλυση του μοντέλου με διαφορετικούς τρόπους (Δημοπούλου, 2015).



Εικόνα 14: 3D γεωμετρικό μοντέλο αστικού περιβάλλοντος με βάση τους κτιριακούς όγκους (Πηγή: Huang κ.ά., 2020)

¹⁵ Ένα μόνο ζεύγος συντεταγμένων μπορεί να επαναληφθεί πάρα πολλές φορές στην περιγραφή ενός από τα χαρακτηριστικά που εμπεριέχονται στο αναδημιουργούμενο σκηνικό.

¹⁶ Η PostgreSQL είναι μια σχεσιακή βάση δεδομένων ανοικτού κώδικα. Προέρχεται από το πακέτο POSTGRES, το οποίο γράφτηκε στο Πανεπιστήμιο του Μπέρκλεϊ στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α. Αναπτύσσεται πάνω από δύο δεκαετίες και αποτελεί πλέον την πιο προχωρημένη βάση δεδομένων ανοιχτού κώδικα, (<https://www.postgresql.org/>).

3.3 3D Τοπολογικά Μοντέλα.

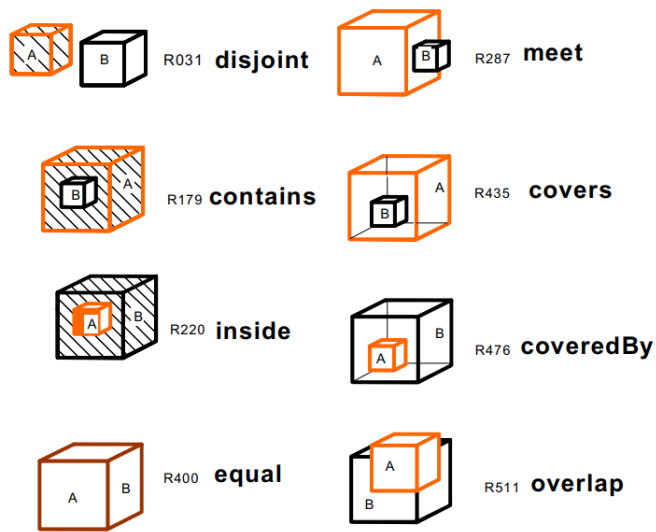
Τα τρισδιάστατα μοντέλα πόλεων στο παρελθόν επικεντρώνονταν στα οπτικά γραφικά και τις γεωμετρικές πληροφορίες, παραμελώντας την αναπαράσταση της σημασιολογίας και της τοπολογίας. Κατά συνέπεια αυτά τα μοντέλα δε μπορούσαν να ικανοποιήσουν τη συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για θεματική αναζήτηση, χωρική ανάλυση και εξόρυξη δεδομένων.

Η τοπολογία ορίζεται ως ένα μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της θέσης και των σχέσεων μεταξύ γεωγραφικών φαινομένων (Frolov, 1975). Αυτές οι τοπολογικές σχέσεις είναι ανεξάρτητες από την απόσταση ή την κατεύθυνση (Hoel, 2009). Η τοπολογία μπορεί να απεικονίζει τη συνδεσιμότητα μιας οντότητας με μια άλλη. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη διαχείριση χωρικών δεδομένων για τον λόγο του ότι πολλές λειτουργίες χωρικής μοντελοποίησης ή γεωεπεξεργασίας δεν απαιτούν γεωμετρικές τιμές συντεταγμένων. Οι γεωμετρικές συντεταγμένες είναι απαραίτητες μόνο για τη σχεδίαση της συντομότερης διαδρομής αφού υπολογιστεί.

Ένα μοντέλο τοπολογικών δεδομένων είναι ένας τρόπος οπτικοποίησης χωρικών αντικειμένων (σημείο, γραμμή και χαρακτηριστικά περιοχής) ως ένα υποκείμενο γράφημα τοπολογικών αρχέγονων - κόμβων, όψεων και ακμών - ως μέρος της διαχείρισης χωρικών σχέσεων (Li κ.ά., 2016). Κύριο χαρακτηριστικό των τοπολογικών μοντέλων είναι η διατήρηση της συνέπειας των δεδομένων τους, ανεξαρτήτως της επεξεργασίας που είναι δυνατόν να υποστούν (πχ. χωρικές αναλύσεις), κάτι που επιτυγχάνεται με την αποθήκευση των συντεταγμένων των κορυφών (κόμβοι). Κατά τον τρόπο αυτό είναι σε θέση να αναπαριστούν όλα τα είδη γεωμετρικών αντικειμένων και να διαχειρίζονται την τοπολογία, δηλαδή την εξασφάλιση των αλληλοσυσχετίσεων προκειμένου οι σχέσεις των αντικειμένων να παραμένουν αμετάβλητες μετά από οποιαδήποτε μετακίνηση περιστροφή ή αλλαγή μεγέθους χωρίς αυτές να διαταράσσονται (De La Losa & Cervelle, 1999). Το τίμημα για τη συνέπεια και την ευμεταβλητότητα τους είναι η υψηλή πολυπλοκότητα.

Οι τοπολογικές σχέσεις παίζουν πρωταρχικό ρόλο στην αναπαράσταση ενός 3D χώρου και είναι κρίσιμες σε λειτουργίες διαχείρισης, διατύπωση ερωτημάτων αλλά και την ανάλυση. Οι τοπολογικές σχέσεις υποδεικνύουν τα αμετάβλητα χαρακτηριστικά υπό τοπολογικό μετασχηματισμό των αναφερόμενων αντικειμένων (Egenhofer, 1989; Herring, 1990), όπως οι γειτονικές και συνδεδεμένες σχέσεις μεταξύ

χωροαντικειμένων (Εικόνα 15). Σε πολλές τρισδιάστατες εφαρμογές, οι τοπολογικές σχέσεις αξιοποιούνται ευρέως στην επικύρωση δεδομένων, τη χωρική ανάλυση και την οπτικοποίηση (Ellul & Haklay, 2006a), γεγονός που έχει εισαγάγει μεγάλη αναγκαιότητα και σημασία για την αναπαράσταση τοπολογικών σχέσεων σε τρισδιάστατα μοντέλα πόλεων.

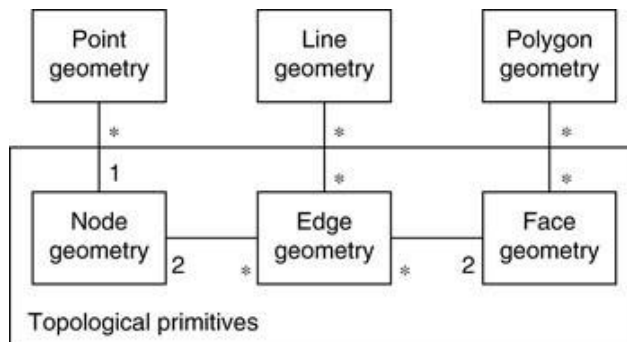


Εικόνα 15: Πιθανές σχέσεις μεταξύ δύο 3D αντικειμένων με βάση το πλαίσιο του μοντέλου Egenhofer και Herring. (Πηγή: Egenhofer και Herring, 1990)

Η τοπολογική περιγραφή ενός μοντέλου πρέπει να είναι πλήρης, δηλαδή, κάθε τοπολογική σχέση πρέπει να καθορίζεται από τις αλληλοσχετίσεις που περιγράφονται εντός της βάσης δεδομένων (Ellul & Haklay, 2006a). Η τοπολογική περιγραφή εγγυάται επίσης τον μη πλεονασμό των γεωμετρικών αντικειμένων. Χωρίς καμία τοπολογία, δύο σημεία με διαφορετικά αναγνωριστικά μπορούν να συμπίπτουν στον ίδιο χώρο. Τα τοπολογικά μοντέλα προϋποθέτουν αναγνωριστικές ιδιότητες για όλα τα επιμέρους στοιχεία των αντικειμένων, με σκοπό τον καθορισμό των χαρακτηριστικών και των σχέσεων που δημιουργούνται μεταξύ τους (Willis κ.ά., 2021). Η χρήση των τοπολογικών μοντέλων επιτρέπει την συμπαγή αποθήκευση, εξασφαλίζοντας για τα δεδομένα τη συνέπεια, την αποφυγή πλεονασμού, και τέλος επιτρέπουν τις χωρικές αναλύσεις με εύκολο τρόπο.

3.3.1 Επισκόπηση τοπολογικών μοντέλων

Η τοπολογία έχει ιστορικά θεωρηθεί ως μια δομή χωρικών δεδομένων που χρησιμοποιείται κυρίως για να διασφαλιστεί ότι τα σχετικά δεδομένα σχηματίζουν έναν συνεπή και καθαρό τοπολογικό ιστό (Hoel, 2009). Θεμελιώδης όμως λειτουργία της είναι η διασφάλιση της ποιότητας των δεδομένων (πχ., εξάλειψη κενών ή επικαλύψεων μεταξύ πολυγώνων που αντιπροσωπεύουν αγροτεμάχια) και η εξασφάλιση της δυνατότητας σε συστήματα GIS να αναπαραστήσουν ρεαλιστικά γεωγραφικά χαρακτηριστικά. Η τοπολογία επιτρέπει σε κάποιον να ελέγχει τις γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών και να διατηρεί τη γεωμετρική τους ακεραιότητα (Εικόνα 16).



Εικόνα 16: Το γενικό τοπολογικό μοντέλο. Ένα χαρακτηριστικό με γεωμετρία σημείου συσχετίζεται με ένα στοιχείο μεμονωμένου κόμβου, ένα χαρακτηριστικό με γεωμετρία γραμμής σχετίζεται με ένα ή περισσότερα στοιχεία ακμών και ένα χαρακτηριστικό με γεωμετρία πολυγώνου σχετίζεται με ένα ή περισσότερα στοιχεία προσώπου (Πηγή: Hoel, 2009).

Όσον αφορά τη μοντελοποίηση τοπολογίας, έχουν προταθεί μια σειρά από 3D τοπολογικά μοντέλα (Rahman, 2005). Μια ουσιαστική προσπάθεια καταγραφής τους πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 2000 από τους Oosterom και Fendel (Oosterom & Fendel, 2016). Κατέγραψαν τα κύρια χαρακτηριστικά των επτά (7) διαθέσιμων, έως τότε, τοπολογικών μοντέλων: το 3D FDS (Molenaar, 1990), Cell Tuple Model (Pigot, 1992), TEN (Pilouk, 1996), SSM (Zlatanova, 2000b), SOMAS (Pfound M, 2001), UDM (Coors, 2003a), OO3D (Shi κ.ά., 2003a). Στα τέλη της δεκαετίας το 2000 ο Ellul παρουσίασε και ένα όγδοο (8^ο) τοπολογικό μοντέλο, το STS (Ellul & Haklay, 2006a). Ο Πίνακας 2 παρέχει μια επισκόπηση των πιο κοινών 3D τοπολογικών μοντέλων με βάση τη χρονολογική σειρά δημοσίευσής τους.

Πίνακας 2: Τα χαρακτηριστικά των γνωστών 3D τοπολογικών μοντέλων (Oosterom κ.ά., 2003)

Name	Primitives	Topological Tables	Explicit Relationships
3DFDS	node, arc, edge, face	arc, edge, face	node-on-face node-in-volume arc-part of-line arc-on-face
Cell-Tuple	0-cel. 1-cell. 2- cell. 3-cell	cells	no
TEN	node, arc. triangle. tetrahedron	arc, triangle, tetrahedron	triangle-part of-surface arc-part of-line
SSM	node, face	face, line, surface, body	node-in-volume face-in-volume
SO.MAS	vertex, edge, face, body	point, line, polygon, body	unknown
UDM	node, face	point, line, surface, volume	no
OQ3D	node, segment, triangle	point, line, surface, volume	unknown

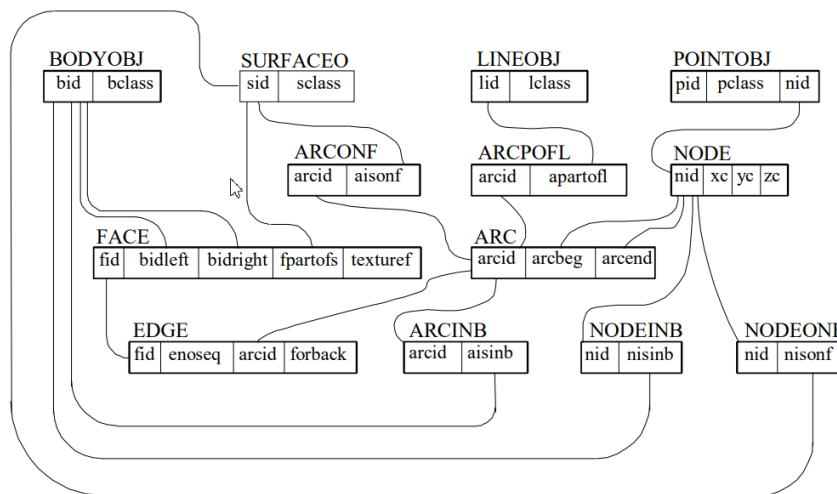
Η ευρύτερα όμως χρησιμοποιούμενη τοπολογική μοντελοποίηση που έχει επικρατήσει στις αστικές εφαρμογές είναι το 3D μοντέλο CityGML (Gröger κ.ά., 2008). Το οποίο δομείται μέσω XML και υιοθετεί μια απλή τοπολογία, όπου δύο γεωμετρίες μοιράζονται ένα κοινό τμήμα. Αυτό το τμήμα αναπαρίσταται μόνο μία φορά σε μια γεωμετρία αν ανήκει και σε μια άλλη. Με αυτόν τον μηχανισμό, αποφεύγεται ο πλεονασμός και διατηρείται μια ρητή τοπολογική σχέση μεταξύ των γεωμετριών. Αναλυτικά το πρότυπο CityGML θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 4 και στο Β' Μέρος (Κεφάλαιο 7) παρουσιάζεται η επέκτασή του στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Τα βασικά δομικά χαρακτηριστικά των ευρύτερα χρησιμοποιούμενων τοπολογικών μοντέλων παρουσιάζονται στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.

3.3.1.1 Formal Data Structure (3D FDS)

Πρόκειται για την πρώτη προσπάθεια συσχέτισης του χωρικού αντικειμένου με ταυτόχρονη αλληλοσυσχέτιση γεωμετρικών και θεματικών ιδιοτήτων. Το μοντέλο αποτελείται από τρία δομικά επίπεδα (Εικόνα 17), τα χαρακτηριστικά (που σχετίζονται με μια θεματική τάξη), τα τέσσερα δομικά στοιχεία (σημείο, γραμμή, επιφάνεια και κυρίως σώμα) και τέσσερα αρχέγονα (κορυφή, τόξο, όψη και ακμή).

Το εννοιολογικό μοντέλο αποτελείται από 12 κανόνες για τον διαχωρισμό των φυσικών αντικειμένων (Molenaar, 1990). Σύμφωνα με τους κανόνες μοντελοποίησης, τα τόξα και οι όψεις δε μπορούν να τέμνονται. Τόξα και κορυφές μπορούν να υπάρχουν μέσα σε όψεις ή σώματα. Ο ρόλος της ακμής είναι διπλός, δηλαδή να ορίζει το όριο μιας όψης και να καθορίζει τον προσανατολισμό. Ο αριθμός των τόξων που αποτελούν μια ακμή δεν είναι περιορισμένος. Τα τόξα πρέπει να είναι ευθείες και οι όψεις πρέπει να είναι επίπεδες. Η κάθε επιφάνεια έχει ένα εξωτερικό όριο και μπορεί να έχει πολλά μη ένθετα όρια, για παράδειγμα οπές. Το σώμα έχει μία εξωτερική επιφάνεια και μπορεί να έχει πολλά μη φωλιασμένα σώματα ή οπές.

Οι Rijkers κ.ά., 1993 προϋποθέτουν τη χρήση μιας σχεσιακής βάσης δεδομένων προκειμένου να υλοποιηθεί η χαρτογράφηση λόγου του μεγέθους των δεδομένων που προκύπτουν κατά τη μοντελοποίηση. Το μοντέλο εξυπηρετεί διάφορα ερωτήματα δεδομένων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών (Bric κ.ά., 1994).



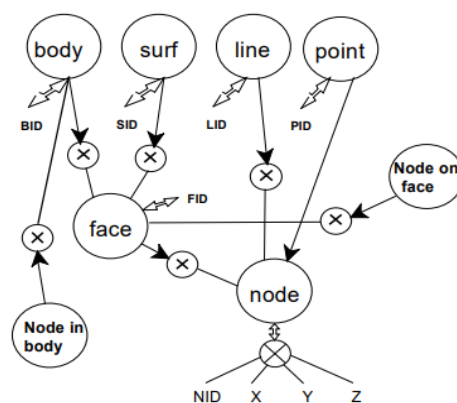
Εικόνα 17: 3D Formal Data Structure (3D FDS), σχεσιακή υλοποίηση (Πηγή: Zlatanova, 2000a)

Ως μια πρωτοπόρα προσέγγιση της τοπολογικής μοντελοποίησης εντόπισε μια σειρά από αδυναμίες και ελλείψεις. Μεταξύ άλλων, η Zlatanova για παράδειγμα σημειώνει την έλλειψη ρητής σχέσης της όψης του υπό μοντελοποίηση αντικειμένου, με το υπόλοιπο μέρος του σώματος να αντιμετωπίζει κάποια περαιτέρω θέματα, π.χ. λείπει ρητή σχέση πρόσωπο-μέρος σώματος (Zlatanova, 2000b). Ο Coors (2003) πρόσθεσε

ότι η αποθήκευση των ακμών δεν είναι απαραίτητη, καθώς τα περισσότερα τοπολογικά ερωτήματα για μοντέλα πόλεων βασίζονται σε γειτονικές ακμές (Coors, 2003a). Αυτό που κατέδειξε η επιστημονική έρευνα είναι ότι το μοντέλο είναι κατάλληλο για τοπολογική μοντελοποίηση κυρίως αστικού περιβάλλοντος (Zlatanova, 2000b).

3.3.1.2 Simplified Spatial Model (SSM)

Το Απλοποιημένο Χωρικό Μοντέλο - Simplified Spatial Model (SSM) σχεδιάστηκε για αξιοποίηση κυρίως από εφαρμογές web, με δυνατότητες εκτέλεσης ερωτημάτων οπτικοποίησης (Zlatanova, 2000). Αν και η αρχή έγινε με τους Egenhofer και Franzosa 1994¹⁷, η Zlatanova το 2000 πρότεινε μια βελτίωση που αφορούσε τοπολογικά ισοδύναμων σχέσεων σε 3D περιβάλλον (Εικόνα 18).



Εικόνα 18: Simplified Spatial Model (SSM), (Πηγή: Zlatanova, 2000)

Τα βασικά αντικείμενα είναι τέσσερα (κορυφή, γραμμή, επιφάνεια και το σώμα) αλλά τα πρωτεύοντα μόνο δύο, η κορυφή και η επιφάνεια (Egenhofer, 1989). Η παράλειψη του τόξου των αποθηκευμένων στοιχείων έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια της μοναδικότητας της σχέσης τόξου/όψης αντικειμένου στον 3D χώρο, δηλαδή ένα τόξο μπορεί να είναι μέρος περισσότερων από δύο επιφανειών.

Το μοντέλο βασίζεται στην ανίχνευση των σχέσεων μεταξύ πρωτευόντων. Μία βάση δεδομένων περιέχει τις δυαδικές τους σχέσεις. Τα περισσότερα χωρικά

¹⁷ Οι Egenhofer και Franzosa το 1994 παρουσίασαν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη διάκριση τοπολογικά ισοδύναμων σχέσεων μεταξύ περιοχών στον διδιάστατο χώρο (2D).

ερωτήματα στις αστικές περιοχές (Zlatanova, 2000c) απαιτούν γνώση για τις σχέσεις μεταξύ δύο αυθαίρετων χώρο-αντικειμένων, π.χ. *"εύρεση όλων των καταστημάτων που απέχουν 700 μέτρα από τον σταθμό"*, *"εμφάνιση όλων των κτιρίων με περισσότερους από 4 ορόφους στη γειτονιά"* κλπ. . Η εκτίμηση της καταλληλότητας του SSM για την εκτέλεση χωρικής ανάλυσης βασίζεται σε μια συγκεκριμένη κατηγορία ερωτημάτων. Η υπόθεση είναι ότι πρέπει να προσδιοριστεί μια συγκεκριμένη σχέση μεταξύ δύο γνωστών αντικειμένων. Ερωτήματα που απαιτούν μια τέτοια προσέγγιση μπορούν να είναι *"βρείτε το κτίριο δίπλα στο δρόμο"*, *"ελέγξτε αν ο σωλήνας περνάει από το δωμάτιο"*, *"είναι το δέντρο έξω από το οικόπεδο;"*. Η διάσταση των αντικειμένων και ο κώδικας της σχέσης είναι γνωστοί εκ των προτέρων. Το αναμενόμενο αποτέλεσμα είναι είτε θετικό (ναι, η σχέση μεταξύ των αντικειμένων είναι η απαιτούμενη) είτε αρνητικό (όχι, οι σχέσεις μεταξύ των αντικειμένων είναι διαφορετικές).

Εν ολίγοις οι λειτουργίες είναι συμβατές με τις τυπικές λειτουργίες SQL *"Select"* και *"Join"*, που αποτελεί προϋπόθεση για μια αβίαστη υλοποίηση στο ΣΣΔΒΔ (Σχεσιακό Σύστημα Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων)¹⁸.

Συνοπτικά, το SSS διαφέρει από πολλές απόψεις από το 3D FDS:

- Εισάγονται οι παράμετροι που περιγράφουν τη συμπεριφορά των αντικειμένων
- Οι πληροφορίες σχετικά με την υφή διατηρούνται ανά αντικείμενο (επιφάνεια και σώμα)
- Τα τόξα δε διατηρούνται
- Το σώμα του γεωμετρικού αντικειμένου περιγράφεται ρητά από όψεις
- Οι γραμμές και τα σημεία αντιπροσωπεύονται από κόμβους και τα σώματα και οι επιφάνειες αντιπροσωπεύονται από όψεις
- Υποδεικνύεται η ακολουθία των κόμβων σε μια γραμμή
- Δεν υπάρχουν σχέσεις τόξου με πρόσωπο , τόξου σε σώμα και κόμβου με πρόσωπο αλλά εισάγεται μια νέα σχέση πρόσωπο με σώμα
- Εισάγονται σύνθετα αντικείμενα.

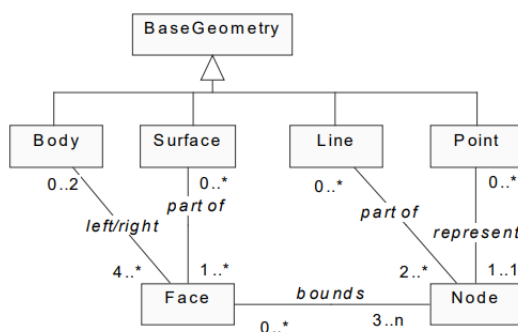
¹⁸ RDBMS (Relational Database Management System)

3.3.1.3 Urban Data Model (UDM)

Ο Coors (2003) πρότεινε το Urban Data Model (UDM) το οποίο παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με το SSM (Coors, 2003a). Κύριο χαρακτηριστικό του είναι ότι μόνο τα πολύεδρα μπορούν να μοντελοποιηθούν με το UDM και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι κορυφές δεν αποθηκεύονται ρητά. Επομένως δεν υποστηρίζονται μονοδιάστατα κατασκευαστικά αντικείμενα όπως για παράδειγμα οι ακμές. Ωστόσο, μπορούν να μοντελοποιηθούν ορίζοντας δύο διαδοχικά σημεία.

Η δομική στόχευση του μοντέλου UDM (Εικόνα 19) είναι η αντιπροσώπευση της γεωμετρίας ενός σώματος ή μιας επιφάνειας μέσω επίπεδων κυρτών όψεων (Coors, 2003). Κάθε όψη ορίζεται από ένα σύνολο κορυφών. Δύο κυρτές επίπεδες όψεις είναι γειτονικές εάν μοιράζονται τουλάχιστον δύο κορυφές. Στη σχεσιακή αναπαράσταση του μοντέλου κάθε όψη που έχει περισσότερες από τρεις κορυφές αποσυντίθεται σε τρίγωνα και ο αντίστοιχος πίνακας περιέχει μόνο τις τρεις κορυφές των τριγώνων. Ανάλογα με την πολυπλοκότητα των επιφανειών (π.χ. τον αριθμό των παραθύρων σε έναν τοίχο), αυτός ο τριγωνισμός μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του μεγέθους της βάσης δεδομένων. Ωστόσο σε περίπτωση απλών προσόψεων (π.χ. χωρίς παράθυρα), ο σταθερός αριθμός στηλών στον πίνακα προσόψεων αντισταθμίζει τον αυξημένο αριθμός στοιχείων για συντήρηση.

Κύρια αποστολή του UDM η τρισδιάστατη αναπαράσταση μοντέλων πόλεων μέσω εφαρμογών του διαδικτύου (Coors, 2003).

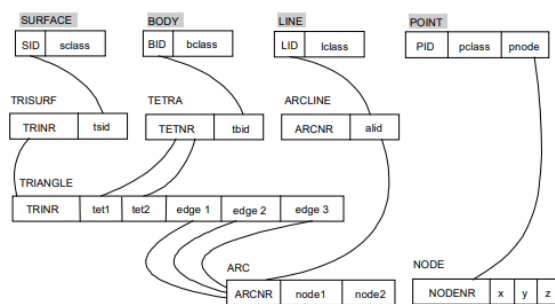


Εικόνα 19: Urban Data Model (UDM), (Πηγή: Coors, 2003)

3.3.1.4 Tetrahedral Network (TEN)

Το TEN αποτελεί το πιο απλό και καλώς ορισμένο μοντέλο που μπορεί να αξιοποιηθεί για τη μοντελοποίηση σχεδόν όλων των φυσικών και ανθρωπογενών φαινομένων με

την παραδοχή πως τα πραγματικά 3D αντικείμενα είναι ογκομετρικά (Pilouk, 1996). Ένα τετράεδρο είναι η απλούστερη γεωμετρική μορφή στον 3D χώρο (Wesselingh, 2007), τα τέσσερα σημεία του μπορούν να βρίσκονται οπουδήποτε στον 3D χώρο, αρκεί να δε βρίσκονται σε ένα επίπεδο (Coors, 2003a; Qingquan, 2000). Τα τρισδιάστατα αντικείμενα μπορούν να συντίθενται από πολλαπλά τετράεδρα. Η τρισδιάστατη ανάλυση σε ένα μοντέλο TEN είναι σχετικά εύκολη σε σύγκριση με την ανάλυση σε άλλες τρισδιάστατες δομές δεδομένων (Εικόνα 20).

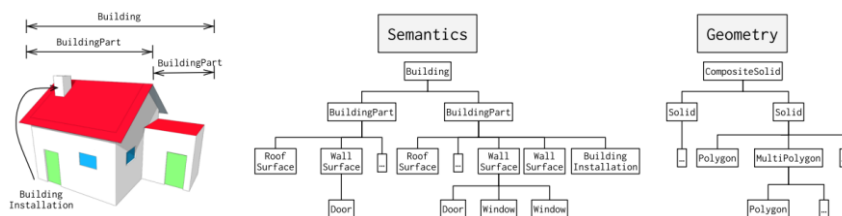


Εικόνα 20: Tetrahedral Network (TEN): σχεσιακή υλοποίηση για 3D (Πηγή: Pilouk, 1996)

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μοντελοποίηση κτιριακών όγκων μέσω του TEN έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ιδιαίτερα μεγάλου όγκου δεδομένων. Παρ' όλα αυτά είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για υπολογισμούς και ερωτήματα που εφαρμόζονται σε γεωλογικές εφαρμογές (Shi κ.ά., 2003b; Pilouk, 1996).

3.4 3D Σημασιολογικά Μοντέλα

Στη σημασιολογική 3D μοντελοποίηση στόχος είναι η αναπαράσταση ενός αντικειμένου αξιοποιώντας την τρίτη διάσταση (γεωμετρικό μοντέλο) και ταυτόχρονα να εξαχθούν οι σημασιολογικές τάξεις των επιμέρους τμημάτων του ανακατασκευασμένου μοντέλου (Εικόνα 21). Έχοντας ένα σημασιολογικά ενήμερο 3D μοντέλο επιτυγχάνεται μία πολύ πιο «πλούσια» αναπαράσταση του φυσικού κόσμου (Ledoux κ.ά., 2019). Για παράδειγμα, ερωτήσεις όπως ο όγκος ενός κτιρίου μπορούν να απαντηθούν άμεσα. Αντίθετα, αυτό είναι δύσκολο με ένα γεωμετρικό μοντέλο όπου δεν υπάρχει πληροφορία για τα ποια μέρη της γεωμετρίας ανήκουν στο κτίριο.



Εικόνα 21: Τριδιάστατη (3D) μοντελοποίηση με ενσωματωμένες σημασιολογικές τάξεις (Πηγή: Ledoux κ.ά., 2019)

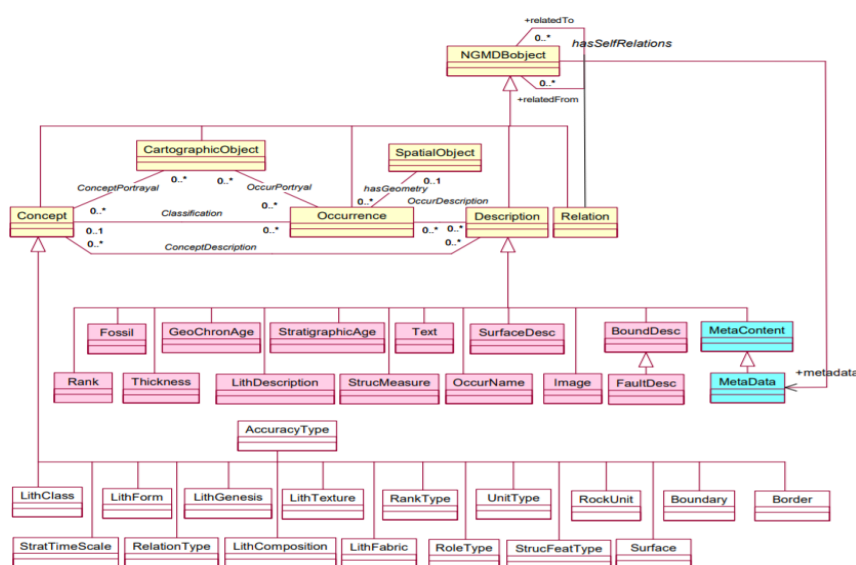
Ελάχιστα είναι τα θεματικά σημασιολογικά μοντέλα τα οποία είναι σε θέση να μοντελοποιήσουν και να περιγράψουν 3D τον αστικό χώρο, που περιλαμβάνει τα κτίρια, τα στοιχεία του εδάφους και τις αλληλοσυσχετίσεις τους. Το πρότυπο CityGML είναι το μοναδικό που περιλαμβάνει θεματική σημασιολογία αλλά και 3D γεωμετρία και τοπολογία στα εικονικά 3D μοντέλα των πόλεων. Το πρότυπο αυτό θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο (βλ. Κεφάλαιο 4), όμως υπάρχουν και κάποια μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί και έχουν γίνει αποδεκτά ως πρότυπα χωρίς όμως την καθολική αποδοχή του CityGML και κυρίως με περιορισμένο εύρος εφαρμογής.

3.4.1 North American Data Model (NADM)

Ιδρύθηκε το 1999¹⁹ με γενικό στόχο την ανάπτυξη τυποποιημένων μεθοδολογιών για την αποθήκευση, τον χειρισμό, την ανάλυση, τη διαχείριση και τη διανομή πληροφοριών ψηφιακών γεωλογικών χαρτών. Το μοντέλο είναι προσανατολισμένο για διαχείριση των δεδομένων της βορείου Αμερικής (ΗΠΑ και Καναδά). Αποτελεί ένα μοντέλο με σκοπό να αποτελέσει πρότυπο για την ανάπτυξη διαλειτουργικών βάσεων δεδομένων με επίκεντρο γεωλογικούς χάρτες ανά πολιτεία, επαρχία και ομοσπονδιακές γεωλογικές έρευνες. Το μοντέλο έχει σχεδιαστεί για να είναι ένα τεχνολογικά ουδέτερο εννοιολογικό μοντέλο που μπορεί να αποτελέσει τη βάση για μια διαδικτυακή μορφή ανταλλαγής, χρησιμοποιώντας εξελισσόμενη τεχνολογία πληροφοριών (π.χ. XML, RDF, OWL) και καθοδηγεί την υλοποίηση βάσεων δεδομένων γεωεπιστημών σε ένα κοινό εννοιολογικό πλαίσιο. Ο επιδιωκόμενος σκοπός είναι να επιτραπεί η ανταλλαγή γεωλογικών πληροφοριών μεταξύ παρόχων δεδομένων γεωλογικών χαρτών και χρηστών, ανεξάρτητα από την εφαρμογή του τοπικού συστήματος πληροφοριών (LaGarry, 2004).

¹⁹ Από την NADM Data Model Design Team.

Το μοντέλο δίνει έμφαση στις γεωεπιστήμες, έννοιες και σχέσεις που σχετίζονται με πληροφορίες που παρουσιάζονται στους γεωλογικούς χάρτες. Ο σχεδιασμός έχει καθοδηγηθεί από μια άτυπη ανάλυση απαιτήσεων, τεκμηρίωση υπάρχουσών βάσεων δεδομένων, τεχνολογικές εξελίξεις και άλλες προσπάθειες τυποποίησης στις κοινότητες της γεωεπιστήμης και της επιστήμης των υπολογιστών (Εικόνα 22).



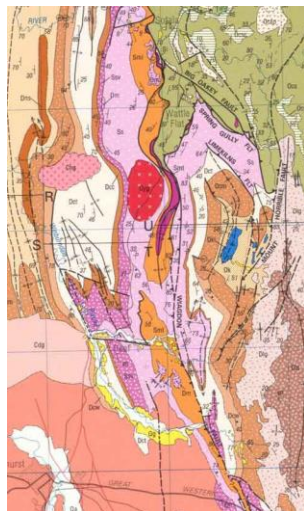
Εικόνα 22: Έννοιες και περιγραφές με βάση το NADM και χρήση διαγράμματος UML (Πηγή: <https://ngmdb.usgs.gov/www-nadm/>)

Μια βασική πτυχή του μοντέλου είναι η ιδέα ότι η αναπαράσταση του εννοιολογικού πλαισίου (οντολογία) που βασίζεται στα δεδομένα γεωλογικών χαρτών πρέπει να είναι μέρος του μοντέλου, επειδή αυτό το πλαίσιο αλλάζει με το χρόνο και την κατανόηση και ποικίλλει μεταξύ των παρόχων πληροφοριών. Το ανώτερο επίπεδο του μοντέλου διακρίνει γεωλογικές έννοιες, έννοιες γεωλογικής αναπαράστασης και μεταδεδομένα. Το τμήμα γεωλογικής αναπαράστασης του μοντέλου παρέχει ένα πλαίσιο για την αναπαράσταση της οντολογίας που βασίζεται στα δεδομένα γεωλογικών χαρτών μέσω ενός ελεγχόμενου λεξιλογίου και για τη δημιουργία των σχέσεων μεταξύ αυτού του λεξιλογίου και μιας οπτικοποίησης ή απεικόνισης γεωλογικού χάρτη. Οι γεωλογικές τάξεις ανώτατου επιπέδου στο μοντέλο είναι γήινο υλικό (ουσία), γεωλογική μονάδα (τμήματα της Γης), γεωλογική ηλικία, γεωλογική

δομή, απολιθώματα, γεωλογικές διεργασίες, γεωλογικές σχέσεις και γεωλογικό γεγονός.

3.4.2 Geology Science Markup Language (GeoSciML)

Το GeoSciML²⁰ είναι ένα μοντέλο γεωλογικών χαρακτηριστικών που συνήθως περιγράφονται και απεικονίζονται σε γεωλογικούς χάρτες, διατομές, γεωλογικές αναφορές και βάσεις δεδομένων (Εικόνα 23).

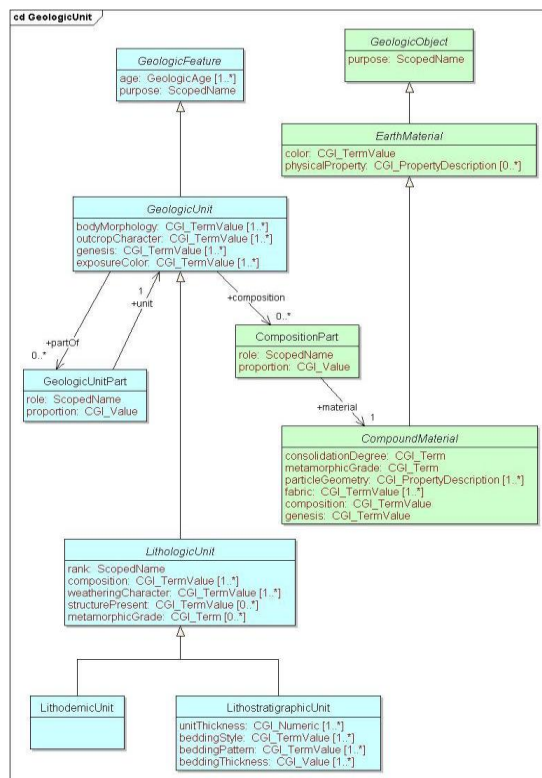


Εικόνα 23: Γεωλογικός χάρτης με αξιοποίηση γεωλογικών χαρακτηριστικών που υποστηρίζει το σημασιολογικό μοντέλο GeoSciML (Πηγή: <https://cgi-iugs.org/project/geosciml/#what-is-geosciml>)

Το μοντέλο αναπτύχθηκε από την IUGS CGI²¹ (Commission for the Management and Application of Geoscience Information). Η προδιαγραφή περιγράφει ένα λογικό μοντέλο και κανόνες κωδικοποίησης GML/XML για την ανταλλαγή δεδομένων γεωλογικών χαρτών, γεωλογικών χρονικών κλιμάκων, γεωτρήσεων και μεταδεδομένων για εργαστηριακές αναλύσεις (Εικόνα 24). Παρέχει επίσης μοτίβα, προφίλ (κυρίως των Παρατηρήσεων και Μετρήσεων - ISO19156) και βέλτιστες πρακτικές για την αντιμετώπιση κοινών περιπτώσεων χρήσης γεωεπιστημών (Simons κ.ά., 2006).

²⁰ <http://geosciml.org/>

²¹ <https://cgi-iugs.org/>



Εικόνα 24: Διάγραμμα UML των τάξεων GeoSciML GeologicUnit και EarthMaterial, που δείχνει κληρονομικότητα, συσχετισμούς και ρόλους και χαρακτηριστικά κλάσεων, με τύπους δεδομένων και ιδιότητα (Πηγή: Simons κ.ά., 2006)

Στον χώρο των γεωεπιστημών τα δεδομένα και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά δεν περιορίζονται από εθνικά ή επαρχιακά σύνορα. Αναπόφευκτα οι χρήστες σε πολλές περιπτώσεις είναι αναγκασμένοι να εργάζονται με δεδομένα που προέρχονται από περισσότερους του ενός παρόχου. Η αξιοποίηση δεδομένων και πληροφοριών με διαφορετικό μορφότυπο καθιστά την επεξεργασία τους επίπονη και την εξαγωγή συμπερασμάτων προβληματική.

Το μοντέλο GeoSciML παρέχει μια ενιαία, ανοιχτού κώδικα, διεθνώς συμφωνημένη δομή και μορφότυπο δεδομένων που χρησιμοποιείται για τη διαλειτουργικότητα ψηφιακών γεωλογικών δεδομένων μέσω του διαδικτύου. Επιπλέον, η χρήση συμφωνημένης ορολογίας παρέχει συνέπεια στη σημασιολογική γλώσσα που χρησιμοποιείται σε όλα τα γεωλογικά σύνολα δεδομένων. Οι πάροχοι δεδομένων δε χρειάζεται να αλλάξουν την εσωτερική δομή των βάσεων δεδομένων

τους προκειμένου να υπάρξει συμβατότητα με το μοντέλο GeoSciML αλλά το μόνο που απαιτείται είναι η «μετάφραση» τους σύμφωνα με τη δομή GeoSciML όταν γίνεται διαμοιρασμός τους.

Το GeoSciML είναι το εγκεκριμένο διεθνώς πρότυπο μεταφοράς γεωεπιστημονικών δεδομένων από πρωτοβουλίες κοινής χρήσης δεδομένων σε όλο τον κόσμο. Μερικά από τα πιο αναγνωρίσιμα και επιδραστικά έργα που αξιοποιούν το πρότυπο είναι:

- Η διαδικτυακή πύλη OneGeology²² που περιέχει δεδομένα παγκόσμιων γεωλογικών χαρτών.
- Η Ευρωπαϊκή Οδηγία INSPIRE²³ χρησιμοποιεί το GeoSciML ως πρότυπο δεδομένων για την ανταλλαγή γεωλογικών πληροφοριών μεταξύ χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης.
- Το Δίκτυο Πληροφοριών Γεωεπιστήμης των ΗΠΑ (U.S. Geoscience Information Network²⁴) χρησιμοποιεί το GeoSciML-Portrayal και το GeoSciML για την κοινή χρήση γεωλογικών δεδομένων μεταξύ κυβερνητικών υπηρεσιών, εκπαιδευτικών και ιδιωτικών ιδρυμάτων.
- Το Καναδικό Δίκτυο Πληροφοριών Υπόγειων Υδάτων (Canadian Groundwater Information Network²⁵) χρησιμοποιεί μια επέκταση του GeoSciML – GroundwaterML – για να ενσωματώσει πληροφορίες για πηγάδια νερού από πολλαπλές δικαιοδοσίες.
- Οι διαδικτυακές Αυστραλιανές πύλες, Αυστραλιανό Δίκτυο Πληροφοριών Γεωεπιστήμης (Australian Geoscience Information Network²⁶) και το AuScope (Australian Geological Survey Organisations Network²⁷) χρησιμοποιούν το πρότυπο για την ανταλλαγή δεδομένων γεωτρήσεων από υπηρεσίες της πολιτείας στην Αυστραλιανή επικράτεια.
- Και τέλος, το Αφρικανο-Ευρωπαϊκό Σύστημα Παρατήρησης Γεωπηγών (African-European Georesources Observation System²⁸) που προωθεί το GeoSciML ως το πρότυπο για την ανταλλαγή δεδομένων γεωεπιστημών σε ολόκληρη την Αφρική.

²² <https://onegeology.org/>

²³ <https://inspire.ec.europa.eu/>

²⁴ <http://usgin.org/>

²⁵ https://gin.gw-info.net/service/api_ngwds:gin2/en/gin.html

²⁶ <https://portal.geoscience.gov.au/>

²⁷ Australian Geological Survey Organisations Network portal

²⁸ <https://cordis.europa.eu/project/id/212545>

Κεφάλαιο 4, Σημασιολογικό Πρότυπο - CityGML

4.1 Εισαγωγή

Είναι γεγονός ότι οι περισσότερες 3D μοντελοποιήσεις αστικών χώρων²⁹, παρέχουν μόνο γραφικά ή γεωμετρικά μοντέλα παραβλέποντας τις σημασιολογικές και τοπολογικές πτυχές των κτιρίων και του εδάφους που μοντελοποιούνται. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για σκοπούς οπτικοποίησης, αλλά όχι, για εκτέλεση θεματικών ερωτημάτων, αναλυτικές εργασίες ή εξαγωγή χωρικών πληροφοριών όπως:

- *Από ποια κτίρια, ποιους ορόφους, ποια δωμάτια και ποια παράθυρα έχω θέα την Ακρόπολη στην Αθήνα;*
- *Αν πλημμυρίσει το παραλιακό μέτωπο της Αττικής από τσουνάμι 10 μέτρων, ποια κτίρια θα πλημμυρίσουν και μέχρι ποιον όροφο θα φτάσει το νερό;*
- *Πού υπάρχουν συνεδριακοί χώροι άνω των 500 θέσεων στην Αθήνα και σε απόσταση λιγότερο από 10 λεπτά, με τα πόδια, από στάση δημόσιας συγκοινωνίας;*

Απαντήσεις για τα παραπάνω ερωτήματα δεν είναι δυνατόν να εξαχθούν από ένα απλό συμβατικό 3D μοντέλο που σκοπός της κατασκευής του είναι απλά η οπτικοποίηση ενός αστικού χώρου.

Ένα άλλο πρόβλημα με αυτού του είδους 3D μοντελοποίησης είναι η απουσία διαλειτουργικότητας. Αν και υπάρχουν διαθέσιμα μοντέλα ανοικτής τυπικής γεωμετρίας κατάλληλα για χρήση στο διαδίκτυο (πχ. X3D) και γεωχωρικές τεχνολογίες (Geography Markup Language - GML), δεν έχουν δοκιμαστεί και υιοθετηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό. Γεγονός είναι ότι έχουν δομηθεί με κοινό πρότυπο (Extensible Markup Language - XML), που μπορεί να εξασφαλίσει τα απαραίτητα στοιχεία σύγκλισης, παρ' όλα αυτά η προσδοκούμενη σύγκλιση δεν έχει επέλθει ακόμα. Επίσης, στις περιπτώσεις όπου λαμβάνονται υπόψη οι σημασιολογικές και τοπολογικές πληροφορίες, δεν υπάρχουν ευρέως χρησιμοποιούμενα τυπικά σχήματα εφαρμογών³⁰. Χωρίς κοινό ορισμό των βασικών οντοτήτων, χαρακτηριστικών και σχέσεων που μπορούν να κοινοποιηθούν σε διαφορετικές εφαρμογές, οι δημιουργοί αυτής της

²⁹ Οι περισσότερες υλοποιούνται με σκοπό την αξιοποίηση τους από web εφαρμογές για χρήση μέσω του διαδικτύου.

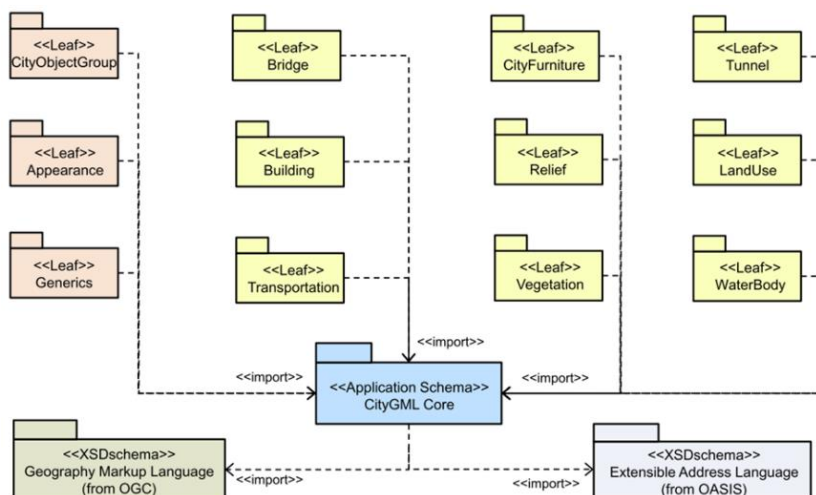
³⁰ Τα τελευταία χρόνια έχουν δημιουργηθεί τέτοιου είδους σχήματα, βασισμένα σε ένα σημαντικό σύνολο προηγούμενων εργασιών μοντελοποίησης δεδομένων.

κατηγορίας 3D μοντέλων αντιμετωπίζουν δυσκολίες στον διαμοιρασμό και τη συντήρησή τους.

Το CityGML είναι ένα ανοιχτό μοντέλο ορισμού βασικών οντοτήτων και ιδιοτήτων ενός 3D μοντέλου πόλης. Βασίζεται σε XML μορφή και δίνει τη δυνατότητα αποθήκευσης και ανταλλαγής 3D μοντέλων πόλεων. Παρέχει έναν τυποποιημένο τρόπο περιγραφής κτιρίων, δρόμων, ποταμών, γεφυρών, δέντρων και άλλων αστικών χαρακτηριστικών με έναν συνεπή και λεπτομερή τρόπο, διευκολύνοντας την κοινή χρήση και την ενσωμάτωση 3D μοντέλων πόλεων σε διαφορετικές εφαρμογές και κλάδους. Χρησιμοποιείται ευρέως στον πολεοδομικό σχεδιασμό, την αρχιτεκτονική, την περιβαλλοντική προσομοίωση και άλλους τομείς που απαιτούν ακριβείς και ολοκληρωμένες αναπαραστάσεις των πόλεων και των υποδομών τους.

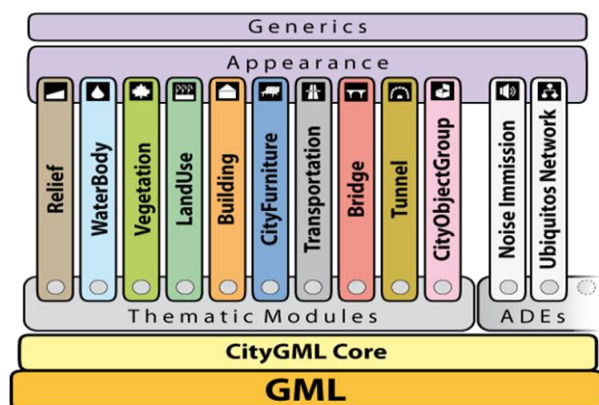
4.2 Η δομή του CityGML

Το CityGML είναι ένα ανοιχτό αντικειμενοστραφές μοντέλο πληροφοριών, που μέσω της γλώσσας XML κωδικοποιεί τις απαραίτητες πληροφορίες για την αναπαράσταση, αποθήκευση και ανταλλαγή 3D μοντέλων πόλεων και τοπίων. Βασικό χαρακτηριστικό του CityGML είναι η 3D απεικόνιση της γεωμετρίας και των τοπολογικών σχέσεων των χωρικών αντικειμένων, με ταυτόχρονη εκπροσώπηση διαφόρων θεματικών και σημασιολογικών ιδιοτήτων, ταξινομήσεων και ομαδοποιήσεων (*Εικόνα 25*). Η δομή του προτύπου στηρίζεται στο Open Geospatial Consortium's Geography Markup Language 3 (GML 3.1). Η Geography Markup Language (GML) είναι μια πρότυπη γλώσσα για μοντελοποίηση, αποθήκευση και μεταφορά γεωγραφικών πληροφοριών. Η GML με τη σειρά της στηρίζεται στη γλώσσα eXtensible Markup Language (XML), που αποτελεί ένα κατανεμημένο διαδικτυακό πρότυπο του World-Wide-Web Consortium (W3C), επίσης είναι προδιαγραφή εφαρμογής του OGC (Open Geospatial Consortium) και διεθνές πρότυπο ISO (International Organization Standards).



Εικόνα 25: Επισκόπηση των ενότητων του CityGML (Πηγή: Gröger κ.ά. 2012)

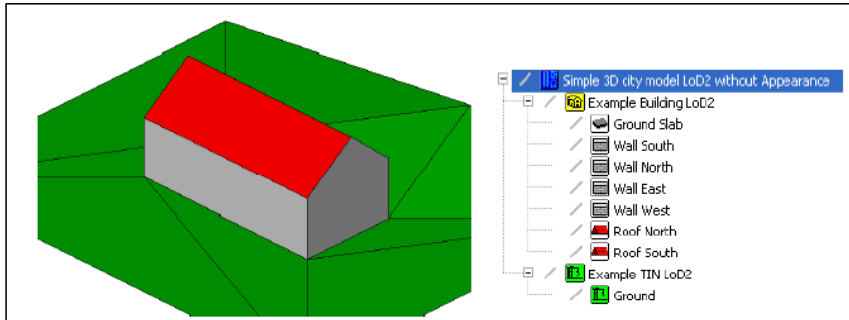
Το CityGML είναι δομημένο σε ξεχωριστές λειτουργικές ενότητες (Εικόνα 26). Οι κάθετες ενότητες αντιστοιχούν στις διαφορετικές θεματικές (Bridge, Building, CityFurniture, CityObjectGroup, LandUse, Relief, Transportation, Tunnel, Vegetation, WaterBody). Οι οριζόντιες ενότητες (CityGML Core, Appearance, Generics), αντίστοιχα, αφορούν δομές που είναι συναφείς ή που μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις κάθετες θεματικές ενότητες.



Εικόνα 26: Σχηματική αναπαράσταση του προτύπου CityGML 2.0 (Πηγή: OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard)

4.2.1 Αναπαράσταση θεματικών ενοτήτων στο CityGML

Το πρότυπο CityGML και οι επιμέρους θεματικές ενότητες που το αποτελούν είναι δυνατόν να μοντελοποιηθούν τόσο μέσω της γλώσσας XML³¹ όσο και μέσω διαγραμμάτων UML³² (Booch κ.ά., 2005).



Εικόνα 27: Παράδειγμα μοντέλου κτιρίου LOD2 στο CityGML, αριστερά γραφική αναπαράσταση και δεξιά ιεραρχία των επιμέρους στοιχείων που το αποτελούν (Πηγή: OGC City Geography Markup Language, Encoding Standard).

Η XML (Extensible Markup Language) είναι γλώσσα σήμανσης που παρέχει κανόνες για τον καθορισμό δεδομένων και την αποθήκευσή τους με κοινόχρηστο τρόπο. Υποστηρίζει την ανταλλαγή δεδομένων που μεταδίδονται ως αρχεία XML μέσω οποιουδήποτε δικτύου. Ο παραλήπτης των δεδομένων χρησιμοποιώντας τους ήδη γνωστούς κανόνες καθορισμού διαβάζει τα δεδομένα με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα και μπορεί να τα αξιοποιήσει μέσω διάφορων εφαρμογών.

Η UML (Unified Modeling Language) είναι μια γραφική γλώσσα, δηλαδή μια γλώσσα μοντελοποίησης με σκοπό την οπτικοποίηση του σχεδιασμού ενός αντικειμενοστραφούς συστήματος. Στην πράξη η χρήση της XML εξασφαλίζει την απαιτούμενη διαλειτουργικότητα ενώ η κωδικοποίηση μέσω διαγραμμάτων UML διευκολύνει τον σχεδιασμό αλλά και την ανάπτυξη του μοντέλου (βλ. 7.4).

Για να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός αναπαράστασης των ενοτήτων παρατίθεται στην Εικόνα 28 μέρος του κώδικα μοντελοποίησης ενός κτηρίου σε γλώσσα XML. Το μοντέλο κτιρίου είναι μια από τις πιο λεπτομερείς θεματικές έννοιες

³¹ Extensible Markup Language (XML)

³² Unified Modeling Language (UML)

του CityGML). Επιτρέπει την αναπαράσταση θεματικών και χωρικών πτυχών κτιρίων και τμημάτων κτιρίων σε πέντε επίπεδα λεπτομέρειας, LOD0 έως LOD4 (βλ. 4.3).

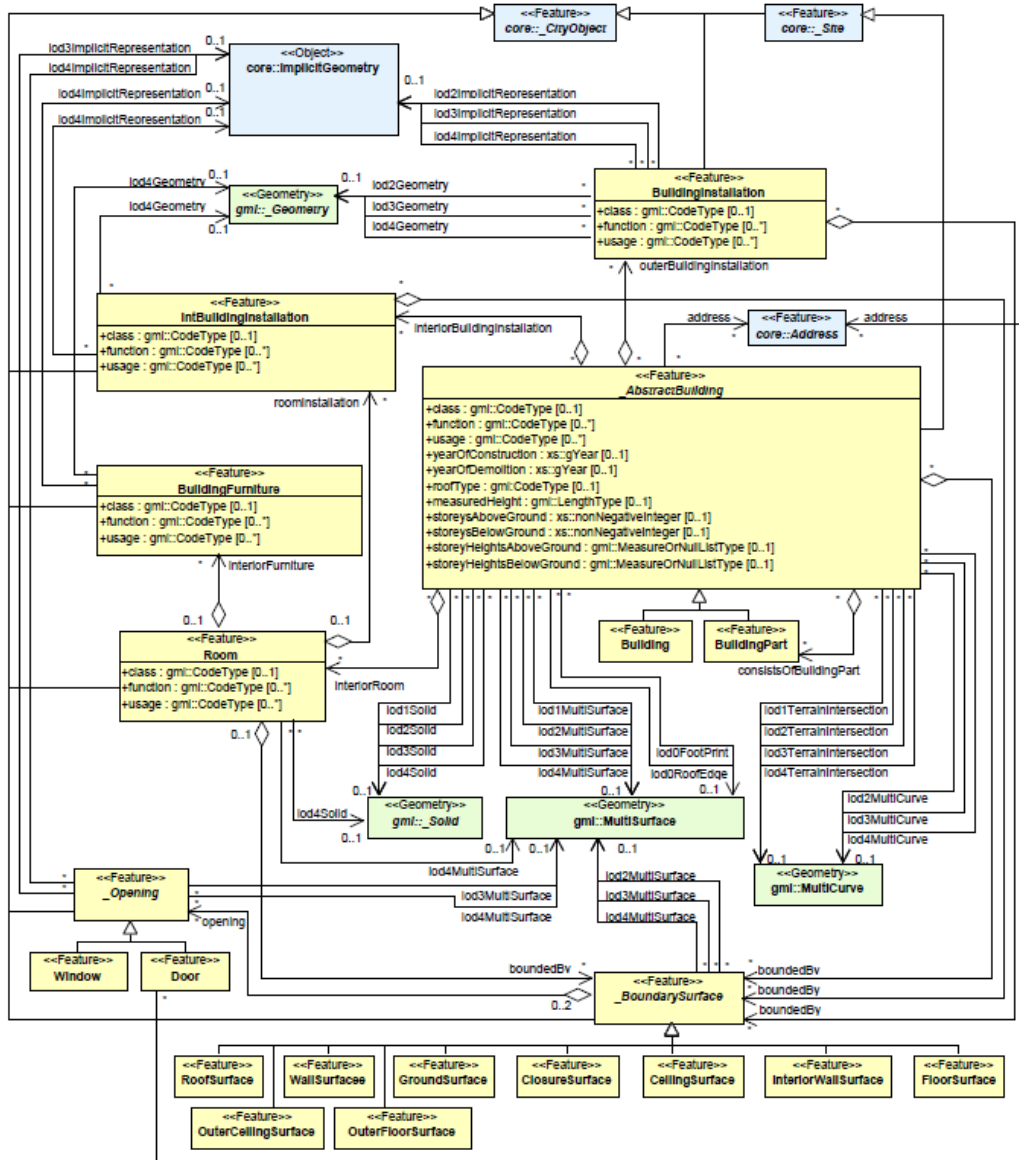
```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<CityModel xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xmlns="http://www.opengis.net/citygml/2.0"
  xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml"
  xmlns:xlink="http://www.w3.org/1999/xlink"
  xmlns:bldg="http://www.opengis.net/citygml/building/2.0"
  xmlns:dem="http://www.opengis.net/citygml/relief/2.0"
  xmlns:xAL="urn:oasis:names:tc:ciq:xsdschema:xAL:2.0"
  xsi:schemaLocation="http://www.opengis.net/citygml/building/2.0 http://schemas.opengis.net/citygml/building/2.0/building.xsd
    http://www.opengis.net/citygml/relief/2.0 http://schemas.opengis.net/citygml/relief/2.0/relief.xsd">
  <gml:name>Simple 3D city model LOD2 without Appearance</gml:name>
  <gml:boundedBy>
    <gml:Envelope srsDimension="3" srsName="urn:ogc:def:crs:crs:EPSG::25832,crs:EPSG::5783">
      <gml:lowerCorner>458868.0 5438343.0 112.0</gml:lowerCorner>
      <gml:upperCorner>458892.0 5438362.0 117.0</gml:upperCorner>
    </gml:Envelope>
  </gml:boundedBy>
  <cityObjectMember>
    <bldg:Building gml:id="GML_7b1a5a6f-ddad-4c3d-a507-3eb9ee0a8e68">
      <gml:name>Example Building LOD2</gml:name>
      ... (further attributes see LOD1 example)
      <bldg:lod2Solid>
        <gml:Solid>
          <gml:exterior>
            <gml:CompositeSurface>
              <!-- Ground Slab -->
              <gml:surfaceMember xlink:href="#GML_d3981803-d4b0-4b5b-969c-53f657594757" />
              <!-- Wall South -->
              <gml:surfaceMember xlink:href="#GML_1d350a50-6acc-4d3c-8c28-326ca4305fd1" />
              <!-- Wall North -->
              <gml:surfaceMember xlink:href="#GML_d3909000-2f18-4472-8886-1c127ea67dfl" />
              <!-- Wall East -->
              <gml:surfaceMember xlink:href="#GML_6286ffa9-3811-4796-a92f-3fd037c8e668" />
              <!-- Wall West -->
              <gml:surfaceMember xlink:href="#GML_5cc4fd92-d5de-4dd8-971e-892c91da2d9f" />
              <!-- Roof North -->
              <gml:surfaceMember xlink:href="#GML_ec6a8966-58d9-4894-8edd-9aceb91b923f" />
              <!-- Roof South -->
              <gml:surfaceMember xlink:href="#GML_b41dc792-5da6-4cd9-8f85-247583f305e3" />
            </gml:CompositeSurface>
          </gml:exterior>
        </gml:Solid>
      </bldg:lod2Solid>
    </bldg:Building>
  </cityObjectMember>
</CityModel>
```

Εικόνα 28: Απόσπασμα σε XML του κτιριακού μοντέλου (Πηγή: OGC City Geography Markup Language, En-coding Standard).

Προκειμένου να βελτιωθεί η αναγνωσιμότητα των διαγραμμάτων UML CityGML, οι κλάσεις απεικονίζονται με διαφορετικά χρώματα (Εικόνα 29). Οι κλάσεις που είναι βαμμένες με κίτρινο χρώμα ανήκουν στην κατηγορία των προαπαιτούμενων, δηλαδή υποδηλώνει κλάσεις που ορίζονται στην κλάση βασικών απαιτήσεων CityGML. Οι βαμμένες με μπλε χρώμα κλάσεις ανήκουν μεν στην κατηγορία των προαπαιτούμενων αλλά υποδηλώνουν διαφορετική ενότητα σε σχέση με τις κλάσεις που είναι κίτρινες. Οι κλάσεις που είναι βαμμένες με πράσινο ορίζονται στα πρότυπα ISO 19107, 19111 ή 19123. Οι γκρι κλάσεις ορίζονται στο πρότυπο ISO 19109. Τέλος, λευκό χρώμα χρησιμοποιείται για σημειώσεις και τη γλώσσα OCL³³ (Object Constraint Language) που παρέχονται στα διαγράμματα UML.

³³ <https://docs.ogc.org/guides/20-066.html#iso19507>

Στο πλαίσιο της σημασιολογικής 3D μοντελοποίησης πόλεων το CityGML είναι το μόνο διαθέσιμο ανοιχτό διεθνές πρότυπο, επιτρέποντας μια ολοκληρωμένη αναπαράσταση όλων των αστικών οντοτήτων σε κλίμακα πόλης και τις σχέσεις μεταξύ τους (van den Brink κ.ά., 2013). Καθορίζει επίσης διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας (LODs) για τα αντικείμενα 3D. Αυτή η τυποποιημένη αναπαράσταση αστικών αντικειμένων μπορεί να αξιοποιηθεί σε διαφορετικές εφαρμογές και σκοπούς (Biljecki κ.ά., 2018a; Zlatanova, 2000a).



Εικόνα 29: Η μοντελοποίηση ενός κτιρίου (AbstractBuilding) μέσω διαγράμματος UML (Πηγή: OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard).

4.3 Level of detail (LOD)

Η έννοια του επιπέδου λεπτομέρειας (LOD) του προτύπου CityGML αποσκοπεί στη διαφοροποίηση των αναπαραστάσεων πολλαπλής κλίμακας σημασιολογικών τρισδιάστατων μοντέλων πόλεων (Biljecki κ.ά., 2014). Η έννοια στην πράξη χρησιμοποιείται κυρίως για να υποδείξει τη γεωμετρική λεπτομέρεια ενός μοντέλου, κυρίως κτιρίων. Το επίπεδο λεπτομέρειας (LOD) ενός 3D μοντέλου πόλης είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του. Υποδηλώνει τη συμμόρφωση του μοντέλου στο αντίστοιχο του πραγματικού κόσμου και έχει επιπτώσεις στη χρηστικότητα του (Biljecki κ.ά., 2014).

Το πρότυπο CityGML³⁴ ορίζει πέντε LOD. Η ιδέα προορίζεται για πολλές θεματικές κατηγορίες αντικειμένων αλλά επικεντρώνεται κυρίως σε κτίρια και οι πέντε περιγραφόμενες περιπτώσεις αυξάνουν τη γεωμετρική και σημασιολογική πολυπλοκότητά τους (Εικόνα 30). Το LOD0 αποτελείται από τα ίχνη των κτιρίων που χρησιμοποιούνται για τη μετάβαση από το 2D στο 3D GIS. Το LOD1 είναι ένα πρισματικό μοντέλο που λαμβάνεται με εξώθηση ενός μοντέλου LOD0. Το LOD2 είναι ένα μοντέλο με απλοποιημένο σχήμα οροφής και όπου τα μέρη του αντικειμένου μπορούν να μοντελοποιηθούν σε πολλαπλές σημασιολογικές κατηγορίες (πχ. στέγη, τοίχος). Το LOD3 είναι ένα αρχιτεκτονικά λεπτομερές μοντέλο με παράθυρα και πόρτες, που είναι πολύ πιο περίπλοκο από το προηγούμενο. Το LOD4 συμπληρώνει ένα LOD3 συμπεριλαμβάνοντας χαρακτηριστικά εσωτερικού χώρου (Kolbe, 2009). Η περιγραφείσα ταξινόμηση κατά LOD καθιερώθηκε από την πρωτοβουλία German Special Interest Group 3D (SIG 3D³⁵) (Albert J κ.ά., 2003) και έχει περιγραφεί περαιτέρω στους (Gröger & Plümer, 2012).



Εικόνα 30: Τα πέντε επίπεδα λεπτομέρειας του CityGML (Πηγή: Gröger & Plümer, 2012)

³⁴ Από την Open Geospatial Consortium (2012)

³⁵ Η SIG 3D είναι ανεξάρτητη ομάδα εργασίας που ασχολείται με ζητήματα που αφορούν τη μοντελοποίηση, την αποθήκευση, τη δημιουργία, τη χρήση, την οπτικοποίηση και την εμπορία τρισδιάστατων (3D) μοντέλων πόλεων αλλά και τοπίων. Ιδρύθηκε το 2002 και ήταν το αποτέλεσμα συνεργασίας διεθνών φορέων από διάφορους τομείς (οικονομία, επιστημών, διοίκησης κλπ.). Στόχος του είναι η δημιουργία μιας ανοιχτής και διαλειτουργικής υποδομής 3D χωρικών δεδομένων (<https://www.sig3d.org/index.php/en/about-sig3d.html>).

Είναι γεγονός ότι τα επίπεδα λεπτομέρειας (LOD) έχουν υιοθετηθεί ευρέως στον χώρο των συστημάτων 3D GIS και περιγράφουν την ποιότητα σχεδιασμού ενός 3D μοντέλου πόλης, ειδικά τη γεωμετρική του πτυχή. Η αξιοποίηση όμως των LOD, πέραν των συστημάτων GIS, έχει υιοθετηθεί και σε άλλους επιστημονικούς χώρους και τομείς, όπως στην επιστήμη των γραφικών υπολογιστών (Musialski κ.ά., 2013; Verdie κ.ά., 2015) αλλά και στον τομέα των μοντέλων BIM³⁶ (Tolmer κ.ά., 2013).

Πίνακας 3: Οι προτεινόμενες απαιτήσεις ακρίβειας για LOD 0-4 του CityGML (Albert J κ.ά., 2003)

	LOD0	LOD1	LOD2	LOD3	LOD4
Model scale description	regional, landscape	city, region	city, city districts, projects	city districts, architectural models (exterior), landmark	architectural models (interior), landmark
Class of accuracy	lowest	low	middle	high	very high
Absolute 3D point accuracy (position / height)	lower than LOD1	5/5m	2/2m	0.5/0.5m	0.2/0.2m
Generalisation	maximal generalisation	object blocks as generalised features; > 6*6m/3m	objects as generalised features; > 4*4m/2m	object as real features; > 2*2m/1m	constructive elements and openings are represented
Building installations	no	no	yes	representative exterior features	real object form
Roof structure/representation	yes	flat	differentiated roof structures	real object form	real object form
Roof overhanging parts	yes	no	yes, if known	yes	yes
CityFurniture	no	important objects	prototypes, generalized objects	real object form	real object form
SolitaryVegetationObject	no	important objects	prototypes, higher 6m	prototypes, higher 2m	prototypes, real object form
PlantCover	no	>50*50m	>5*5m	< LOD2	<LOD2

Η έννοια του LOD του CityGML αποσκοπεί κυρίως στη διαφοροποίηση του βαθμού των δεδομένων που προκύπτουν από διαφορετικές ροές εργασιών παραγωγής και καθοδηγούνται από τη σημασιολογία όσο και από τη γεωμετρία. Στη βιομηχανία και την ερευνητική κοινότητα έγιναν δεκτά από την οπτική γωνία του γεωμετρικού εμπλουτισμού, εξαιτίας κατά κύριο λόγο της έλλειψης εφαρμογών που απαιτούν σημασιολογία.

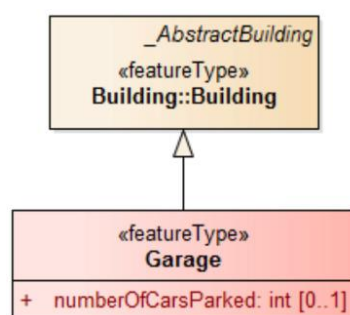
4.4 Application Domain Extension (ADE)

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του CityGML είναι η δυνατότητα επέκτασής του μέσω του μηχανισμού επέκτασης “Application Domain Extension” (ADE). Η σύλληψη της ιδέας του μηχανισμού ADE στο CityGML εισήχθη από την αρχική του έκδοση (CityGML 0.4) που κυκλοφόρησε τον Μάιο του 2007. Οι δύο κύριοι στόχοι του ήταν:

³⁶ Το μοντέλο BIM (Building Information Modeling) είναι μια ολοκληρωμένη ψηφιακή αναπαράσταση των φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών μιας υποδομής που αφορά τον τεχνικό σχεδιασμό, τη διαχείριση και τη λειτουργία μίας κατασκευής.

- Η μοντελοποίηση αντικειμένων και χαρακτηριστικών που δεν καλύπτονται στο μοντέλο δεδομένων του CityGML.
- Η δυνατότητα προσθήκης νέων δυνατοτήτων και ιδιοτήτων, προκειμένου να αυξηθούν οι δυνατότητες μοντελοποίησης που προσφέρει το CityGML.

Ένα ADE (όπως και το βασικό μοντέλο CityGML) μπορεί να καθοριστεί είτε μέσω σχήματος XML (XSD) (Εικόνα 32), είτε μέσω διαγράμματος ενοποιημένης γλώσσας μοντελοποίησης (UML) (Εικόνα 31). Ωστόσο, η τεκμηρίωση των έως τώρα εκδόσεων CityGML περιγράφει μόνο τον καθορισμό μέσω των XML σχημάτων (Biljecki κ.ά., 2018a). Το 2014 ο OGC³⁷ (Open Geospatial Consortium) δημοσίευσε έναν οδηγό βέλτιστων πρακτικών ανάπτυξης ADE (Brink κ.ά., 2014) που βασιζόταν στην πρόταση του 2012 των Van den Brink, Stoter και Zlatanova (Van den Brink κ.ά., 2012)³⁸. Στην τεκμηρίωση της τρέχουσας έκδοσης CityGML 2.0, παρατίθενται δύο υποδείγματα ανάπτυξης ADE (OGC, 2012) με σαφείς οδηγίες με κανόνες μοντελοποίησης.



Εικόνα 31: Διάγραμμα UML που απεικονίζει την επέκταση της κλάσης CityGML Building με νέο χαρακτηριστικό τύπο Garage ως υποκλάση με στερεότυπο «featureType» (Πηγή: Biljecki κ.ά., 2018a)

Η ανάπτυξη ενός ADE δεν προϋποθέτει κάποιου είδους έγκριση από τον OGC ή κάποιον άλλον οργανισμό τυποποίησης (Biljecki κ.ά., 2018a). Υλοποιήσεις καλά τεκμηριωμένων και ευρέως χρησιμοποιούμενων επεκτάσεων ADE, είναι δυνατόν να υιοθετηθούν από την OGC και να ενσωματωθούν στο πρότυπο όπως έγινε με τις επεκτάσεις Tunnel ADE και Bridge ADE. Οι εν λόγω επεκτάσεις δημοσιεύτηκαν κατά το μεσοδιάστημα από την πρώτη έκδοση του προτύπου έως και τη δεύτερη και ενσωματώθηκαν ως τυπικές ενότητες στο CityGML 2.0.

³⁷ <https://www.ogc.org/>

³⁸ Modeling an application domain extension of CityGML in UML, 3D GeoInfo, May 2012, in Quebec, Canada

```

.....
.....
<import namespace="http://www.opengis.net/citygml/
2.0"
      schemaLocation="http://schemas.opengis.net/
citygml/2.0/cityGMLBase.xsd"/>
<import namespace="http://www.opengis.net/citygml/
building/2.0"
      schemaLocation="http://schemas.opengis.net/
citygml/building/2.0/building.xsd"/>
.....
.....
<element name="Garage" type="GarageType"
      substitutionGroup="bldg:AbstractBuilding"/>
<complexType name="GarageType">
  <complexContent>
    <extension base="bldg:BuildingType">
      <sequence>
        <element name="numberOfCarsParked" type="xs:
integer" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
      </sequence>
    </extension>
  </complexContent>
</complexType>

```

Εικόνα 32: XML schema που απεικονίζει την επέκταση της κλάσης CityGML Building με νέο χαρακτηριστικό τύπο Garage ως υποκλάση με στερεότυπο «featureType» (Πηγή: Biljecki κ.ά., 2018a)

Όσο αφορά το γενικότερο πλαίσιο σχεδιασμού και μοντελοποίησης ενός ADE θα πρέπει να ορίζεται με τον δικό του χώρο ονομάτων (namespaces), για να μην παρουσιάζεται το φαινόμενο συγκρούσεων με τις βασικές ενότητες του προτύπου και να έχει τους δικούς του καταλόγους κωδικών. Είναι δυνατή η παράλληλη επέκταση πολλαπλών θεματικών ενοτήτων με ένα ADE καθώς και η αξιοποίηση διαφορετικών ADE πάνω στο ίδιο σύνολο δεδομένων. Τέλος, είναι εφικτή η εισαγωγή νέων χωρικών αναπαραστάσεων για τα ήδη υπάρχοντα χαρακτηριστικά του βασικού μοντέλου CityGML (Kumar κ.ά., 2016).

Οι Biljecki, Kumar και Nagel (2018) παρουσίασαν μια φιλόδοξη βιβλιογραφική επισκόπηση των δημοσιευμένων ADE (K. Kumar κ.ά., 2018) από την υιοθέτηση του προτύπου CityGML (2008, έκδοση 0.4 του προτύπου) και για μια δεκαετία. Καταγράφουν 44 προσπάθειες επέκτασης του βασικού μοντέλου μέσω του μηχανισμού ADE και ταξινομούν τις υλοποιήσεις με βάση την εφαρμογή τους. Για την επέκταση του τυπικού μοντέλου CityGML έχουν υπάρξει διάφορες προσεγγίσεις και προτάσεις αλλά ουσιαστικά η περιγραφή και τα πλαίσια ανάπτυξης έχουν τεθεί από τους (Van den Brink, Stoter, κ.ά., 2013). Στη γενική περιγραφή της η ανάπτυξη είναι δυνατή με δύο κυρίως τρόπους: (i) αυξάνοντας τις υφιστάμενες κλάσεις χαρακτηριστικών CityGML με πρόσθετες πληροφορίες χαρακτηριστικών σε συγκεκριμένους τομείς, (ii) εισάγοντας νέους τύπους *City Furnitures*.

Πίνακας 4: Κατάλογος αναγνωρισμένων ADE (Biljecki κ.ά., 2018b)

	ADE ^a	Purpose	Website ^d	XSD ^b	UML	Origin ^c
1	Energy ADE	Application	URL-1	•	•	Europe
2	Energy Efficiency ADE	Application		•	•	Italy
3	Energy Efficiency ADE (ii)	Application			•	Spain
4	Noise ADE	Application	URL-2	•	•	Germany
5	Extended Noise ADE	Application			•	Netherlands
6	Road Traffic Noise ADE	Application		•	•	India
7	Robotics ADE	Application	URL-3	•	•	Japan
8	UtilityNetworkADE	Application	URL-4	•	•	Germany
9	CAFM ADE	Application		•	•	Germany
10	Immovable Property Taxation ADE	Application	URL-5	•	•	Turkey
11	Cadastre ADE	Application		•		Netherlands
12	CityGML-LADM ADE	Application			•	Mixed
13	Cultural Heritage ADE	Application	URL-6		•	Spain
14	Cultural Heritage ADE (ii)	Application		•	•	Italy
15	Cultural Heritage ADE (iii)	Application		•	•	Italy
16	Heritage house ADE	Application				Malaysia
17	Intervention ADE	Application			•	Spain
18	BCH Management ADE	Application				Belgium
19	Indoor N&P ADE	Application			•	India
20	Indoor ADE	Application		•	•	Korea
21	i-SCOPE	Application				Europe
22	HydroADE	Application				Germany
23	AR ADE	Application			•	Canada
24	Collada FX ADE	Application				Germany
25	ENC ADE	Application				Germany
26	Air Quality ADE	Application				Italy
27	IMGeo ADE	Generic	URL-7	•	•	Netherlands
28	CityGML-TRKBIS	Generic			•	Turkey
29	INSPIRE ADE	Generic		•	•	Germany
30	ACRoofADE	Generic		•	•	China
31	CityGML iTINs ADE	Generic	URL-8	•	•	Netherlands
32	Vegetation Objects ADE	Generic				Mexico
33	Dynamizers	Generic			•	Germany
34	Dynamic ADE	Generic			•	Spain
35	Geodata Join ADE	Generic				Germany
36	Topo ADE	Generic				China
37	Transport ADE	Generic				Netherlands
38	Traffic Sign ADE	Generic				Spain
39	3D-GEM	Generic			•	Netherlands
40	New LOD ADE	Generic			•	Netherlands
41	Semantic City Model	Generic			•	China
42	GeoBIM	Generic	URL-9	•	•	Netherlands
43	PANTURA ADE	Generic				Netherlands
44	3D Metadata ADE	Generic	URL-10	•	•	Netherlands

Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται η ενότητα *Generics* που ορίζεται στις προδιαγραφές CityGML. Η μεθοδολογία αυτή παρέχει έναν σχετικά απλό τρόπο επέκτασης του τυπικού μοντέλου καθώς δε χρειάζεται να αλλάξει το υπάρχον σχήμα εφαρμογής CityGML. Χρησιμοποιώντας για παράδειγμα την κλάση χαρακτηριστικών

GenericCityObject είναι δυνατόν να αντιπροσωπευτούν νέα αντικείμενα σε σχέση με τις θεματικές και χωρικές τους ιδιότητες. Στην περίπτωση προσθήκης πληροφοριών χαρακτηριστικού συγκεκριμένου τομέα το *GenericAttributes* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσθήκη χαρακτηριστικών με διαφορετικούς τύπους δεδομένων στις υπάρχουσες κατηγορίες CityGML. Η αξιοποίηση της μεθοδολογίας αυτής παρουσιάζει μια σειρά από περιορισμούς και μειονεκτήματα (Yao, 2019):

- Αδυναμία αναπαράστασης των πολύπλοκων δομημένων κατηγοριών χαρακτηριστικών που μπορούν να παρουσιαστούν. Δεδομένου ότι η δομή της κλάσης *GenericCityObject* είναι ιδιαίτερα απλουστευμένη. Ως εκ τούτου δεν είναι σε θέση να περιγράψει τις σημασιολογικές σχέσεις (συσχέτιση, συγκέντρωση κλπ.) μεταξύ κλάσεων, οι οποίες ενδέχεται να συνδέονται ή να κληρονομούνται από τις υπάρχουσες κλάσεις CityGML.
- Υποστήριξη περιορισμένων τύπων δεδομένων (character string, integer, real, date κλπ.) και κατά συνέπεια δεν είναι σε θέση να αναπαραστήσουν τύπους δεδομένων που έχουν πολύπλοκες δομές π.χ. σχέσεις κληρονομικότητας.
- Απουσία δυνατότητας διαχείρισης και καθορισμού της ελάχιστης ή μέγιστης εμφάνισης των *GenericAttributes*, δεδομένου ότι επιτρέπεται να εμφανίζονται αυθαίρετα σε ένα αντικείμενο πόλης σύμφωνα με το πρότυπο CityGML.
- Τέλος τα *GenericAttributes* ή το *CityObject* που ανήκουν σε διαφορετικούς τομείς εφαρμογών δεν επιτρέπεται να έχουν το ίδιο όνομα σε ένα έγγραφο αναφοράς ταυτόχρονα. Ως αποτέλεσμα, η συμβατή χρήση διαφορετικών πληροφοριών που αφορούν συγκεκριμένο τομέα δε μπορεί να διασφαλιστεί και εύκολα μπορεί να προκύψουν προβλήματα σύγκρουσης ονομάτων.

Στη δεύτερη περίπτωση γίνεται χρήση του μηχανισμού επέκτασης του CityGML (ADE), ο οποίος απαιτεί τα επιπλέον σχήματα εφαρμογών να καθοριστούν και να συνδεθούν με τα τυπικά σχήματα εφαρμογών του CityGML. Χρησιμοποιεί δύο συγκεκριμένα στερεότυπα «*ADEElement*» και «*ADE*» για να επισημάνουν τη σχέση υποκατηγορίας και εξειδίκευσης αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο όλες οι ιδιότητες που ανήκουν στην κατηγορία «*ADEElement*» θα αναγνωριστούν ως ιδιότητες ADE οι οποίες θα εισαχθούν στην αντίστοιχη μητρική κλάση CityGML. Ένα ADE μπορεί να δημιουργηθεί από την αρχή μέσω ενός διαγράμματος UML (van den Brink κ.ά., 2013). Χρησιμοποιώντας τους κανόνες κωδικοποίησης από UML σε XML που ορίζονται στο

πρότυπο ISO 19136, ένα CityGML ADE μπορεί επίσης να υλοποιηθεί ως αρχείο ορισμού σχήματος XML που παραπέμπει τόσο στο σχήμα CityGML όσο και στο σχήμα GML. Τα CityGML ADE μεταδίδονται κυρίως με τη χρήση αρχείων σχημάτων XML με σκοπό την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών εφαρμογών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, ένα σχήμα XML παρέχει μια εξελιγμένη συντακτική δομή η οποία δεν είναι μόνο ικανή να αναπαραστήσει τη σημασιολογία αντικειμενοστραφών μοντέλων με πολύπλοκες δομές δεδομένων αλλά μπορεί να ερμηνευθεί και να αναλυθεί εύκολα από πολλά εργαλεία λογισμικού ή βιβλιοθήκες προγραμματισμού που διαχειρίζονται σχήματα XML. Επιπλέον, τα έγγραφα XML μπορούν να ελεγχθούν σε σχέση με τα μετα-μοντέλα τους απευθείας χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα σχήματα XML για να διασφαλιστεί η εγκυρότητα των CityGML ADEs.

4.4.1 Επισκόπηση εφαρμογών ADE

Μία από τις πρώτες προσπάθειες επέκτασης του προτύπου CityGM ήταν η συλλογική προσπάθεια διαφόρων ευρωπαϊκών οργανισμών, με τη συμμετοχή πανεπιστημίων, για την υλοποίηση του Energy ADE (Aguilar, 2016a; Boates κ.ά., 2018; Bruse κ.ά., 2016). Η επέκταση αυτή φιλοδοξούσε να επεκτείνει το CityGML εμπλουτίζοντας το με πληροφορίες χρήσιμες για προσομοιώσεις ενέργειας (χρησιμοποιημένο ενεργειακό σύστημα, ενεργειακή πληρότητα κτιρίων, χρησιμοποιούμενα υλικά κλπ.). Το Energy ADE υποστηρίζει διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας (LODs) και είναι σε θέση να συνδυαστεί με άλλα ADE. Είναι γεγονός ότι το Energy ADE έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε διάφορες υλοποιήσεις (Aguilar, 2016a; Bruse κ.ά., 2016; Prandi κ.ά., 2016; Wate & Saran, 2015) καθώς το θέμα της ενέργειας είναι πάντα επίκαιρο και κυρίως αφορά εθνικούς σκοπούς. Υποστηρίζεται από φορείς και οργανισμούς εξασφαλίζοντας την παρουσία και την ενσωμάτωση του σε πρότζεκτ και πακέτα λογισμικών.

Οι δημιουργοί της έκδοσης CityGML 2.0 (OGC, 2012) συμπεριέλαβαν το υπόδειγμα επέκτασης Noise ADE. Σκοπός του η παροχή υποστήριξης για τη δημιουργία χαρτών ηχορύπανσης με προσομοιώσεις που βασίζονται σε 3D μοντέλα πόλεων. Όπως γίνεται αντιληπτό αυτού του είδους χωρικής ανάλυσης απαιτεί πληροφορίες που δεν υποστηρίζονται από το βασικό πρότυπο CityGML. Ιδιότητες όπως η ανάκλαση θορύβου των κτιρίων, ο αριθμός των ενοίκων που διαμένουν στα κτίρια, η διακύμανση του θορύβου κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά και συναρτήσει του ύψους των κατοικιών δεν ήταν δυνατόν να προβλεφθούν και να ενταχθούν στη βασική έκδοση. Τα νέα στοιχεία του Noise ADE μοντελοποιούνται ως child elements

των βασικών χαρακτηριστικών του CityGML. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το συγκεκριμένο ADE όσο αναφορά την ευελιξία του και της επιπρόσθετης επέκτασής του από μεταγενέστερες μελέτες (Dutta κ.ά., 2017). Ερευνητές και ομάδες εργασίας, διαπιστώνοντας ελλείψεις προτείνουν επιπλέον επεκτάσεις ADE και προσαρμόζουν το μοντέλο προκειμένου να βελτιώσουν τη λειτουργικότητά του. Για παράδειγμα διακυμάνσεις του θορύβου ανάλογα με τον τύπο και την ταχύτητα του οχήματος, νομικοί περιορισμοί, έλλειψη υποστήριξης για βιομηχανικό θόρυβο κλπ. είναι μερικές από τις ιδιότητες που προστέθηκαν σε άλλες μεταγενέστερες υλοποιήσεις (Konde, 2015).

Στην ίδια έκδοση του προτύπου (CityGML 2.0) συμπεριλαμβάνεται μαζί με το Noise ADE και ένα δεύτερο υπόδειγμα, το Ubiquitous Network Robots Services (UNR-PF). Το UNR-PF επεκτείνει το CityGML με χαρακτηριστικά και ιδιότητες απαραίτητα για την πλοήγηση ρομποτικών συσκευών και αποτελεί ένα παράδειγμα ADE που εξαρτάται από το LOD (Teramoto κ.ά., 2012). Επίκεντρο αυτής της επέκτασης είναι το χαρακτηριστικό *bldg:Room*, πληροφορίες που έχουν να κάνουν με τις αποστάσεις, ανοίγματα των χώρων και των αντικειμένων αλλά και τα υλικά κατασκευής αυτών είναι από αυτές που υποστηρίζονται από το UNR-PF. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η επέκταση αυτή εφαρμόζεται σε υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας επεκτείνοντας το χαρακτηριστικό *bldg:Room*, το οποίο είναι διαθέσιμο μόνο στο LOD4.

Το 2010, δύο χρόνια πριν κυκλοφορήσει η έκδοση CityGML 2.0, δημοσιεύτηκε ένα από τα πιο δημοφιλή ADE, το UtilityNetworkADE (Becker κ.ά., 2011; Kutzner & Kolbe, 2016). Πρόκειται για μία επέκταση που επιτρέπει τη μοντελοποίηση δικτύων κοινής ωφελείας στο CityGML, διευκολύνει αναλύσεις και προσομοιώσεις σε υποδομές δικτύων και καθιστά εφικτή την 3D τοπογραφική αναπαράσταση των στοιχείων του δικτύου ως αντικείμενα πόλης. Υποστηρίζει δίκτυα ύδρευσης, ηλεκτρικής ενέργειας, φυσικού αερίου κλπ., με πληροφορίες σχετικά με τη χρήση, τα υλικά, τις παραμέτρους λειτουργίας και τον πληθυσμό ανάλογα με το δίκτυο. Η εφαρμογή και η προσαρμοστικότητα της επέκτασης είναι αξιοσημείωτη, έχει αξιοποιηθεί για διάφορους σκοπούς και μελέτες (Hijazi κ.ά., 2011; Krüger κ.ά., 2012). Επιπλέον αποτελεί προτεινόμενη ενσωμάτωση στο CityGML 3.0 (Biljecki κ.ά., 2018b).

Εκτός των γνωστών και δημοφιλών ADE που εστιάζουν στις υποδομές και τις προσομοιώσεις των αντικειμένων που αποτελούν ένα αστικό περιβάλλον υπάρχουν μελέτες που προτείνουν και αναπτύσσουν επεκτάσεις για την υποστήριξη υπηρεσιών (Teramoto κ.ά., 2012), τη διαχείριση (Becker κ.ά., 2011), τη νομική υπόσταση (Becker κ.ά., 2013; Kutzner & Kolbe, 2016) αλλά και την πολιτιστική ταυτότητα (Agoub κ.ά., 2016; Hijazi κ.ά., 2017; Jamali, 2012; Jayaraj & Ramiya, 2018) κτιρίων.

Ολοκληρώνοντας αυτή τη σύντομη επισκόπηση που αφορά την ανάπτυξη ADE θα πρέπει να αναφέρουμε την επίτευξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ του CityGML και της ευρωπαϊκής προδιαγραφής INSPIRE Building³⁹, που βασίζεται εν μέρει στο CityGML, μέσω ADE. Μία επέκταση που προωθεί τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των δύο προτύπων (Gröger κ.ά., 2013; INSPIRE Thematic Working Group - WUR, 2013). Το ADE σχετίζεται με τμήμα που αφορά την 3D αναπαράσταση της προδιαγραφής INSPIRE για τα κτίρια και επεκτείνει το CityGML με χαρακτηριστικά κτιρίων που δεν είναι διαθέσιμα στο βασικό μοντέλο (Roschlaub & Batscheider, 2016).

4.5 Οπτικοποίηση CityGML και ADE

Υπάρχουν διάφορες υλοποιήσεις γεωχωρικών λογισμικών και λογισμικών οπτικοποίησης που υποστηρίζουν το CityGML. Στην πράξη ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: σε αυτά που είναι σε θέση να διαβάζουν απευθείας δεδομένα CityGML προκειμένου να τα οπτικοποιήσουν και σε αυτά που οι χρήστες πρέπει να μετατρέπουν τα αρχεία με τη χρήση άλλου λογισμικού πριν από την προβολή (Biljecki κ.ά., 2018b). Όσο αναφορά την υποστήριξη τους σε επεκτάσεις ADE, σύμφωνα με την επίσημη ιστοσελίδα του προτύπου⁴⁰, υπάρχουν διάφορες εφαρμογές (εμπορικές και δωρεάν) που είναι δυνατόν να διαχειριστούν και να οπτικοποιήσουν επεκτάσεις ADE. Οι Biljecki κ.ά. (2018) στην έρευνα τους κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η υποστήριξη για τις ADE είναι περιορισμένη. Ουσιαστικά η ανάπτυξη ενός νέου ADE απαιτεί την τροποποίηση ενός υφιστάμενου πακέτου λογισμικού ή την ανάπτυξη ενός νέου. Στην πλειονότητά τους τα περισσότερα λογισμικά δεν υποστηρίζουν τις επεκτάσεις ADE. Συνεπώς, οι διαθέσιμες λύσεις οπτικοποίησης ενός ADE είναι περιορισμένες τουλάχιστον προς το παρόν.

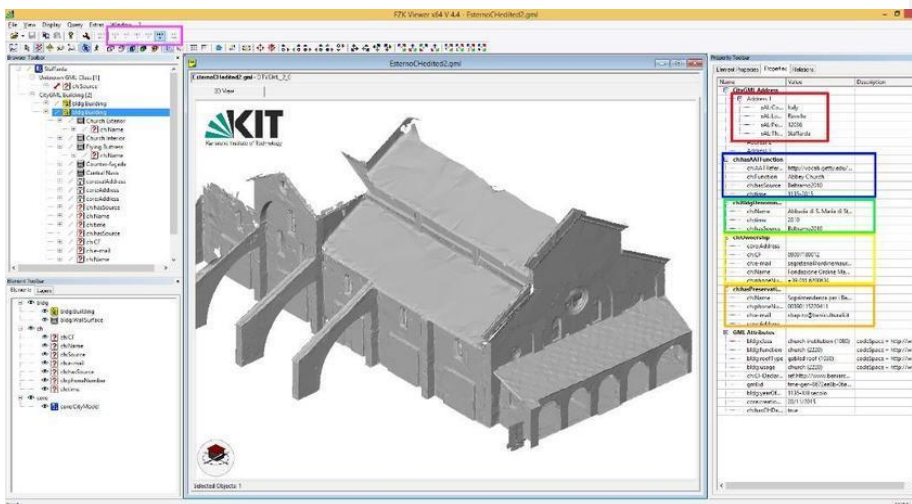
³⁹ <https://inspire.ec.europa.eu/id/document/tg/bu>

⁴⁰ https://www.citygmlwiki.org/index.php?title=Citygml_Wiki

4.5.1 FZKViewer

Ένα παράδειγμα λογισμικού που υποστηρίζει τόσο το CityGML όσο και τις επεκτάσεις ADE (Lim κ.ά., 2020) είναι το FZKViewer⁴¹ (KIT - Karlsruhe Institute of Technology, 2021), που αναπτύχθηκε από το IAI/KIT⁴², ένα εργαλείο για Windows που μπορεί να οπτικοποιήσει γεωμετρικές και σημασιολογικές πληροφορίες από αρχεία IFC, gbXML και CityGML.

Με σχόλια [am7]: Κάτι πήγε στραβά στην αρίθμηση;



Εικόνα 33: Οπτικοποίηση αρχείου CityGML μέσω του λογισμικού FZKViewer (Πηγή: KIT - Karlsruhe Institute of Technology, 2021)

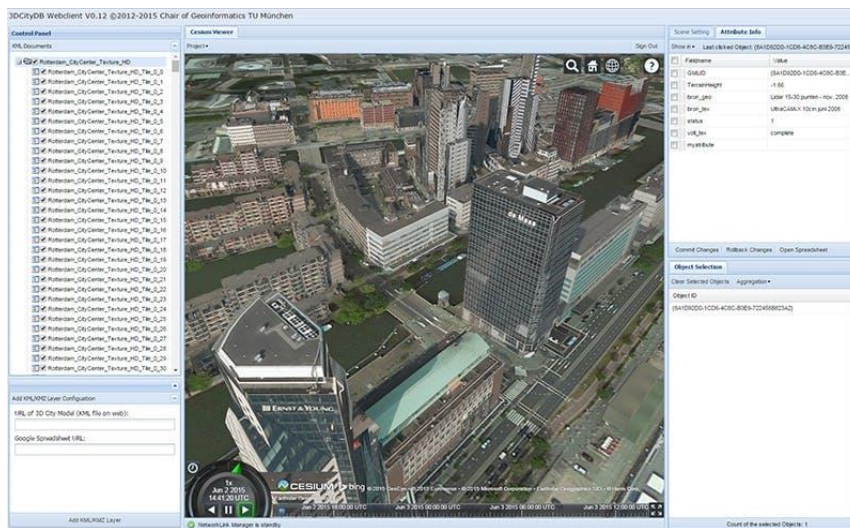
Το λογισμικό είναι σε θέση να προβάλει 3D το μοντέλο, να εξάγει την ιεραρχία και τις σχέσεις μεταξύ των αντικειμένων στο αρχείο, καθώς και πίνακες ιδιοτήτων ή στατιστικά στοιχεία σχετικά με τα αντικείμενα που βρέθηκαν (Εικόνα 33). Έχει ενσωματώσει τα σχήματα των διαδομένων και ευρέως χρησιμοποιούμενων ADE, προβάλλοντας τις γεωμετρικές και σημασιολογικές πληροφορίες τους (ADE Energy, NoiseADE, UtilityNetworkADE). Επίσης είναι σε θέση σε κάποιες περιπτώσεις να εμφανίσει μέρος των ιδιοτήτων τους. Για κάθε νέο ADE που επιθυμούμε να προβληθεί από το λογισμικό θα πρέπει να εισαχθεί το σχήμα XML (.XSD) στον φάκελο της εφαρμογής μαζί με τα υπόλοιπα σχήματα.

⁴¹ <https://www.iai.kit.edu/english/1648.php>

⁴² The Institute for Automation and Applied Informatics (IAI) of the Karlsruhe Institute of Technology (KIT), <https://www.iai.kit.edu/english/index.php>

4.5.2 citygml4j

Το citygml4j⁴³ είναι ένα ανοικτού κώδικα Java API για το CityGML. Είναι σε θέση να αναγνωρίζει τις επεκτάσεις ADE και στη συνέχεια να τις οπτικοποιήσει με αποτελεσματικό τρόπο (Εικόνα 34), ουσιαστικά παρέχει μια ολοκληρωμένη υποστήριξη για τις επεκτάσεις του προτύπου CityGML.



Εικόνα 34: Οπτικοποίηση τμήματος της πόλης του Βερολίνου με χρήση του Java API citygml4j μέσω της πλατφόρμας Cesium (Πηγή: <https://cesium.com>)

4.5.3 Azul

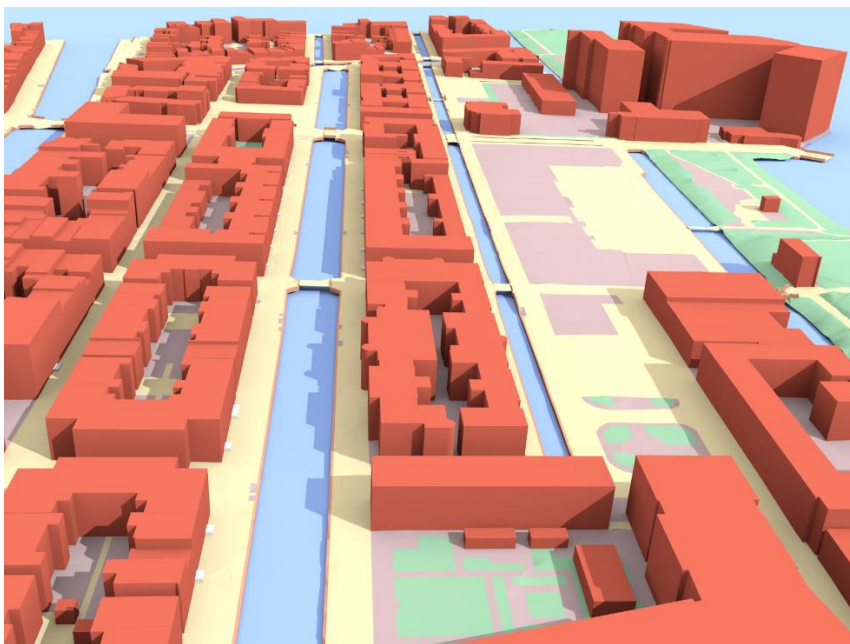
Το λογισμικό ανοικτού κώδικα Azul⁴⁴ για συστήματα macOS, υποστηρίζει το Ολλανδικό πρότυπο IMGeo και είναι σε θέση να απεικονίσει γεωμετρίες οποιασδήποτε επέκτασης ADE. Ωστόσο, αδυνατεί να απεικονίσει θεματικές επεκτάσεις που αφορούν για παράδειγμα νέα χαρακτηριστικά που δεν είναι προκαθορισμένα στον κώδικα.

⁴³ <https://github.com/citygml4j/citygml4j>

⁴⁴ <https://github.com/tudelft3d/azul>

4.5.4 3Dfier

Το 3DfierFootnote⁴⁵, ένα λογισμικό ανοικτού κώδικα για την αυτόματη κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων πόλεων (Εικόνα 35) σε μορφές OBJ και CityGML, είναι σε θέση να υποστηρίξει το IMGeo ADE.



Εικόνα 35: Ανύψωση πολυγώνων στη 3η διάσταση μέσω του λογισμικού 3dfier (Πηγή: <https://github.com/tudelft3d/3dfier>)

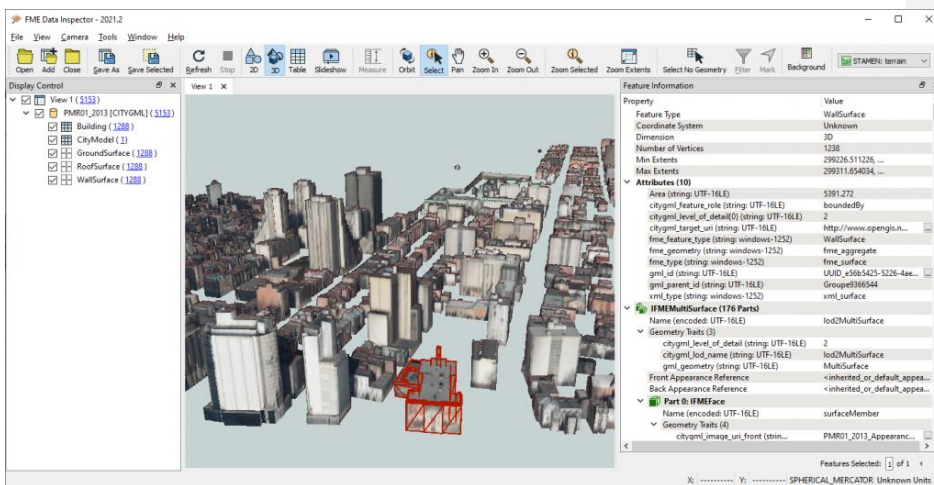
4.5.5 FME Inspector

Στην κατηγορία των εμπορικών λογισμικών ξεχωρίζει το Feature Manipulation Engine⁴⁶ (FME), ένα λογισμικό εξαγωγής, μετασχηματισμού και φόρτωσης (Extract, Transform, Load - ETL). Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο εργαλείο μετατροπής και μετάφρασης δεδομένων από μια μορφή σε άλλη, υποστηρίζοντας πληθώρα διαφορετικών μορφών αρχείων και λογισμικών (Εικόνα 36). Παρέχει πλήρη υποστήριξη σε σύνολα δεδομένων CityGML καθώς και σε επεκτάσεις ADE.

⁴⁵ <https://github.com/tudelft3d/3dfier>

⁴⁶ Safe Software, <https://www.safe.com/>

Προκειμένου να αναγνωρίσει το εισαγόμενο ADE, το FME διαβάζει το αρχείο XML εντοπίζοντας τις προδιαγραφές ή απαιτεί τη δήλωση του αρχείου σχήματος XSD προκειμένου να κάνει τη χαρτογράφηση του ADE και να είναι σε θέση να εξαχθεί το αρχείο CityGML. Επίσης ενσωματώνει το λογισμικό FME Data Inspector για θέαση των 3D μοντέλων, το οποίο του επιτρέπει να οπτικοποιεί τις πληροφορίες παράλληλα με τη διαδικασία μετατροπής (Biljecki κ.ά., 2018b; Lim κ.ά., 2020).



Εικόνα 36: Οπτικοποίηση 3D μοντέλου πόλης με χρήση του λογισμικού FME Inspector (Using CityGML to Work with Large-Scale 3D Data, Tiana Warner, February 1, 2022, <https://www.safe.com/blog/>)

4.5.6 3DCityDB

Η διαχείριση μεγάλου μεγέθους 3D μοντέλων σε πολλαπλά επίπεδα λεπτομερειών είναι δυνατή με την αξιοποίηση της βάσης δεδομένων 3DCityDB⁴⁷ (Agoub κ.ά., 2016; Yao & Kolbe, 2017), η οποία είναι ένα ελεύθερο πακέτο ανοιχτού λογισμικού που αποτελείται από ένα σχήμα βάσης δεδομένων και ένα σύνολο εργαλείων λογισμικού για την εισαγωγή, τη διαχείριση, την ανάλυση, την οπτικοποίηση και την εξαγωγή εικονικών 3D μοντέλων πόλης. Σύμφωνα με το πρότυπο CityGML (Εικόνα 37). Η 3DCityDB δεν υποστηρίζει πλήρως τις επεκτάσεις ADE. Είναι γεγονός ότι γίνονται προσπάθειες ανάπτυξης (Yao κ.ά., 2018; Yao & Kolbe, 2017) προκειμένου να καταστεί αποτελεσματική στη διαχείριση και υποστήριξη επεκτάσεων του CityGML αλλά προς το παρόν δεν υπάρχει μια καθολική

⁴⁷ <https://www.3dcitydb.org/3dcitydb/>

υποστήριξη επεκτάσεων μέσω κάποιου μηχανισμών αυτοματοποίησης. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν μεμονωμένες και ανεξάρτητες επεκτάσεις με ευρεία υποστήριξη και αποδοχή που υποστηρίζονται (EnergyADE, Dynamizer ADE και UtilityNetworkADE).

Εικόνα 37:3D σημασιολογικό μοντέλο του Βερολίνου. Περιλαμβάνει περίπου 550.000 κτιριακά αντικείμενα LoD2 με



χρήση της 3DCityDB. (Πηγή: <https://www.3dcitydb.org/3dcitydb/visualizationberlin/>)

Με σχόλια [am8]: Κείμενο πάνω κάτω από την εικόνα

4.6 Ανοιχτά θέματα CityGML

Το CityGML αναπτύχθηκε για να ορίσει ένα 3D μοντέλο πόλης που επιτρέπει την ανταλλαγή και την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών εφαρμογών (Biljecki κ.ά., 2016), διευκολύνει την οπτικοποίηση (Zucker κ.ά., 2016) και υποστηρίζει πολύπλοκη χωρική ανάλυση (K. Ohoi κ.ά., 2015). Είναι το πιο σημαντικό διεθνές πρότυπο που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση πόλεων και τοπίων σε 3D με εκτεταμένη σημασιολογία. Σε σύγκριση με τα πρότυπα BIM⁴⁸ (Chen & Luo, 2014) και IFC⁴⁹ (J. Zhang κ.ά., 2010), τα μοντέλα CityGML είναι συνήθως λιγότερο λεπτομερή αλλά καλύπτουν πολύ μεγαλύτερη χωρική έκταση (P. Tan, 2014). Επιπροσθέτως χρησιμεύει ως μορφή ανταλλαγής και ως πηγή δεδομένων για οπτικοποιήσεις σε εφαρμογές και πρόγραμμα περιήγησης ιστού (Fra κ.ά., 2017; P. Tan, 2014). Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για ένα ευρύ φάσμα χωρικών αναλύσεων όπως μελέτες ορατότητας και ηλιακό δυναμικό κλπ. (Agugiaro, 2016b; G. T. Kutzner κ.ά., 2017)

⁴⁸ BIM (Building Information Modelling). Αποτελεί μία ολοκληρωμένη ψηφιακή αναπαράσταση των φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών μιας υποδομής.

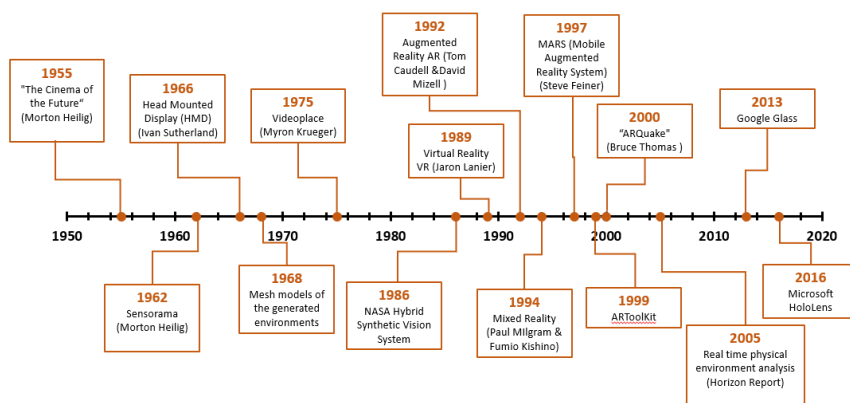
⁴⁹ IFC (Industry Foundation Classes). Είναι ένα πρότυπο που χρησιμοποιείται στον κατασκευαστικό και οικοδομικό κλάδο για την αποθήκευση και ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με ένα κατασκευαστικό έργο.

Αν και το πρότυπο παρουσιάζει μια σειρά από πλεονεκτήματα μειονεκτεί όσον αφορά την αποτελεσματική απεικόνιση 3D γεωμετριών και σημασιολογικών πληροφοριών, όπως και ο μηχανισμός οπτικοποίησης είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος (P. Tan, 2014). Μεταξύ άλλων ζητημάτων τα αρχεία εξόδου (XML) του προτύπου συχνά δε μπορούν να αναπαραχθούν απευθείας στις εφαρμογές περιήγησης ιστού λόγω μεγέθους και διαφόρων ασυμβατοτήτων (K. Ohori κ.ά., 2015). Οι βασικότερες προκλήσεις όμως του CityGML είναι μοντελοποίηση αντικειμένων και χαρακτηριστικών που δεν καλύπτονται στο μοντέλο δεδομένων του CityGML και η δυνατότητα προσθήκης νέων δυνατοτήτων και ιδιοτήτων, προκειμένου να αυξηθούν οι δυνατότητες μοντελοποίησης που προσφέρει το CityGML (Labetski κ.ά., 2018; Lim κ.ά., 2020; Nouvel, Kaden, κ.ά., 2015).

Κεφάλαιο 5, Επαυξημένη Πραγματικότητα (Augmented Reality -AR)

5.1 Εισαγωγή

Ο όρος «Επαυξημένη Πραγματικότητα» (Augmented Reality – AR) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά τη δεκαετία του '90 (Εικόνα 38) από τους Caudell και Mizell (Caudell & Mizell, 1992). Είναι μια τεχνολογία που τα επόμενα χρόνια αναμένεται να κυριαρχήσει σε διάφορους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας (Zhan κ.ά., 2020). Συνδυάζει τον πραγματικό κόσμο με τον ψηφιακό (Azuma, 1997). Η θέαση του περιβάλλοντος γίνεται μέσω φορητών συσκευών όπως smartphones, tablets ή με τη χρήση ειδικών μασκών (Headsets). Ο χρήστης βλέπει το πραγματικό κόσμο και παράλληλα προστίθεται ψηφιακό περιεχόμενο (Caudell & Mizell, 2003) με αυτόν τον τρόπο τα δύο είδη πληροφοριών (το φυσικό με το ψηφιακό) αλληλοσυμπληρώνονται, επιτυγχάνοντας τη βελτίωση της εμπειρίας (Milgram & Kishino, 1994).

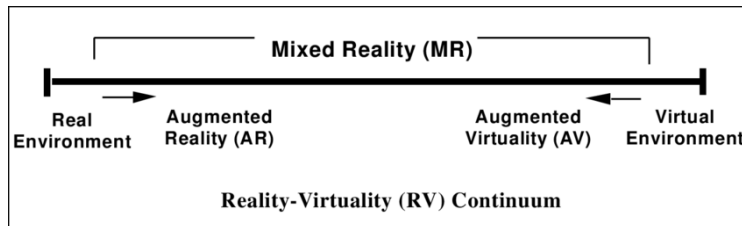


Εικόνα 38: Η ιστορία της Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR), (Πηγή: Ιδία εργασία)

5.2 AR vs VR

Σύμφωνα με τον Azuma (1997) η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) είναι παραλλαγή της εικονικής πραγματικότητας (VR). Η διαφορά τους συνίσταται στο γεγονός ότι στην τεχνολογία VR ο χρήστης αλληλοεπιδρά εξ ολοκλήρου μέσα σε ένα ψηφιακό-εικονικό περιβάλλον ενώ αντίθετα το AR επιτρέπει στον χρήστη να βλέπει τον πραγματικό κόσμο εμπλουτισμένο με εικονικά αντικείμενα (Zhan κ.ά., 2020). Κατά συνέπεια το AR συμπληρώνει την πραγματικότητα αντί να την υποκαθιστά (Εικόνα 39). Στόχος της επαυξημένης πραγματικότητας είναι ή απλούστευση και υποβοήθηση της εμπειρίας του χρήστη, παραθέτοντας εικονικές-ψηφιακές πληροφορίες στο περιβάλλον του (Arena κ.ά., 2022). Ως αποτέλεσμα της τεχνολογίας AR είναι η βελτίωση αντίληψης

και αλληλεπίδρασης του χρήστη με τον πραγματικό κόσμο (Azuma, 1997). Ο χρήστης της τεχνολογίας AR διατηρεί την επαφή με το κόσμο που τον περιβάλλει, ενώ κατά τη χρήση της τεχνολογίας VR "βυθίζεται" μέσα σε ένα ψηφιακό περιβάλλον που έχει δημιουργηθεί από ένα λογισμικό (Ashtari κ.ά., 2020).



Εικόνα 39: Το συνεχές της "εικονικότητας" όπως ορίστηκε από τους Miligram & Kishino (1994) (Πηγή: *A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays*, 1994)

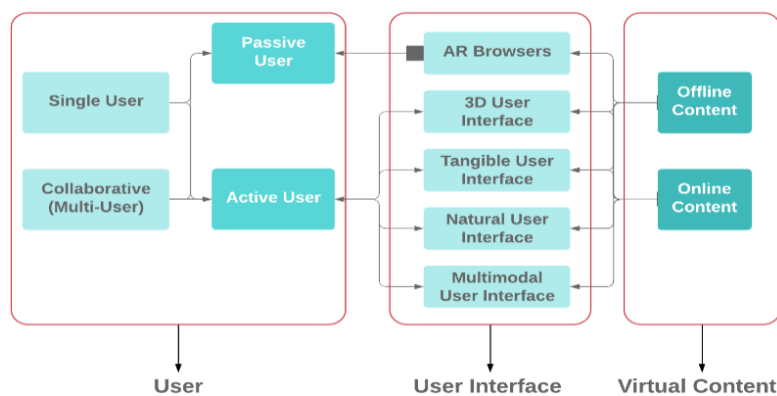
Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός του ότι η τεχνολογία AR έχει λιγότερες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ σε σχέση με την VR (Zhan κ.ά., 2020). Ο λόγος είναι ότι δεν απαιτείται η οπτικοποίηση ενός εκτεταμένου χώρου που θα αναπαριστά το περιβάλλον. Η απαίτηση για εμπλουτισμό της θέασης του φυσικού χώρου με ψηφιακό υλικό και γραφικά περιορίζεται σε στοχευμένα αντικείμενα και πληροφορίες.

Όσο αναφορά το λειτουργικό κομμάτι των δύο τεχνολογιών η εμπειρία θέασης ενός εικονικού κόσμου μέσω VR φαντάζει συναρπαστική μιας και όλη είναι αποτέλεσμα υπολογιστή. Στην πραγματικότητα όμως το αναπαριστώμενο περιβάλλον δεν έχει καμία σχέση με την πραγματικότητα και ενδεχομένως να οδηγήσει σε απώλεια της αίσθησης του πραγματικού χώρου και χρόνου (Ashtari κ.ά., 2020). Κατά συνέπεια η αξιοποίησή της από χρηστικές εφαρμογές υποβοήθησης του χρήστη παρουσιάζει προκλήσεις ενώ αντίθετως ενδείκνυνται για αυτές που αποσκοπούν στην αναψυχή και διασκέδαση του χρήστη (Mirzakhani κ.ά., 2010). Η τεχνολογία AR αναδεικνύει την αλληλεπίδραση ανθρώπου μηχανής (Azuma, 1997) αλλά είναι δυνατόν να εντείνει τη συνεργασία μεταξύ χρηστών και να ενισχύσει την αίσθηση αμεσότητας και αλληλεπίδρασης (Ghazwani & Smith, 2020).

5.3 Η τεχνολογία AR

Η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία που δεν έχει αξιοποιηθεί πλήρως. Βασική αιτία ήταν για πολλά χρόνια οι τεχνολογικοί περιορισμοί του υλικού, οι οποίοι τείνουν μειούμενοι στο πέραςμα του χρόνου (Ashtari κ.ά., 2020). Δεδομένου ότι η εμπειρία χρήστη παίζει σημαντικό ρόλο στην επιτυχία των νέων

τεχνολογιών, απαιτείται η ανάπτυξη κατάλληλων διεπαφών (Ghazwani & Smith, 2020). Όσο αναφορά την τεχνολογία AR η κατάλληλη διεπαφή χρήστη θα πρέπει να επιτρέπει στους τελικούς χρήστες να αλληλεπιδρούν διαισθητικά και απρόσκοπτα με το εικονικό περιεχόμενο. Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις υλοποίησης διεπαφών, ωστόσο σχεδόν στο σύνολο τους βρίσκονται σε ένα στάδιο ανάπτυξης και πειραματισμού. Αναπόφευκτα κάθε προσέγγιση φέρνει ένα ξεχωριστό σύνολο προκλήσεων που πρέπει να αντιμετωπιστεί (Εικόνα 40).

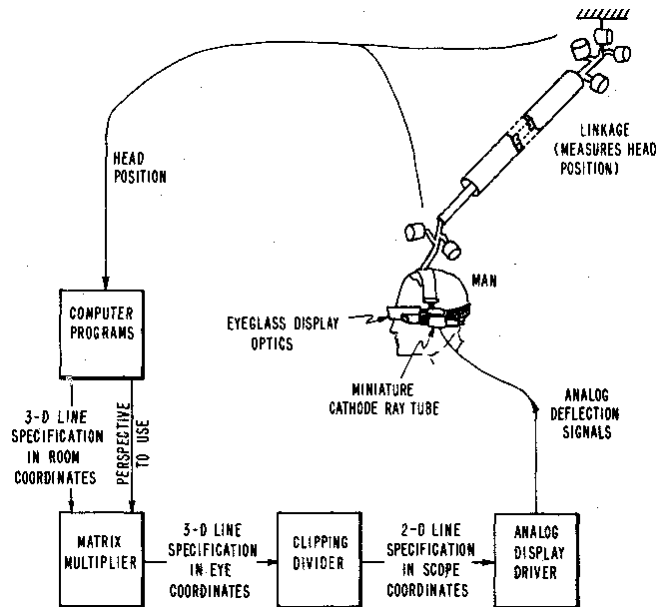


Εικόνα 40: Τα τρία κύρια στοιχεία αλληλεπίδρασης στα συστήματα AR ο χρήστης, η διεπαφή χρήστη και το εικονικό περιεχόμενο (Πηγή: Ghazwani & Smith, 2020).

5.3.1 Τα δομικά στοιχεία της τεχνολογίας AR

Τα βασικά στοιχεία που απαιτούνται για την κατασκευή ενός συστήματος επανζημένης πραγματικότητας έχουν παραμείνει τα ίδια από το πρωτοποριακό έργο του Sutherland⁵⁰ (Εικόνα 41) της δεκαετίας του 1960 (Peddie, 2017).

⁵⁰ Sutherland Ivan (1968)

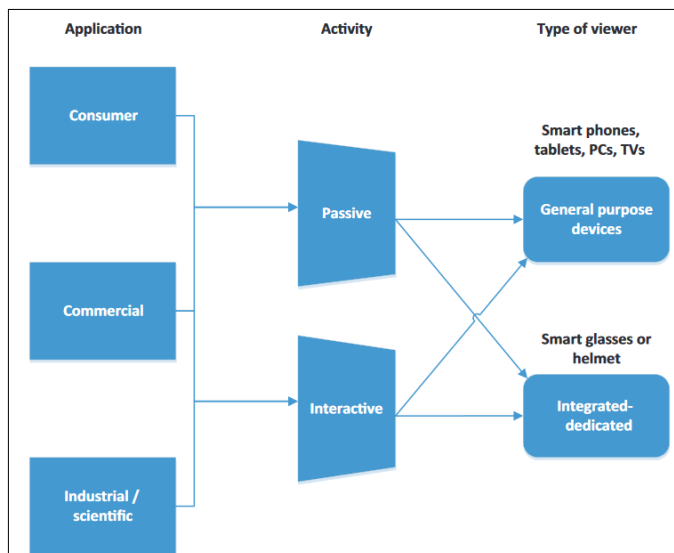


Εικόνα 41: Τα μέρη του συστήματος τρισδιάστατης απεικόνισης (Πηγή: Sutherland Ivan, 1968)

Ένα σύστημα AR αποτελείται από:

- Το σύστημα εισόδου
- Τους αισθητήρες
- Την υπολογιστική μονάδα
- Το λογισμικό γραφικών
- Το σύστημα εξόδου

Το σύστημα εισόδου είναι το μέσο που θα χρησιμοποιηθεί προκειμένου να γίνει η «αναγνώριση» του περιβάλλοντος όπως για παράδειγμα μία κάμερα. Για να προσδιοριστεί η θέση του χρήστη σε σχέση με τα αντικείμενα επαύξησης απαιτείται η ύπαρξη αισθητήρων ανίχνευσης (πχ. GPS, πυξίδα). Η επεξεργασία των δεδομένων λαμβάνει χώρα στον επεξεργαστή της συσκευής (γυαλιά, κράνη, HUD, κλπ.) με τη χρήση του κατάλληλου λογισμικού γραφικών και το αποτέλεσμα της επαύξησης της πραγματικότητας οπτικοποιείται στο σύστημα εξόδου δηλαδή στην οθόνη της συσκευής.



Εικόνα 42: Οι χρήσεις της τεχνολογίας AR και η αξιοποίηση διαφόρων συσκευών σε διαφορετικού είδους εφαρμογών (Πηγή: Augmented Reality, Where We Will All Live, Peddie 2017)

5.3.2 Οι κατηγορίες της τεχνολογίας AR

Η τεχνολογία AR διακρίνεται κατά κύριο λόγο σε δύο κύριες κατηγορίες: α) τεχνολογία AR που βασίζεται σε δείκτες και β) τεχνολογία AR χωρίς δείκτες (Jasche κ.ά., 2021).

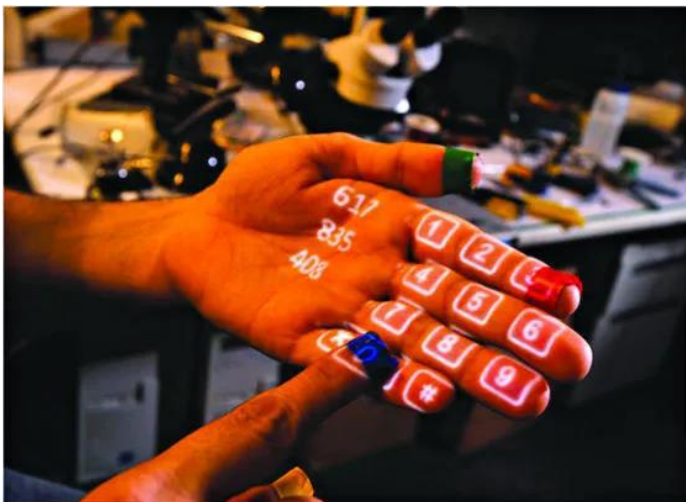
Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι πρώιμες εφαρμογές AR που χρησιμοποιούν εικόνες-στόχους (οπτικοί δείκτες)⁵¹ για να τοποθετήσουν αντικείμενα σε ένα δεδομένο χώρο. Οι δείκτες καθορίζουν πού θα τοποθετήσει η εφαρμογή το πρόσθετο ψηφιακό περιεχόμενο εντός του οπτικού πεδίου του χρήστη. Με άλλα λόγια γίνεται μια «σύνδεση» ενός φυσικού δείκτη με ένα εικονικό αντικείμενο. Η εμφάνιση του αντικειμένου (στην έξοδο της συσκευής πχ. οθόνη κινητού τηλεφώνου) επιτυγχάνεται όταν οι κάμερες της συσκευής -σαρώνοντας τον χώρο- «αναγνωρίσουν» το φυσικό αντικείμενο που έχει οριστεί σαν δείκτης για την εμφάνιση του ψηφιακού αντικειμένου. Σε περίπτωση που η κάμερα δεν εστιάσει σωστά το αντικείμενο δεν εμφανίζεται. Αυτός ο τύπος τεχνολογίας AR έχει ήδη εισαχθεί στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων καθώς αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι διαφόρων εφαρμογών

⁵¹ Σαν οπτικοί δείκτες χρησιμοποιούνται QR code, εικόνες ή μοτίβα.

κοινωνικών δικτύων όπως για παράδειγμα στο Instagram και το Snapchat (Datu κ.ά., 2015).

Η δεύτερη κατηγορία, χωρίς δείκτη, επιτρέπει σε εικονικά αντικείμενα να τοποθετούνται στο πραγματικό περιβάλλον και κατά συνέπεια στον οπτικό ορίζοντα του χρήστη, με βάση την επεξεργασία που υφίστανται χαρακτηριστικά και δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Για να επιτευχθεί η απαραίτητη εγγύτητα, προκειμένου να προβληθεί το εικονικό αντικείμενο, αξιοποιούνται οι αισθητήρες της συσκευής όπως η κάμερα, το GPS ή το επιταχυνσιόμετρο. Η τελική φάση της διαδικασίας ολοκληρώνεται με το λογισμικό AR που επιβεβαιώνει τα δεδομένα της επιχειρούμενης εγγύτητας και αναλαμβάνει την προβολή της επαυξημένης πληροφορίας στο οπτικό πεδίο του χρήστη. Στην πραγματικότητα υπάρχουν τέσσερις (4) κατηγορίες AR χωρίς δείκτη (Peddie, 2017):

- AR βάσει τοποθεσίας (Kyza & Georgiou, 2018).
- AR με χρήση προβολικών συστημάτων (Mine κ.ά., 2012).
- AR με τεχνολογία υπέρθεσης (Aggarwal & Singhal, 2019).
- AR βάσει περιγράμματος (Senanayake κ.ά., 2023).



Εικόνα 43: Προβολή ψηφιακού πληκτρολογίου και οθόνης με δυνατότητα αλληλεπίδρασης (Πηγή:

5.4 Εργαλεία ανάπτυξης εφαρμογών AR

Είναι γεγονός ότι στις μέρες μας υπάρχει μια πληθώρα ολοκληρωμένων εργαλείων ανάπτυξης εφαρμογών επαυξημένης πραγματικότητας. Ουσιαστικά ο τύπος του

λειτουργικού συστήματος καθορίζει το κατάλληλο εργαλείο υλοποίησης. Στην περίπτωση του λειτουργικού συστήματος Windows χρησιμοποιείται το Visual Studio. Οι εφαρμογές που τρέχουν σε Android δημιουργούνται μέσω της πλατφόρμας Android Development Studio ενώ στην περίπτωση του iOS χρησιμοποιείται η Swift⁵². Αν η πρόθεση είναι η δημιουργία εφαρμογών κατάλληλων για περισσότερα του ενός λειτουργικών συστημάτων αξιοποιούνται εργαλεία όπως η Unity⁵³ και η Unreal Engine⁵⁴, μέσω των οποίων μπορεί να γίνει επιλογή των πλαισίων και των αντίστοιχων εργαλείων υλοποίησης των εφαρμογών.

5.4.1 SDK's

Υπάρχουν ολοκληρωμένα κιτ ανάπτυξης λογισμικού (SDK's⁵⁵), δηλαδή συλλογές προγραμμάτων και εργαλείων λογισμικών για την ανάπτυξη εφαρμογών για διάφορες πλατφόρμες.

5.4.1.1 ARKit

Το ARKit⁵⁶ είναι η πλατφόρμα ανάπτυξης AR της Apple (Cervenak & Masek, 2019). Πρόκειται για μια σουίτα εργαλείων για τη δημιουργία εφαρμογών επαυξημένης πραγματικότητας για συσκευές iPhone και iPad. Συγκριτικό πλεονέκτημα είναι ότι έχει λιγότερες απαιτήσεις υλικού σε σχέση με τον μεγάλο του αντίπαλο το ARCore της Google (Nowacki & Woda, 2020). Το Apple ARKit παρέχει προσδιορισμό θέσης της συσκευής του χρήστη στο περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο. Για να γίνει αυτό αξιοποιεί την τεχνολογία VIO⁵⁷ (Visual Inertial Odometer) με δεδομένα από την κάμερα και τον αισθητήρα κίνησης της συσκευής (Oufqir κ.ά., 2020). Με τον τρόπο αυτό είναι εφικτή η αναγνώριση του περιβάλλοντος μέσω: α) κάθετων και οριζόντιων επιφανειών σε πραγματικό χρόνο, β) στατική 2D αναγνώριση εικόνων, γ) χρήση του αισθητήρα φωτεινότητας για να προσαρμόσει τη φωτεινότητα στο ψηφιακό αντικείμενο.

⁵² <https://www.swift.org/>

⁵³ Η Unity είναι η δημοφιλέστερη μηχανή παιχνιδιών, κατάλληλη για τη δημιουργία παιχνιδιών για τα σημαντικότερα λειτουργικά συστήματα υπολογιστών, κινητών και tablets (<https://unity.com/>).

⁵⁴ Το Unreal Engine είναι μηχανή παιχνιδιών για 3D γραφικών υπολογιστή που αναπτύχθηκε από την Epic Games (<https://www.unrealengine.com/en-US>).

⁵⁵ Software Development Kit

⁵⁶ Κυκλοφόρησε το 2017.

⁵⁷ Έχει χρησιμοποιηθεί σε μια μεγάλη ποικιλία ρομποτικών εφαρμογών και αφορά τη διαδικασία προσδιορισμού της θέσης και προσανατολισμού ενός ρομπότ με την ανάλυση των σχετικών εικόνων της κάμερας.

5.4.1.2 ARCore

Το ARCore⁵⁸ είναι η απάντηση της Google στο ARKit της Apple, δίνοντας στους προγραμματιστές ένα ισχυρό εργαλείο που τους βοηθά να δημιουργήσουν εμπειρίες επαυξημένης πραγματικότητας για τους χρήστες συσκευών Android (Oufqir κ.ά., 2020). Είναι αντιληπτό ότι η Google, έχοντας δεσπόζουσα θέση στην αγορά φορητών συσκευών που χρησιμοποιούν τις τεχνολογίες της (Android), έχει έναν πρωταγωνιστικό ρόλο στην καθιέρωση και στην εξέλιξη της τεχνολογίας AR. Χρησιμοποιεί τρεις βασικές λειτουργίες: την παρακολούθηση κίνησης, την περιβαλλοντική κατανόηση και την εκτίμηση φωτός για την τοποθέτηση ψηφιακών αντικειμένων στο πραγματικό περιβάλλον που φαίνεται από την κάμερα της συσκευής.

5.4.1.3 Vuforia

Πρόκειται ένα SDK ανάπτυξης λογισμικού για φορητές συσκευές που επιτρέπει τη δημιουργία εφαρμογών AR (Sarosa κ.ά., 2019). Είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη προσφέροντας μια σειρά από πλεονεκτήματα. Ένα από τα πιο σημαντικά είναι η δυνατότητα ανάπτυξης εφαρμογών ακόμα και από ανθρώπους οι οποίοι δεν έχουν γνώσεις προγραμματισμού. Προκειμένου να επιτευχθεί κάτι τέτοιο έχει αναπτυχθεί η διεπαφή Drag-and-Drop, η οποία διευκολύνει σημαντικά τις διαδικασίες ανάπτυξης εφαρμογών. Ακόμα υποστηρίζει τη τεχνολογία εκτεταμένης λειτουργίας ανίχνευσης (Extended Tracking) μέσω της οποίας είναι δυνατόν να εμφανίζεται το ψηφιακό περιεχόμενο στην οθόνη ακόμη και όταν η κάμερα απωλέσει κάποιον δείκτη (Xiao & Lifeng, 2014). Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι είναι συμβατή με Android, iOS, Windows και Unity (Sarosa κ.ά., 2019).

5.5 AR και χωρική πληροφορία

Όπως και στην περίπτωση της 3D μοντελοποίησης, όπου η εξέλιξη «επέβαλε» τον εμπλουτισμό των απεικονίσεων με την κατάλληλη γεωμετρία, τοπολογία αλλά και σημασιολογία, η ίδια απαίτηση υπήρξε και για τις εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας (OGC, 2019). Συνεπώς ήταν θέμα χρόνου η ενσωμάτωση χωρικής πληροφορίας στα προβαλλόμενα αντικείμενα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα λογισμικά ανταλλαγής, διαχείρισης και μετασχηματισμού δεδομένων, που αξιοποιούν τη δυνατότητα των συστημάτων AR να προσδώσουν προστιθέμενη αξία στην πληροφορία μέσω της ενσωμάτωσής της στο περιβάλλον (Tyler Mitchell, 2005). Βασικό πλεονέκτημα των λογισμικών αυτών είναι η τεχνογνωσία διαχείρισης μεγάλης

⁵⁸ Κυκλοφόρησε το 2018.

κλίμακας δεδομένων και ιδίως των γεωχωρικών δεδομένων. Διαθέτουν ισχυρά εργαλεία μετασχηματισμών και αυξημένη διαλειτουργικότητα (Anne-Kathrin Birkenbeul, 2020). Η γενική εικόνα με βάση τις διαθέσιμες λύσεις, με δυνατότητες οπτικοποίησης 3D χωρικών μοντέλων, είναι ότι λίγες και ιδιαίτερα εξειδικευμένες.

5.5.1 AR και συστήματα GIS

Μέχρι πρόσφατα η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) εξακολουθούσε να θεωρείται τεχνολογία που χρησιμοποιούνταν μόνο από ερευνητές στα εργαστήρια αλλά τώρα γίνεται όλο και πιο προσιτή στο ευρύ κοινό (Arena κ.ά., 2022). Παρά το γεγονός ότι η τεχνολογία AR είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο εντούτοις τα συστήματα GIS την υιοθετούν σταδιακά ως μέσο εννοιολόγησης της πραγματικότητας (Lonreglio & Kinatender, 2020; Stylianidis κ.ά., 2020).

Όσο αναφορά τη συσχέτιση των δύο τεχνολογιών υπάρχουν τρεις κύριες χρήσεις του GIS στο AR (Nicholls & Ist, 2013):

- α. Εύρεση τοποθεσίας: Οποιαδήποτε εφαρμογή AR πρέπει να «γνωρίζει» πού βρίσκεται ο χρήστης και πού να τοποθετήσει εικονικά αντικείμενα. Στις περισσότερες περιπτώσεις δε χρειάζονται πλήρεις δυνατότητες GIS. Αντίθετα, η εφαρμογή έχει πρόσβαση σε ένα GPS (παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης) για να εντοπίσει τοποθεσίες.
- β. Επίπεδα πληροφορίας: Μια εφαρμογή AR μπορεί να εμφανίσει χαρακτηριστικά που δεν είναι ορατά στον χρήστη, όπως υπόγειες υποδομές κοινής ωφελείας, όρια ιδιοκτησίας ή μελλοντικές κατασκευές. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να αποθηκευτούν ως επίπεδα χαρτών GIS στο διαδίκτυο και στη συνέχεια να εμφανιστούν στην εφαρμογή AR ως εικονικές επικαλύψεις που προβάλλονται στον πραγματικό κόσμο. Επιπλέον, ένας χρήστης θα μπορούσε να επιλέξει ένα εμφανιζόμενο στοιχείο και να προβάλει σχετικές πληροφορίες χαρακτηριστικών στο επίπεδο GIS. Για παράδειγμα ένας χρήστης θα μπορούσε να δει το υλικό κατασκευής, την ηλικία και τη λειτουργική κατάσταση ενός επιλεγμένου αγωγού νερού.
- γ. Πλοήγηση: Μια εφαρμογή AR μπορεί επίσης να βοηθήσει έναν χρήστη να φτάσει από το ένα σημείο στο άλλο, για παράδειγμα σε ένα εμπορικό κέντρο ή σε ένα νοσοκομείο. Η πλοήγηση θα μπορούσε να διευκολυνθεί με την εμφάνιση εικονικών δεικτών διαδρομής και βέλη στον πραγματικό κόσμο.

Σαν μια γενική περιγραφή της αλληλεπίδρασης των δύο τεχνολογιών θα περιγράφαμε την εξής σκηνή: «Όταν ο χρήστης ενεργοποιεί τη λειτουργία AR, η εφαρμογή χρησιμοποιεί την κάμερα για να δείξει τη θέση του χρήστη. Στη συνέχεια, η εφαρμογή τοποθετεί πολλαπλούς εικονικούς δείκτες στην οθόνη που αντιστοιχούν σε αντικείμενα και πληροφορίες που βρίσκονται σε αυτήν την κατεύθυνση και έχουν τοποθετηθεί στη σωστή θέση στο πεδίο μέσω ενός συστήματος GIS. Καθώς ο χρήστης μετακινεί ή περιστρέφει το τηλέφωνο για να αλλάξει την περιοχή προβολής, οι δείκτες αλλάζουν για να αντικατοπτρίζουν τις νέες θέσεις στην οπτική γωνία του χρήστη. Κάνοντας κλικ σε ένα δείκτη παρέχονται περισσότερες πληροφορίες (που περιέχονται στη βάση δεδομένων του GIS), συμπεριλαμβανομένων του ονόματος τοποθεσίας και της απόστασης από τον χρήστη.

Συνοψίζοντας θα λέγαμε ότι:

- Μέσω του GPS εντοπίζεται η τοποθεσία του χρήστη και οι θέσεις των κοντινών σημείων ενδιαφέροντος.
- Μέσω του GIS παρουσιάζεται το επίπεδο σημείων προβολή.
- Μέσω το GIS υποβοηθείται η πλοήγηση σε σημεία ενδιαφέροντος, παρουσιάζοντας την κατεύθυνση και την απόσταση.

Αν και η περιγραφή της διαδικασίας παρουσιάζει μια φαινομενικά απλή διαδικασία εν τούτοις το όλο εγχείρημα παρουσιάζει μια σειρά από προκλήσεις. Για παράδειγμα τα συστήματα GIS προς το παρόν δεν έχουν καταφέρει να υιοθετήσουν όλες τις δυνατότητες οπτικοποίησης αντικειμένων (Behzadan κ.ά., 2015; Dampage κ.ά., 2021). Μπορούν να εμφανίσουν σημειακές γεωμετρίες και να τις αντιστοιχήσουν με τρισδιάστατα αντικείμενα, όχι όμως και να οπτικοποιήσουν γραμμικά χαρακτηριστικά (Ismael Chivite, 2017). Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο πρέπει να πραγματοποιηθούν μια σειρά από μετασχηματισμούς που τα παραδοσιακά 3D GIS προς το παρόν αδυνατούν να πραγματοποιήσουν.

Οι περιορισμοί οπτικοποίησης πληροφοριών που έχουν ενσωματωθεί εντός ενός συστήματος GIS, επιχειρείται να ξεπεραστούν με την εφαρμογή AR οπτικοποίησης υποδομών κοινής ωφελείας στο Β' μέρος της διατριβής στο κεφάλαιο 8.

5.5.2 Εφαρμογές [AR στα GIS]

Μία από τις πρώτες προσπάθειες συνδυαστικής χρήσης των δύο τεχνολογιών (AR και GIS) ήταν η αξιοποίησή τους στην πλοήγηση (Bobrich & Otto, 2002; Rosman κ.ά., 2019). Αν και μέχρι σήμερα οι χάρτινοι χάρτες εξακολουθούν να θεωρούνται χρήσιμοι

Με σχόλια [am9]: Οι παρακάτω εφαρμογές δεν έχουν σχέση με τα GIS. Είναι γενικές. Υπάρχουν εφαρμογές AR & GIS, Στο scopus ψάξε για augmented reality + GIS+urban. Αν δεν έχεις πρόσβαση σε κάποιο άρθρο χρησιμοποίησε το sci-hub

Με σχόλια [AL10R9]: ok

με κύριο χαρακτηριστικό την ευκολία χρήσης και προσανατολισμού (Adithya κ.ά., 2010). Μέσω της τεχνολογίας AR είναι δυνατή η ψηφιακή παράθεση πληροφοριών πάνω σε χάρτες και η αύξηση της προσλαμβάνουσας πληροφορίας (Bobrich & Otto, 2002). Οι πληροφορίες μπορούν να παρασχεθούν σε πραγματικό χρόνο (Morrison κ.ά., 2009; Zhou κ.ά., 2020) βελτιώνοντας τη διαδραστικότητα σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς 2D χάρτες (Adithya κ.ά., 2010) .

Η τεχνολογία AR έχει αξιοποιηθεί και για εκπαιδευτικούς σκοπούς (Braun, 2003; Feiner κ.ά., 1997). Οι ανοιχτές βάσεις γεωγραφικών δεδομένων, οι γεωγραφικές τεχνολογίες και τα πολυμέσα που βασίζονται στο διαδίκτυο έχουν δημιουργήσει μια εξαιρετική ευκαιρία για χωρικές αναπαραστάσεις και χωρική αφήγηση (Kerski, 2015). Με χάρτες που βασίζονται σε AR η αφήγηση βιώνεται σε ένα περιβάλλον που περιλαμβάνει τοποθεσίες, γεγονότα και αντικείμενα (Zünd, 2016) και κατά συνέπεια αυξάνεται η αλληλεπίδραση με το περιγραφόμενο θέμα (Denitsa Savona, 2016). Οι Afrooz κ.ά. δημιούργησαν ένα εκπαιδευτικό περιβάλλον μάθησης για συστήματα μεταφορών και τουρισμού (Afrooz κ.ά., 2018). Η ενσωμάτωση της οπτικοποίησης στην εκπαιδευτική διαδικασία παρέχει θετικά αποτελέσματα (Gilbert, 2005; Naps κ.ά., 2003). Η οπτικοποίηση που παρέχεται από την AR δεν είναι μόνο χρήσιμη για την παρουσίαση μιας προσομοίωσης πραγματικών γεγονότων αλλά μπορεί επίσης να βελτιώσει τις δεξιότητες χωρικής σκέψης των μαθητών (Giorgis κ.ά., 2017; Kundu κ.ά., 2017).

Η τουριστική βιομηχανία θα μπορούσε να επωφεληθεί από την τεχνολογία AR (Cranmer κ.ά., 2020; Han κ.ά., 2013). Μέσω της τεχνολογίας AR είναι δυνατή η παροχή πολύτιμων πληροφοριών για διαφορετικά σημεία ενδιαφέροντος (POI) (Bednarczyk, 2017). Εκτός από τον προσδιορισμό θέσης ένα σύστημα GIS παρέχει δεδομένα και πληροφορίες που σχετίζονται με POI μέσω οπτικοακουστικών πληροφοριών για μια τοποθεσία ή μνημείο (Lin κ.ά., 2014). Κατευθύνοντας την κάμερα προς ένα συγκεκριμένο POI, οι σχετικές πληροφορίες ανακτώνται από μια βάση δεδομένων GIS και εμφανίζονται στη συσκευή του χρήστη. Το 2019 οι Sakamoto και Ishiba παρουσίασαν μια εφαρμογή πλοήγησης σε ζωολογικό κήπο, βασιζόμενη στην επεξεργασία εικόνας χωρίς δείκτες (Sakamoto & Ishida, 2019). Η προβολή πληροφοριών για το υποδεικνυόμενο ζώο γίνεται μέσω ενός webGIS που είναι σε θέση να αποθηκεύει και να διαχειρίζεται δεδομένα.

Μια ολοκληρωμένη λύση ARGIS προτείνεται από τους Fenais κ.ά. για χαρτογράφηση και συλλογή δεδομένων υπόγειων υποδομών κοινής ωφελείας (Fenais κ.ά., 2019) όπως και στη βελτίωση της διαδικασίας ανάκτησης πληροφοριών που σχετίζονται με αυτές (Kaddiou κ.ά., 2019). Μία ακόμη χρήση της τεχνολογίας AR αφορά τη χαρτογράφηση συστημάτων διαχείρισης έκτακτης ανάγκης (Luchetti κ.ά., 2017). Σε αυτά τα συστήματα το GIS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσει στη λήψη αποφάσεων. Ο Xu προτείνει μια εφαρμογή ARGIS ως εργαλείο προσδιορισμού θέσης αγωγών και καλωδίων εντός κτιρίων (Xu, 2008), ενώ οι X. Zhang κ.ά. δίνουν έμφαση στον εντοπισμό καλωδιώσεων στην τοιχοποιία (X. Zhang κ.ά., 2015). Οι Papadopoulou κ.ά. ανέπτυξαν μια εφαρμογή για την παρουσίαση χωροχρονικών αλλαγών απολιθωμένων δέντρων. Εμφανίζει τα χαρακτηριστικά τους και απεικονίζει τις χωροχρονικές αλλαγές τους (Papadopoulou κ.ά., 2020).

Τα τελευταία χρόνια η επιστήμη της μηχανικής έχει επιχειρήσει να αξιοποιήσει τη συνύπαρξη AR και GIS σε εφαρμογές ανάλυσης και προσομοίωσης (Chi κ.ά., 2013). Τομείς όπως η μηχανολογία (Kaufmann Meyer, 2008) των ηλεκτρονικών (Artetxe González κ.ά., 2016), ο χώρος της βιομηχανίας (Mei κ.ά., 2019) και ο κατασκευαστικός τομέας (Kwiattek κ.ά., 2019) έχουν να παρουσιάσουν εφαρμογές που αξιοποιούν τη συνύπαρξη των δύο τεχνολογιών. Η επιτόπου συλλογή δεδομένων μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση AR και να γίνουν μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση αισθητήρων (J. M. Huang κ.ά., 2015), όπως και η οπτικοποίηση διαφόρων συνόλων δεδομένων σε πραγματικά περιβάλλοντα (J. M. Huang κ.ά., 2015, 2017).

Το AR έχει μεγάλες δυνατότητες αξιοποίησης στο χώρο παιχνιδιών για φορητές συσκευές (Specht κ.ά., 2011). Αν και οι συσκευές αυτού του είδους έχουν περιορισμένη υπολογιστική ισχύ, διαθέτουν πληθώρα αισθητήρων που μπορούν να αξιοποιηθούν. Οι εφαρμογές AR μπορούν να χρησιμοποιούν πληροφορίες που ανακτώνται από αισθητήρες (GPS, πυξίδα, γυροσκόπιο κλπ.) (Barthold κ.ά., 2011). Ένα παράδειγμα χρήσης αυτών των δυνατοτήτων μπορεί να παρατηρηθεί σε εφαρμογές παιχνιδιών όπως το Pokémon GO (Morton, 1993) και το Kkongalmon (Youn κ.ά., 2019). Ωστόσο, λόγω των περιορισμών των σημάτων GPS η αξιοποίηση τους σε εσωτερικούς χώρους παρουσιάζει προκλήσεις (Huey κ.ά., 2011; Zafari κ.ά., 2019). Η τουριστική βιομηχανία επωφελείται σημαντικά από τη δυνατότητα αυτήν

(Özkul & Kumlu, 2019) και επιτρέπει στους τουρίστες να βιώσουν μια διασκεδαστική και διαδραστική εξερεύνηση σε άγνωστες τοποθεσίες (Han κ.ά., 2013).

Τέλος οι Ababsa κ.ά ανέπτυξαν μια πλατφόρμα για αξιοποίηση από τους γεωεπιστήμονες προκειμένου να τους παρέχει αλληλεπίδραση με το περιβάλλον εργασίας τους (Ababsa κ.ά., 2012). Το σύστημα χρησιμοποιεί υβριδικούς αισθητήρες όπως κάμερα, αισθητήρα αδράνειας και GPS για να εκτιμήσει τη στάση της κάμερας και στη συνέχεια, προβάλει τη σκηνή εμπλουτισμένη με ψηφιακό περιεχόμενο.



Εικόνα 44: Προβολή μέσω AR επίπλων στον χώρο του πελάτη με την εφαρμογή IKEA app (Πηγή:

B Μέρος – Ανάπτυξη εφαρμογών

Στο Β' Μέρος παρουσιάζονται οι τρεις (3) πρωτότυπες εφαρμογές, οι οποίες αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής στην προσπάθεια να απαντηθούν ερωτήματα και να επιλυθούν προβλήματα που διατυπώθηκαν με τη μορφή ερευνητικών ερωτημάτων στο Κεφάλαιο 1.

Η πρώτη εφαρμογή (Κεφάλαιο 6) αφορά μια μεθοδολογία δημιουργίας μαζικών δεδομένων για τη δημιουργία εκτεταμένων 3D αστικών κέντρων με περιοχή μελέτης το Κουκάκι. Ουσιαστικά πρόκειται για μια απάντηση στο μείζον πρόβλημα της εξεύρεσης δεδομένων για τις επιχειρούμενες 3D μοντελοποιήσεις.

Η δεύτερη εφαρμογή (Κεφάλαιο 7) παρουσιάζεται το GRextADE. Μία πρόταση επέκτασης (ADE) της τρέχουσας έκδοσης του προτύπου CityGML, προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες 3D σχεδιασμού του αστικού περιβάλλοντος για την περίπτωση της Ελλάδας.

Τέλος η τρίτη εφαρμογή (Κεφάλαιο 8) αφορά την αξιοποίηση της τεχνολογίας επαυξημένης πραγματικότητας (AR) προκειμένου να οπτικοποιηθεί η χωρική πληροφορία που έχει ενσωματωθεί στα 3D μοντέλα. Σαν αποτέλεσμα της έρευνας αυτής, παρουσιάζεται η δημιουργία ενός 3D μοντέλου υποδομών κοινής ωφελείας (δίκτυο ύδρευσης, αποχέτευσης και οπτικών ινών) για την περίπτωση του Δήμου Αγίου Ιωάννη Ρέντη.

Κεφάλαιο 6, Δημιουργία 3D δεδομένων από δυναμικούς διαδραστικούς χάρτες

6.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1 ανασταλτικός παράγοντας στην εξέλιξη της 3D μοντελοποίησης είναι η έλλειψη κατάλληλων δεδομένων. Ιδιαίτερα αν η επιχειρούμενη 3D μοντελοποίηση είναι εκτεταμένη.

Με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής επιχειρήθηκε να επιλυθεί το πρόβλημα της εξεύρεσης δεδομένων για τις επιχειρούμενες μοντελοποιήσεις. Διερευνήθηκαν οι δυνατότητες δημιουργίας και συλλογής μεγάλης κλίμακας δεδομένων (datasets) από δυναμικούς διαδικτυακούς χάρτες όπως το OpenStreetMap (OSM)⁵⁹, προκειμένου να αξιοποιηθούν στην 3D μοντελοποίηση αστικού χώρου από εφαρμογές ΓΣΠ (GIS) και την οπτικοποίηση τους από διαδικτυακές εφαρμογές (web applications).

6.2 3D Δεδομένα

Ένα από τα πρώτα προβλήματα που έπρεπε να αντιμετωπιστούν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής ήταν η έλλειψη δεδομένων στον Ελλαδικό χώρο (και όχι μόνο), ικανών να αξιοποιηθούν σε εκτεταμένη 3D μοντελοποίηση αστικού χώρου. Η ροή των επιχειρούμενων εργασιών αποσκοπεί στη δημιουργία 2D διανυσματικών πολυγώνων και την ανύψωση τους σε κατάλληλο ύψος προκειμένου να αποτελέσουν τη βάση δημιουργίας ενός 3D αστικού χώρου με δυνατότητες ενσωμάτωσης χωρικής ανάλυσης.

6.3 Αποτύπωση διεθνούς κατάστασης – Βιβλιογραφική έρευνα

Η πρόοδος που έχει συντελεστεί όσο αναφορά τη 3D αναπαράσταση του αστικού περιβάλλοντος είναι αξιοσημείωτη. Τα 3D μοντέλα πόλεων μπορούν να παραχθούν με μια ποικιλία τεχνικών και προσεγγίσεων (Toth & Józkow, 2016) που απαιτούν περισσότερη εργασία και συνεπάγονται μειωμένο βαθμό αυτοματισμού (Jokela, 2016).

Κοινός τόπος των αναπαραστάσεων είναι η ύπαρξη των κατάλληλων δεδομένων προκειμένου οι εφαρμογές οπτικοποίησης να εξάγουν τα μοντέλα. Βασικός στόχος των 3D οπτικοποιήσεων εκτεταμένων αστικών χώρων, μέσω διαφορετικών λογισμικών, είναι η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ομοιότητα των εξαχθέντων μοντέλων. Η επίτευξη ενός τελικού αποτελέσματος μοντελοποίησης, ανεξαρτήτως εφαρμογής υλοποίησης, προϋποθέτει την ύπαρξη ενός σωστά δομημένου συνόλου δεδομένων

⁵⁹ <https://www.openstreetmap.org/#map=19/37.97794/23.74115>

(datasets) που θα εισαχθεί στα λογισμικά μοντελοποίησης. Τα κατάλληλα δεδομένα για αυτού του είδους αναπαράστασης είναι δυσεύρετα και η πρόσβαση σ' αυτά είναι περιορισμένη.

Όσο αναφορά τη δημιουργία ή τη συλλογή κατάλληλων συνόλων δεδομένων, απαιτείται εξειδικευμένος υλικοτεχνικός εξοπλισμός (Boehm, κ.ά., 2016; Colomina & Molina, 2014; Tack κ.ά., 2012), ο οποίος όχι μόνο είναι δυσεύρετος και κοστοβόρος αλλά και η αξιοποίησή του προϋποθέτει εξειδικευμένες γνώσεις που αφορούν και διαφορετικά επιστημονικά πεδία.

Η πλειοψηφία των ερευνητών εργάζονται με σύνολα δεδομένων που παρέχουν οργανισμοί και εταιρίες με περιορισμούς πρόσβασης ή με δεδομένα που συλλέγουν μόνοι τους, αλλά στερούνται ευρύτητας (Elberink & Vosselman, 2009). Ο χώρος μελέτης των εκτεταμένων προσομοιώσεων και κυρίως των εκτάκτων γεγονότων που βασίζονται σε χωρική ανάλυση 3D μοντέλων είναι περιορισμένος εξαιτίας της έλλειψης διαθέσιμων δεδομένων που να ικανοποιούν τις απαιτήσεις μοντελοποίησης (Biljecki, Heuvelink, κ.ά., 2017). Ενώ τα 2D ίχνη είναι πλέον ευρέως διαθέσιμα ως ανοιχτά δεδομένα από κυβερνήσεις, ιδρύματα και εθελοντικές ομάδες γεωπληροφορικής (Agugiaro, 2016b; Hecht κ.ά., 2015b), τα 3D δεδομένων παραμένουν ακριβά και η συλλογή τους ιδιαίτερα χρονοβόρα (Valls κ.ά., 2014).

6.4 Πεδίο εφαρμογής

Στόχος της παρούσας προσέγγισης είναι η αυτοματοποίηση της διαδικασίας 3D απεικόνισης εκτεταμένης περιοχής αστικού περιβάλλοντος (Jokela, 2016) και την ενσωμάτωση σ' αυτή χωρικής πληροφορίας με δυνατότητες οπτικοποίησης από εφαρμογές GIS και Web Applications (Xiao & Lifeng, 2014). Η υλοποίηση του εγχειρήματος επιτεύχθηκε χωρίς την ύπαρξη εξειδικευμένων δεδομένων (αεροφωτογραφίες, σάρωση LiDAR, πολεοδομικούς-τοπογραφικούς χάρτες, CAD σχέδια κλπ.).

Σαν περιοχή μελέτης επιλέχτηκε το Κουκάκι, μια περιοχή με κύριο χαρακτηριστικό τις πολυώροφες πολυκατοικίες και την πυκνή δόμηση. Το Κουκάκι έχει βρεθεί στο επίκεντρο των αλλαγών που έχουν επιφέρει οι πλατφόρμες βραχυχρόνιας μίσθωσης. Αξιοσημείωτο είναι η μεγάλη διακύμανση στις τιμές αλλά και αλλαγή χρήσης ακινήτων και μετασκευής κτηρίων γραφείων σε ενοικιαζόμενα διαμερίσματα, τάση κυρίαρχη σε μεγάλα αστικά κέντρα τα τελευταία χρόνια.

6.5 Λογισμικά

Προκειμένου να καταστεί όσο το δυνατόν ευκολότερη η πρόσβαση από ερευνητές στην υπό μοντελοποίηση διαδικασία επιλέχθηκε η λύση των εφαρμογών ανοιχτού κώδικα (open source). Για την ακρίβεια χρησιμοποιήθηκαν οι χάρτες του OSM και σαν εφαρμογή ΓΣΠ (GIS) το Qgis 3.4 . Όσο αναφορά το QGIS εγκαταστάθηκαν τα πρόσθετα στοιχεία QuickOSM για τη λήψη διανυσματικών δεδομένων από το OSM και το Qgis2threejs για τη μετατροπή των 2D επιφανειών σε 3D με την απαραίτητη στατιστική πληροφορία που είχαμε εισάγει στο μοντέλο. Το πρόσθετο Qgis2threejs χρησιμοποιήθηκε και για την εξαγωγή του υπό μελέτη μοντέλου σε διαδραστική μορφή κατάλληλη για θέαση και προσομοίωση από περιβάλλον φυλλομετρητή (browser)⁶⁰. Τέλος για την προβολή του αποτελέσματος από web browsers εγκαταστάθηκε τοπικά ο Apache HTTP Server 2.4.4 .

6.6 Μεθοδολογία

Δομικό στοιχείο της μοντελοποίησης είναι τα 2D ίχνη κτιρίων – footprints (Fan κ.ά., 2016; Hecht κ.ά., 2013) τα οποία αντιστοιχούν σε επίπεδο λεπτομέρειας LOD0 (Εικόνα 45). Πρόκειται για απεικόνιση του μοντέλου του εδάφους σε 2,5 διαστάσεις. Αφορά το χαμηλότερο μοντέλο αναγλύφου, πάνω στο οποίο μπορεί να προσαρμοστεί ένας χάρτης ή μια αεροφωτογραφία και με το επίπεδο αυτό απεικονίζεται ένα τοπίο. Αυτού του είδους η πληροφορία υπάρχει σε όλους τους διαθέσιμους διαδραστικούς διαδικτυακούς χάρτες, OpenStreetMap, Google Earth, Bing (Εικόνα 46). Στην εξέλιξη της διαδικασίας τα διαθέσιμα μοντέλα θα αναβαθμιστούν σε επίπεδο λεπτομέρειας LOD1, δηλαδή θα αναπαρίστανται σαν πρίσματα με επίπεδες στέγες, χωρίς δομή σε αυτές. Αυτό το επίπεδο λεπτομέρειας χρησιμοποιείται συνήθως για την απεικόνιση μίας πόλης (Wróżyński κ.ά., 2016; Perez κ.ά., 2013).



Εικόνα 45: Τα πέντε επίπεδα λεπτομέρειας LODs του CityGML 2.0. (Πηγή: Geo Connection International Magazine, 2015)



Εικόνα 46: Ίχνη κτιρίων LOD0 (Πηγή: OpenStreetMap)

⁶⁰ Με την ίδια διαδικασία μπορεί να εξαχθεί και για φορητές (mobile) συσκευές.

Το πρώτο βήμα υλοποίησης είναι η εξεύρεση και λήψη διαθέσιμων 2D ιχνών κτιρίων με το πρόσθετο QuickOSM του Qgis. Το πλεονέκτημα της χρήσης του συγκεκριμένου εργαλείου είναι η πληθώρα των επιλέξιμων στοιχείων λήψης (κτίρια, δρόμοι, βλάστηση, χρήσης γης κλπ.) σε διαφορετικά επίπεδα (layers) είτε σαν αρχείο XML είτε με απευθείας λήψη από το OpenStreetMap API. Επιτρέπει επίσης την επεξεργασία των δεδομένων και τη μεταφόρτωση τους στο OSM. Αφού γίνει η λήψη των επιλεγόμενων δεδομένων, εισάγονται εντός του Qgis προκειμένου να δημιουργηθούν τα επίπεδα (layers) με τα αντίστοιχα διανυσματικά στοιχεία. Στην περίπτωση που δεν είναι εφικτή η λήψη σε διανυσματική μορφή κάποιων στοιχείων η εφαρμογές GIS μάς δίνουν τη δυνατότητα να ψηφιοποιήσουμε το ίχνος και να δημιουργήσουμε το αντίστοιχο πολύγωνο. Η διαδικασία μετατροπής του επιφανειακού αντικειμένου σε διανυσματική μορφή πραγματοποιείται καθορίζοντας τις θέσεις των σημείων που αποτελούν τις κορυφές ενός πολυγώνου (Mandel κ.ά., 2016).

Αν επιχειρήσουμε να χρησιμοποιήσουμε κάποιες από τις ειδικές επεκτάσεις (extensions) των εφαρμογών GIS για να κάνουμε απευθείας λήψη 3D μοντέλων κτιρίων από τους διαθέσιμους ηλεκτρονικούς χάρτες, θα διαπιστώσουμε ότι μόνο ένα μικρό μέρος των χαρτών αυτών υποστηρίζουν 3D απεικόνιση και τη λήψη της. Επιπλέον υπάρχουν περιορισμοί όσο αναφορά την έκταση των δεδομένων λήψης που επιχειρούμε. Ακόμα και οι εμπορικές εφαρμογές στην πραγματικότητα κάνουν λήψη των ίδιων δεδομένων με τους ίδιους σχεδόν περιορισμούς. Εν αντιθέσει η πρόσβαση σε 2D διανυσματικά δεδομένα είναι ελεύθερη. Κάνοντας λήψη των δεδομένων της περιοχής που θέλουμε σε 2D διανυσματικά πολύγωνα αυτά εμπεριέχουν την απαραίτητη γεωγραφική πληροφορία για να εισαχθούν και να προβληθούν στα συστήματα GIS (Εικόνα 47).



Εικόνα 47: Η περιοχή του Κουκακίου με 2D διανυσματικά πολύγωνα, με υπόβαθρο και χωρίς υπόβαθρο χάρτη (Qgis) (Πηγή: Ιδία εργασία)

Στη συνέχεια θα επιχειρήσουμε την ανύψωση των πολυγώνων, στο κατάλληλο ύψος που θα αντιπροσωπεύει το πραγματικό ύψος των κτιρίων. Η επιλογή της ανύψωσης μετατρέπει τα 2D μοντέλα (LOD0) σε 3D ογκομετρικά μοντέλα (LOD1). Η διαδικασία εύρεσης του ύψους επιχειρείται με δύο τρόπους: εντοπισμός αριθμού ορόφων κτιρίου και χρήση τοπικών κανονισμών (Sathish Kumar κ.ά., 2013).

1. Χρήση αριθμού ορόφων

Στα δεδομένα που κάνουμε λήψη (κυρίως από το OSM) υπάρχουν διάφορες πρόσθετες πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί με εθελοντική πρωτοβουλία χρηστών⁶¹ (Basiouka κ.ά., 2015). Οι πληροφορίες όπως διεύθυνση, είδος χρήσης, όροφοι, κατάσταση κτιρίου κλπ. συμπεριλαμβάνονται στους πίνακες χαρακτηριστικών (Εικόνα 48).

full_id	osm_id	osm_type	addr_city	addr_count	addr_house	addr_postc	addr_stree	building	building_l	condition	addr_h
11 w264923000	264923000	way	Αθήνα		3	11742	Παρθενώνος	apartments	5	good	
12 w264923007	264923007	way	Αθήνα		6	11742	Ερμού	apartments	5	good	
13 w264923313	264923313	way	Αθήνα		3-5-7	11742	Πεντηθ.	apartments	4	good	
14 w264923575	264923575	way	Αθήνα		12	11742	Ερμού	apartments	4	good	
15 w264923576	264923576	way	Αθήνα		10	11742	Ερμού	apartments	4	good	
16 w264923577	264923577	way	Αθήνα		8	11742	Ερμού	apartments	4	good	
17 w274618703	274618703	way	Αθήνα		3	11742	Τσίμη Καρατά...	apartments	4	good	

Εικόνα 48: Διαθέσιμες πληροφορίες ληφθέντων δεδομένων (Πηγή: OpenStreetMap)

⁶¹ Οι εθελοντικές γεωγραφικές πληροφορίες έχουν εισβάλει σε πολλές εφαρμογές παγκοσμίως (VGI- Volunteered Geographic Information).

Ζητούμενο είναι η συμπλήρωση των ελλειπών στοιχείων που έχουμε λάβει από το OSM με τον αριθμό ορόφων των κτιρίων. Στη συνέχεια θα μετατρέψουμε τον αριθμό των ορόφων (Α.Ο.) σε ύψος κτιρίου (Υ.Κ.).

Μια συνήθης πρακτική προσδιορισμού ύψους κτιρίου (Υ.Κ.) στη διεθνή βιβλιογραφία είναι η παραδοχή ύψους ορόφου (ΥΟ) σε 2.8-3.5 μέτρα (Sugihara & Shen, 2016; Biljecki, 2017; Coors, 2003b). Για τα ελληνικά δεδομένα υπολογίζοντας και την τοιχοποιία τα 3 μέτρα είναι αρκούντως αντιπροσωπευτικά. Πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό ορόφων (Α.Ο.) με 3 μέτρα έχουμε κατά προσέγγιση το ύψος του κτιρίου (Υ.Κ.).

$$(1) \quad Y.K. = A.O. \times 3 \text{ μέτρα}$$

Αν δεν υπάρχει η διαθέσιμη πληροφορία για τον αριθμό των ορόφων μπορούμε να την υπολογίσουμε προσεγγιστικά χρησιμοποιώντας μια εφαρμογή όπως το Street View. Επιλέγοντας να πλοηγηθούμε εντός των δυναμικών διαδικτυακών χαρτών μπορούμε να καταγράψουμε τον αριθμό των ορόφων των πολυκατοικιών από τις διαθέσιμες φωτογραφίες. Επιστρέφοντας στο προηγούμενο βήμα (1) μπορούμε να έχουμε το ύψος κτιρίων.

2. Χρήση τοπικών κανονισμών

Η προαναφερθείσα διαδικασία είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα όταν καλούμαστε να καλύψουμε εκτεταμένη περιοχή. Σ' αυτή την περίπτωση μπορούμε να καταφύγουμε σε χρήση τοπικών κανονισμών δόμησης. Γνωρίζοντας το μέγιστο επιτρεπόμενο ύψος δόμησης (Μ.Ε.Υ.) έχουμε το ύψος των κτιρίων ή αν η βάση μας περιέχει ήδη για κάποια κτίρια τον αριθμό των ορόφων (Α.Ο.), διαιρούμε το μέγιστο επιτρεπόμενο ύψος (Μ.Ε.Υ.) με τα 3 μέτρα προκειμένου να προσδιορίσουμε τον αριθμό ορόφων (Α.Ο.) και να ενημερώσουμε τη βάση δεδομένων. Δουλεύοντας με τους τοπικούς πολεοδομικούς κανόνες είμαστε σε θέση να δημιουργήσουμε ένα 3D αστικό περιβάλλον από οικοπέδα, διαδικασία ιδιαίτερα χρήσιμη στη δημιουργία προσομοιώσεων. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι γνωρίζοντας τους συντελεστές δόμησης (Σ.Δ.) μπορούμε να προσδιορίσουμε τις κατασκευές σε επίπεδο λεπτομέρειας LOD1. Προσδιορίζουμε το εμβαδό του οικοπέδου (Ε.Ο.) ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία:

- i. Ανοίγουμε τον πίνακα χαρακτηριστικών (attribute table), χρησιμοποιώντας το εργαλείο “Open field calculator”
- ii. Ενεργοποιούμε τη δυνατότητα “Field calculator” και δημιουργούμε ένα επιπλέον πεδίο “area” στον υπάρχοντα πίνακα για να υπολογιστεί το εμβαδό.
- iii. Τέλος επιλέγουμε το “\$area” στα “Expressions”, προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός επιφάνειας του πολυγώνου, που αντιστοιχεί στο εμβαδό του οικοπέδου (E.O.). Το αποτέλεσμα για κάθε πολύγωνο εισάγεται στο πεδίο area που δημιουργήσαμε νωρίτερα.

Με τον συντελεστή κάλυψης (Σ.Κ.) και δόμησης (Σ.Δ.) προσδιορίζουμε, α) το ίχνος της κάλυψης (ΙΚ) του οικοπέδου αλλά προσεγγιστικά και το εμβαδό των ορόφων (E.OP.), β) τα δομήσιμα τετραγωνικά (ΔΤ),

$$(2) \quad \Sigma.K. \times E.O. = I.K. \approx E.OP.$$

$$(3) \quad \Delta.T. = E.O. \times \Sigma.\Delta.$$

Στη συνέχεια μπορούμε να προσδιορίσουμε τον αριθμό των ορόφων (Α.Ο.)

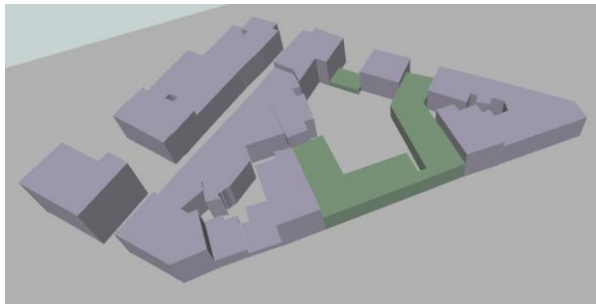
$$(4) \quad \Delta.T. \div E.OP. \approx A.O.$$

και επιβεβαιώνουμε τους υπολογισμούς με τον πίνακα μέγιστου επιτρεπόμενου ύψος κτιρίων της περιοχής ενδιαφέροντος (Πίνακας 5).

Πίνακας 5: Μέγιστο επιτρεπόμενο ύψος κτιρίου συναρτήσει του συντελεστή δόμησης της περιοχής (Πηγή: Νέος Οικοδομικός Κανονισμός, <http://www.opengov.gr/minenv>)

Συντελεστής δόμησης(ΣΔ)	Ύψος
έως 0,4	10,75μ.
έως 0,8	14,00μ.
έως 1,2	17,25μ.
έως 1,6	19,50μ.
έως 2,0	22,75μ.
έως 2,4	26,00μ.
2,4 και άνω	ΣΔ*10μ. με μέγιστο ύψος 32,00μ.

Έχοντας αποτυπώσει την περιοχή μελέτης σε 2D διανυσματικά πολύγωνα τα “εξωθούμε”⁶² κατ’ ύψος με βάση την πληροφορία που έχουμε (αριθμός ορόφων ή ύψος κτιρίου). Η ολοκλήρωση της διαδικασίας ανύψωσης μας παρουσιάζει εντός της εφαρμογής Qgis μία 3D απεικόνιση της περιοχής μελέτης (Εικόνα 49). Η απεικόνιση θα μπορούσε να αφορά οτιδήποτε έχουμε εισάγει με διανυσματική μορφή εντός της εφαρμογής, κτίρια, δρόμους, χρήση γης κλπ.



Εικόνα 49: 3D απεικόνιση κτιρίων γειτονιάς στο Κουκάκι μετά την ανύψωση κατ’ ύψος από 2D (Πηγή: Ιδία εργασία)

Για να μπορεί να γίνει οπτικοποίηση και ανάλυση του αποτελέσματος (μέσω προσομοίωσης) θα πρέπει να εξαχθεί το μοντέλο σε κατάλληλη μορφή για το εκάστοτε εργαλείο. Στην περίπτωση μας επιλέξαμε να οπτικοποιηθεί το αποτέλεσμα για χρήση μέσω του περιβάλλοντος ενός web browser. Έχοντας εγκαταστήσει το πρόσθετο “Qgis2threejs” μπορούμε να επιλέξουμε τα στοιχεία και τα χαρακτηριστικά που θέλουμε να εξάγουμε:

1. Τα επίπεδα (layers) που περιέχουν τα 3D μοντέλα (καταστήματα, μονοκατοικίες, πολυκατοικίες, ξενοδοχεία κλπ.).
2. Τον χάρτη υπόβαθρου.
3. Τη χωρική ανάλυση που έχουμε εισάγει στους πίνακες (κατοικίες διαθέσιμες προς ενοίκιαση ή πώληση, παλαιότητα κτισμάτων, ενεργειακές απώλειες, διαμερίσματα διαθέσιμα για Airbnb κλπ.).

Ολοκληρώνοντας τη διαδικασία παραμετροποίησης του αρχείου εξόδου δηλώνουμε την επιθυμητή χρήση (web browser για την περίπτωση μελέτης μας).

⁶² Η λειτουργία ανύψωσης είναι διαθέσιμη σε όλα τα εργαλεία ΓΣΠ (GIS).

Κατασκευάζουμε με τη βοήθεια του Qgis2threejs το περιεχόμενο html για προβολή μέσω οποιουδήποτε φυλλομετρητή (Εικόνα 50).

Για να μπορέσουμε όμως να προβάλουμε την ιστοσελίδα μας με το διαδραστικό 3D μοντέλο θα πρέπει να γίνει μεταφόρτωση (uploading) των αρχείων σε κάποιον web

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
<meta charset="UTF-8">
<title>index</title>
<meta name="viewport" content="width=device-width, user-scalable=no, minimum-scale=1.0, maximum-scale=1.0">
<link rel="stylesheet" type="text/css" href="./Qgis2threejs.css">
<link rel="stylesheet" type="text/css" href="./mobile.css">
<script defer src="./fontawesome/solid.min.js"></script>
<script defer src="./fontawesome/fontawesome.min.js"></script>
<script src="./threejs/three.min.js"></script>
<script src="./threejs/OrbitControls.js"></script>
<script src="./threejs/DeviceOrientationControls.js"></script>
<script src="./proj4js/proj4.js"></script>
<script src="./Qgis2threejs.js"></script>
<script src="./mobile.js"></script>
</head>
<body>

<video id="video" autoplay></video>
<div id="view">
  <div id="labels"></div>
  <div id="northarrow"></div>
</div>
```

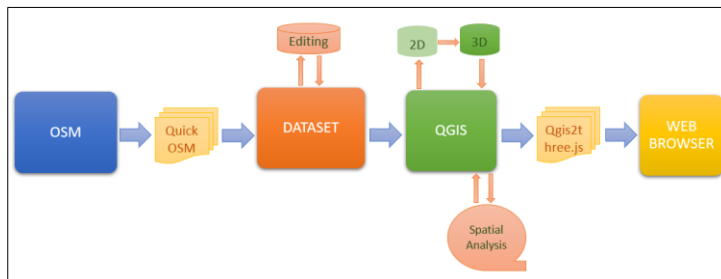
Εικόνα 50: Απόσπασμα από τον html κώδικα (Πηγή: Ιδία εργασία)

server ή να εγκαταστήσουμε κάποιον server τοπικά στον υπολογιστή μας⁶³. Επιλέχθηκε η εγκατάσταση του Apache HTTP Server 2.4.4 προκειμένου να μπορέσει ο φυλλομετρητής να προβάλει το περιεχόμενο της ιστοσελίδας που δημιουργήσαμε⁶⁴.

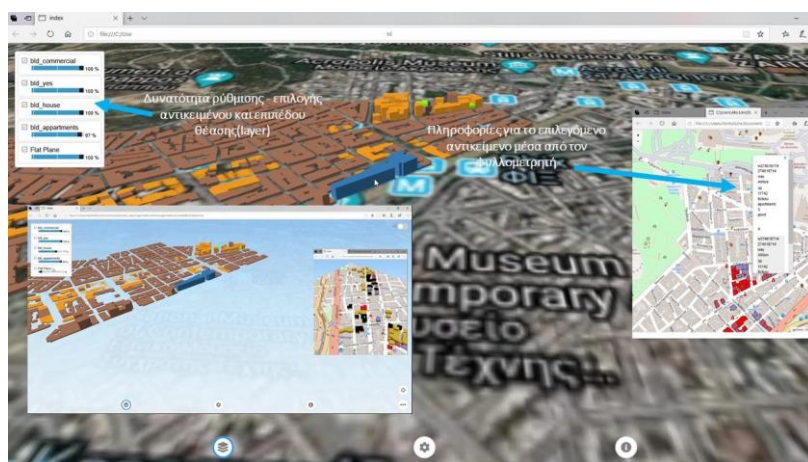
Η διασώληνωση (pipeline) των εργασιών της μοντελοποίησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 51. Αναμφίβολα, κρίσιμο τμήμα του όλου εγχειρήματος θα χαρακτηρίζαμε τη δημιουργία και κανονικοποίηση του σετ δεδομένων (dataset). Πάνω σ' αυτό στηρίζεται όλη η υλοποίηση. Στη συνέχεια τα δεδομένα εισάγονται στο Qgis, μετατρέπονται σε 3D αντικείμενα, ενσωματώνουμε χωρική πληροφορία και την αναπαριστούμε μέσω της 3D απεικόνισης. Τέλος με τη βοήθεια των προσθέτων δημιουργούμε και εξάγουμε το αποτέλεσμα για οπτικοποίηση από οποιονδήποτε φυλλομετρητή-web browser (Εικόνα 52).

⁶³ <http://localhost/foldername/index.html>

⁶⁴ Για την χρήση του apache server προτείνεται η εγκατάσταση ενός τοπικού server όπως είναι το xampp ή το wamp



Εικόνα 51: Η Διασολήγηση (pipeline) των εργασιών (Πηγή: Ιδία εργασία)



Εικόνα 52: Το διαδραστικό 3D μοντέλο μέσα από τον Edge browser (Πηγή: Ιδία εργασία)

6.7 Πεδία εφαρμογής

Όπως αναφέρθηκε στην Εισαγωγή της παρούσης διατριβής τα δεδομένα για 3D μοντελοποίηση και αναπαράσταση αστικού χώρου είναι δυσεύρετα. Κατά συνέπεια η ύπαρξη ενός εναλλακτικού μοντέλου δημιουργίας συνόλων δεδομένων (datasets) θα διευκόλυνε την έρευνα σε πεδία που απαιτούσαν εκτεταμένη προσομοίωση χωρικής ανάλυσης 3D μοντέλων σε αστικό χώρο. Για παράδειγμα θα ήταν εφικτή:

- i. Η προσομοίωση με χρήση 3D μοντέλων, της φωτιάς και της καταστροφής στο Μάτι Αττικής.
- ii. Ο υπολογισμός και η οπτικοποίηση του αστικού ιστού με χρήση του διαθέσιμου Συντελεστή Δόμησης στον Δήμο Αθηναίων.
- iii. Η καταγραφή της μελλοντικής ηχορύπανσης στον αστικό ιστό που θα δημιουργηθεί στην υπό ανέγερση περιοχή του Ελληνικού.

Ερευνητές, ιδρύματα ή εταιρείες θα μπορούσαν να μελετήσουν και να αναπτύξουν εφαρμογές για τομείς που αφορούν:

1. Σχεδιασμό αστικού χώρου.
2. Εμπορική δραστηριότητα της πόλης.
3. Πρόληψη και αντιμετώπιση καταστροφών.
4. Προμήθεια ενέργειας και ενεργειακό σχεδιασμό.
5. Διαχείριση εκδηλώσεων.
6. Περιβαλλοντική διαχείριση.
7. Αγορά ακινήτων.
8. Μεταφορές και Πλοήγηση.
9. Διαχείριση κυκλοφορίας.

6.8 Παρατηρήσεις και σχολιασμός

Η επιχειρούμενη μεθοδολογία αξιολογείται αναλυτικά στο κεφάλαιο συμπερασμάτων. Σαν γενικό σχόλιο όσο αναφορά τα προσδοκόμενα αποτελέσματα θα επισημαίναμε συνοπτικά:

- Η μεθοδολογία 3D μοντελοποίησης μέσω δεδομένων από διαδραστικούς διαδικτυακούς χάρτες είχε σαν αποτέλεσμα την ικανοποιητική μοντελοποίηση μιας περιοχής του Δήμου Αθηναίων.
- Η επιθυμητή αυτοματοποιημένη διαδικασία επιτεύχθηκε εν μέρη. Βασικό εμπόδιο αποτέλεσε η φύση των λογισμικών και η χαμηλή διαλειτουργικότητά τους.
- Το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης κινήθηκε εντός των αποδεκτών πλαισίων που έχουν περιγραφεί στη διεθνή βιβλιογραφία .
- Η διαδικασία μοντελοποίησης παραμένει αρκετά σύνθετη εξαιτίας της εμπλοκής διαφορετικών λογισμικών.
- Η πλήρης αξιολόγηση της διαδικασίας θα πρέπει να γίνει στο πεδίο με χρήση εφαρμογών που θα αξιοποιούν την υπό εξέταση μεθοδολογία.

Κεφάλαιο 7, GRextADE – Η επέκταση του CityGML

7.1 Σχετικές εργασίες- αποτύπωση κατάστασης στην Ελλάδα

Η 3D μοντελοποίηση ενός αστικού περιβάλλοντος είναι μια σύνθετη εργασία. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η συνέπεια των 3D μοντέλων είναι επιβεβλημένη η χρήση ενός προτύπου, δηλαδή υιοθέτηση κοινών πρακτικών και κανόνων μοντελοποίησης. Η δεσμευτικότητα που επιφέρει κατά την 3D υλοποίηση ένα πρότυπο, αντισταθμίζεται από την αύξηση της διαλειτουργικότητας, τη δυνατότητα επεκτασιμότητας και κατά συνέπεια των πιθανοτήτων βιωσιμότητας που εξασφαλίζει στο μοντέλο.

7.1.1 Δημιουργία εθνικών προτύπων 3D μοντελοποίησης

Η υιοθέτηση ενός εθνικού προτύπου διασφαλίζει τη συνέπεια των υπό μοντελοποίηση αντικειμένων. Βασική προϋπόθεση για μια επιτυχημένη εθνική εφαρμογή ενός προτύπου 3D είναι ο σχεδιασμός των διαφορετικών φάσεων ανάπτυξης: i) καθορισμός προδιαγραφών ii) πιλοτική εφαρμογή iii) αξιολόγηση και τέλος iv) καθολική υιοθέτηση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα καθιέρωσης ενός εθνικού προτύπου 3D είναι η εφαρμογή της επέκτασης CityGML, δηλαδή το CityGML-IMGeo ADE της Ολλανδίας (van den Brink κ.ά., 2013). Η υλοποίηση του CityGML-IMGeo ADE επιτεύχθηκε με τη συμμετοχή οργανισμών, εταιριών και εθελοντών. Η επέκταση ενσωματώνει πλήρως το CityGML με το υφιστάμενο 2D εθνικό μοντέλο πληροφοριών IMGeo (Information Model Geography) για την τοπογραφία μεγάλης κλίμακας. Η μοντελοποίηση του IMGeo αφορά 2D γεωμετρία σημείου, καμπύλης ή επιφάνειας για όλα τα αντικείμενα. Η ανάπτυξη του έχει γίνει με UML (Unified Modeling Language), περιέχει τους ορισμούς αντικειμένων για αναπαραστάσεις μεγάλης κλίμακας (δρόμων, υδάτινων σωμάτων, γεφυρών, χρήσης γής κλπ.) και των ιδιοτήτων τους. Καθώς η τρέχουσα έκδοση του IMGeo 2.0 είναι πλήρως συμβατή με το CityGML, τα δεδομένα 2D IMGeo μπορούν να αναπαρασταθούν σε 2,5D (δηλαδή ως αναπαράσταση επιφάνειας ύψους) και 3D (ως ογκομετρική αναπαράσταση) σύμφωνα με τις γεωμετρικές και σημασιολογικές αρχές του CityGML. Το πρότυπο χρησιμοποιείται στις εθνικές βάσεις διαχείρισης τοπογραφικών δεδομένων μεγάλης κλίμακας αλλά, και στο εθνικό σύστημα βάσεων για την ανταλλαγή δεδομένων. Οι πάροχοι τοπογραφικών δεδομένων μεγάλης κλίμακας υποχρεούνται να παρέχουν τα δεδομένα τους και ενθαρρύνονται να παρέχουν οποιαδήποτε επιπλέον δεδομένα διαθέτουν. Με

τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται σε μεγάλο βαθμό η λειτουργικότητα του προτύπου και κατ' επέκταση η βιωσιμότητά του.

Το AvD-CityGM αφορά την προσπάθεια καθιέρωσης ενός εθνικού 3D προτύπου για τις ανάγκες του Γερμανικού κράτους. Η ιδιαιτερότητα που υπήρξε στην περίπτωση της Γερμανίας είναι το γεγονός ότι πολλές πόλεις δημιούργησαν δικά τους μοντέλα πόλεων που αδυνατούσαν να υποστηριχθούν από ποιοτικά δεδομένα αλλά και δεν ήταν δυνατόν να εξασφαλιστεί η ενημέρωσή τους, με αποτέλεσμα τη σταδιακή τους απαξίωση. Το φαινόμενο αυτό οδήγησε στην απόφαση για τη δημιουργία ενός εθνικού συνόλου δεδομένων για 3D κτίρια (Gruber κ.ά., 2014). Το AvD-CityGM (CityGML 1.0 ADE, AvD-CityGM) είναι στην ουσία ένα εθνικό 3D πρότυπο για κτίρια που επεκτείνει το CityGML κατά τέτοιον τρόπο που να καλύπτει τις απαιτήσεις για 3D πληροφορίες κτιρίων (πολεοδομικό σχεδιασμό, προσομοιώσεις θορύβου και ενέργειας κλπ.) για την περίπτωση της Γερμανίας (Nouvel κ.ά., 2015). Οι ενότητες που βρίσκονται στο επίκεντρο της επέκτασης είναι οι *Building*, *Generics* και *Appearance* και το επίπεδο λεπτομέρειας (LODs) που δέχεται το ADE είναι οι LOD1 και LOD2. Επιπρόσθετα είναι δυνατή η προσθήκη χαρακτηριστικών για μια σειρά από ποιοτικές πληροφορίες (Roschlaub κ.ά., 2018). Η διαχείριση των δεδομένων του AvD-CityGML γίνεται μέσω της ανοιχτού κώδικα 3D βάσης δεδομένων 3DCityDB που περιλαμβάνει ένα χωρικό σχεσιακό σχήμα βάσης δεδομένων για όλες τις θεματικές ενότητες από το CityGML. Η υλοποίηση του ADE πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις. Στην πρώτη έγινε η συγκέντρωση των δεδομένων που αφορούσαν πληροφορίες κτιρίων λεπτομέρειας LOD1 και στη δεύτερη συγκεντρώθηκαν τα δεδομένα για LOD2.

Μία ακόμα προσπάθεια δημιουργίας εθνικού 3D προτύπου αφορά την περίπτωση της Τουρκίας και τη δημιουργία μιας επέκτασης κατά CityGML προκειμένου να ενσωματωθούν τα δεδομένα του προϋπάρχοντος τουρκικού προτύπου TRKBIS για τοπογραφικά χαρακτηριστικά μεγάλης κλίμακας (Aydar κ.ά., 2016). Ο σχεδιασμός της επέκτασης επικεντρώθηκε στο κατά πόσο οι επεκτάσεις του ADE μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία 3D μοντέλων πόλης με βάση το τουρκικό πρότυπο. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ κτιρίων CityGML και κτιρίων TRKBIS και αναπτύχθηκε μέσω UML ένα CityGML ADE που περιλαμβάνει τις πληροφορίες (*classes*, *attributes*, *code lists*) από το TRKBIS.

Στις αρχές του 2020 δημοσιεύτηκε μία μελέτη που αφορούσε τη δημιουργία ενός εθνικού προτύπου 3D μοντελοποίησης, μέσω ADE για την περίπτωση της

Σουηδίας. Επίκεντρο της μελέτης ήταν η μετατροπή της υπάρχουσας υποδομής Svensk Geoprocess Byggnad (SGP Building), που αφορούσε 2D και 3D μοντελοποίηση κτιρίων με ενσωμάτωση συγκεκριμένων εθνικών πληροφοριών. Αποτέλεσμα αυτής της προσπάθειας ήταν η δημιουργία του CityGML Sve-Test (Eriksson κ.ά., 2020). Είναι ένα εθνικό πρότυπο που υποστηρίζει την αναπαράσταση τόσο των 2D όσο και 3D κτιρίων. Έχει εξασφαλιστεί, όπου είναι απαραίτητο, η συμμόρφωση με τα οριζόμενα του διεθνούς προτύπου CityGML και έχει δημιουργηθεί η υποδομή ενσωμάτωσης επιπροσθέτων πληροφοριών που αφορούν εθνικές απαιτήσεις και ιδιαιτερότητες. Αξιοσημείωτο της συγκεκριμένης προσπάθειας ήταν η επιλογή ανάπτυξης της επέκτασης με βάση την επερχόμενη έκδοση του CityGML (έκδοση 3.0). Σύμφωνα με τους δημιουργούς της επέκτασης, επιλέχθηκε η ανεπίσημη έκδοση (CityGML 3.0) για την ανάπτυξη του προτύπου CityGML Sve-Test καθώς περιλαμβάνει κάποιες νέες ενότητες που εξυπηρετούν την περίπτωση της χώρας με βάση την υπάρχουσα υποδομή του SGP Building. Για παράδειγμα μία βασική διαφοροποίηση είναι η διαχείριση και η έννοια του χώρου, δηλαδή *AbstractSpace*, *AbstractSpaceBoundary* και ο τρόπος που συσχετίζονται όλες οι γεωμετρικές αναπαραστάσεις σ' αυτόν (Kutzner κ.ά., 2020). Όπως και η δυνατότητα χρονικών σημάνσεων που είναι σημαντικές για τη διαχείριση των εκδόσεων και της διαχείρισης του κύκλου ζωής των μοντέλων. Επίσης είναι δυνατή η δημιουργία πολλαπλών εκδόσεων του 3D μοντέλου πόλης και διασύνδεση διαφορετικών εκδόσεων του μοντέλου.

7.1.2 Αποτύπωση κατάστασης στην Ελλάδα, επισκόπηση υποδομής και ανάλυση αναγκών

Το στάδιο της επισκόπησης και της ανάλυσης υλοποιήθηκε με τη συνδρομή επαγγελματιών που δραστηριοποιούνται στον χώρο. Ήταν μια πρώτης τάξης ευκαιρία να γίνει μελέτη του υφισταμένου μοντέλου οργάνωσης και λειτουργίας του χώρου σύμφωνα με το υπάρχον νομοθετικό πλαίσιο και την υποδομή που υποστηρίζει την αγορά σε όλες τις εκφάνσεις της. Έγιναν επαφές και συνεντεύξεις με επαγγελματίες που δραστηριοποιούνται στον χώρο, κλήθηκαν να περιγράψουν το πλαίσιο λειτουργίας του κτηματολογίου και της αγοράς ακινήτων και να επισημάνουν τις ανάγκες που υπάρχουν.

Αυτό που κατέδειξε η μελέτη ήταν η ανάγκη για βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών προς τους εμπλεκόμενους (ιδιοκτήτες, επαγγελματίες, εποπτικές αρχές

κλπ.) σε έναν χώρο 132.000km² (έκταση της Ελλάδας) που εκτιμάται ότι υπάρχουν πάνω από 37.000.000⁶⁵ δικαιώματα ιδιοκτησιών. Η μεταπολεμική ανοικοδόμηση και η ανάγκη κάλυψης των στεγαστικών αναγκών από την έντονη αστυφιλία τροφοδοτούσαν την ανάπτυξη της χώρας για δεκαετίες. Η γραφειοκρατία, τα ελλιπή στοιχεία και η δυσκολία πρόσβασης σε πληροφορίες ταλαιπωρούν πολλά χρόνια την ελληνική αγορά ακινήτων.

Μία ουσιαστική παρέμβαση στην αυθαιρεσία και προσπάθεια οργάνωσης του χώρου ήταν η εφαρμογή του *Ελληνικού Κτηματολογίου* στις αρχές του 21^{ου} αιώνα. Αποτελεί ένα ενιαίο και διαρκώς ενημερωμένο σύστημα πληροφοριών που καταγράφει τις νομικές, τεχνικές και άλλες πρόσθετες πληροφορίες για τα ακίνητα και τα δικαιώματα πάνω σ' αυτά, με την ευθύνη και την εγγύηση του Δημοσίου⁶⁶. Στόχος του ήταν η δημιουργία ενός σύγχρονου, πλήρως αυτοματοποιημένου αρχείου ακίνητης ιδιοκτησίας, όλα τα στοιχεία του οποίου έχουν αποδεικτικό χαρακτήρα, εξασφαλίζοντας τη μεγαλύτερη δυνατή δημοσιότητα και ασφάλεια των συναλλαγών. Δυστυχώς το έργο δεν έχει ολοκληρωθεί, παρουσιάζοντας μεγαλύτερα ποσοστά ενσωμάτωσης σε αστικές περιοχές. Επιπροσθέτως το ισχύον κτηματολόγιο βασίζεται στην 2D καταγραφή των ιδιοκτησιών με αποτέλεσμα να μην μπορεί να απεικονίσει επαρκώς όλα τα ιδιοκτησιακά δικαιώματα στη σύνθετη πραγματικότητα της φυσικής γήινης επιφάνειας, των κατασκευών και των εμπράγματων δικαιωμάτων.

Προς την κατεύθυνση του εκσυγχρονισμού του υφιστάμενου πλαισίου λειτουργίας της αγοράς ακινήτων κινήθηκαν και κάποιες άλλες ενέργειες των αρχών όπως η δημιουργία της πλατφόρμας δήλωσης ημιυπαίθριων/αυθαιρέτων⁶⁷ χώρων, η ηλεκτρονική έκδοση οικοδομικών αδειών⁶⁸. Δημιουργήθηκε επίσης και το ενημερωτικό portal «*Ηλεκτρονική Πολεοδομία*»⁶⁹ που επιτρέπει στους φορείς του δημοσίου, τους μηχανικούς ή άλλους ενδιαφερόμενους ιδιώτες, να πληροφορούνται τους όρους δόμησης και τις χρήσεις γης για κάθε ακίνητο και γενικότερα τα δημόσια γεωχωρικά δεδομένα της ισχύουσας πολεοδομικής νομοθεσίας, που προσδιορίζουν το

⁶⁵ Εκτίμηση της εταιρίας Κτηματολόγιο Α.Ε

⁶⁶ <https://www.ktimatologio.gr/>

⁶⁷ <https://tetragonika.govapp.gr/>

⁶⁸ <https://web.tee.gr/e-adeies/anakoinoseis/>

⁶⁹ <http://gis.epoleodomia.gov.gr/v11/index.html#/23.8183/38.6426/6>

καθεστώς ιδιοκτησίας, δόμησης, εκμετάλλευσης ή και προστασίας της ακίνητης περιουσίας.

Η γενική κατεύθυνση των παραπάνω ενεργειών ήταν σωστή αλλά με λάθος τρόπο. Αντί να λυθεί η χαοτική κατάσταση που επικρατούσε, ένα νέο πολυδιασπασμένο ψηφιακό τοπίο με πλατφόρμες και portals ξεπήδησε. Ναι μεν βελτιώθηκαν ή και εξαλείφθηκαν χρόνια προβλήματα αλλά δημιουργήθηκαν νέα. Βασική αιτία ήταν η πληθώρα διαφορετικών εφαρμογών, με δημιουργούς διαφορετικούς φορείς, χωρίς συνεκτικό στοιχείο, ετερόκλητο και ελλιπές πλήθος πληροφοριών.

7.1.3 Ηλεκτρονική Ταυτότητα Κτιρίου

Προσπάθεια απάντησης για τα χρόνια προβλήματα της αγοράς ακινήτων και του κτηματολογίου ήταν η δημιουργία και η θεσμοθέτηση της Ηλεκτρονικής Ταυτότητας Κτιρίου/Αυτοτελούς Δημηρμένης Ιδιοκτησίας (ΗΤΚ)⁷⁰. Δηλαδή ο ηλεκτρονικός φάκελος ενός κτιρίου που περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες όπως η οικοδομική του άδεια, το πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης, τα σχέδια κατόψεων, ο πίνακας χιλιοστών, το πιστοποιητικό ελέγχου κατασκευής, δηλώσεις υπαγωγής σε νόμους αναστολής επιβολής κυρώσεων επί αυθαιρέτων κλπ. Η λειτουργία της ξεκίνησε πιλοτικά στην Ελλάδα στις αρχές του 2021, ενώ υπήρχε σαν σκέψη από το 2010, και πλέον είναι εν πλήρη λειτουργία από 1/2/2021. Η υλοποίηση της ανατέθηκε στο ΤΕΕ⁷¹ από το αρμόδιο υπουργείο και αποτελεί μια ενιαία βάση δεδομένων καταγραφής των ακινήτων στην ελληνική επικράτεια. Στη βάση συγκεντρώνονται τα απαραίτητα δικαιολογητικά, στοιχεία και σχέδια για κάθε ακίνητο. Στόχος είναι το νέο αυτό πληροφοριακό σύστημα να αποτελέσει τον κόμβο σύνδεσης όλων των ηλεκτρονικών συστημάτων για τα ακίνητα που λειτουργούν στη χώρα από τις διάφορες υπηρεσίες και ελεγκτικούς μηχανισμούς. Το υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας έχει χαρακτηρίσει την ΗΤΚ ως «*θεσμό μείζονος σημασίας για το δημόσιο συμφέρον, την καταπολέμηση της αυθαίρετης δόμησης και την προστασία της ιδιοκτησίας*».

Την ευθύνη για τη συμπλήρωση, ενημέρωση της βάσης αλλά και τον έλεγχο για όσα δηλώνονται και αναφέρονται στα έγγραφα και τα πιστοποιητικά (που παραδίδονται από τον ενδιαφερόμενο πολίτη) τη φέρει υποχρεωτικά μηχανικός. Η

⁷⁰ <https://web.tee.gr/e-building/anakoinoseis/>

⁷¹ Technical Chamber of Greece (TEE-TCG), <https://web.tee.gr/>

καταχώριση των στοιχείων γίνεται σε δύο στάδια, την καταχώριση οικοπέδου/γηπέδου και στη συνέχεια την καταχώριση ιδιοκτησιών που συνδέονται με το οικόπεδο.

Η έκδοση του τεχνικού φακέλου του ακινήτου, είναι εφικτή με την ολοκλήρωση της καταχώρισης όλων των απαιτούμενων στοιχείων. Τότε μπορεί ο εξουσιοδοτημένος μηχανικός να προβεί στην έκδοση του *Αποσπάσματος Ταυτότητας Κτιρίου/Αυτοτελούς Διηρημένης Ιδιοκτησίας*. Ο εξουσιοδοτημένος μηχανικός έχει τη δυνατότητα να εκδώσει το *Πιστοποιητικό Πληρότητας*, που περιλαμβάνει την «περίληψη» των στοιχείων του Αποσπάσματος Ταυτότητας καθώς και τη βεβαίωση του μηχανικού για την ύπαρξη αυθαιρεσιών και ποιες είναι οι τυχόν νομιμοποιητικές ενέργειες για την τακτοποίησή τους. Η έκδοση του πιστοποιητικού γίνεται ανά ιδιοκτησία και αποτελεί αντικείμενο μεταβίβασης⁷². Στις πολυκατοικίες η Ταυτότητα Κτιρίου συνολικά του ακινήτου προκύπτει ως το σύνολο των Αποσπασμάτων όλων των αυτοτελών ιδιοκτησιών και των κοινόχρηστων χώρων. Η διάρκεια ισχύος του είναι δύο μήνες από την ημερομηνία έκδοσης. Τόσο το Πιστοποιητικό Πληρότητας όσο και το Αποσπάσμα Ταυτότητας φέρουν μοναδικό κωδικό και κλειδί γνησιότητας.

7.2 Μεθοδολογία ανάπτυξης GRextADE

Ο σκοπός δημιουργίας του GRextADE είναι η δυνατότητα συγκέντρωση και ενσωμάτωσης ενός ευρύτερου φάσματος πληροφορίας σύμφωνα με το πρότυπο CityGML και η επέκταση του βασικού προτύπου προκειμένου να διαχειριστεί τις πληροφορίες που αφορούν την περίπτωση της Ελλάδας. Οι πληροφορίες σε ένα μεγάλο μέρος τους προέρχονται από υποδομές των υπηρεσιών που προΐστανται της αγοράς ακινήτων αλλά και εισάγονται από διάφορους παράγοντες που δραστηριοποιούνται στον χώρο (πχ. μεσίτες, λογιστές). Τελικός στόχος είναι η δημιουργία ενός εθνικού προτύπου 3D μοντελοποίησης που θα έχει τις προδιαγραφές να υποστηρίξει το σύνολο των πληροφοριών που διέπουν ένα ακίνητο και να παράσχει πληροφορίες σε ένα εύρος ενδιαφερομένων (ιδιοκτήτες, επαγγελματίες, υπηρεσίες κλπ.). Επίκεντρο της επιχειρούμενης επέκτασης είναι τα στοιχεία και οι πληροφορίες που συγκεντρώνονται, υποχρεωτικά πλέον από το πληροφοριακό σύστημα του ΗΤΚ. Λαμβάνεται μέριμνα έτσι ώστε τα πεδία και ιδιότητες του GRextADE να είναι συμβατά με τη σχεδίαση του ΗΤΚ, απώτερος στόχος είναι η μελλοντική δυνατότητα εξαγωγής επιλεγμένων δεδομένων από την πλατφόρμα ΗΤΚ και η αυτόματα εισαγωγή τους σε μία βάση

⁷² Χρησιμοποιείται σε όλες τις δικαιопραξίες που προβλέπει η σχετική νομοθεσία.

δεδομένων (πχ 3DCityDB) που θα βρίσκεται το 3D μοντέλο, κατά CityGML, του αστικού χώρου.

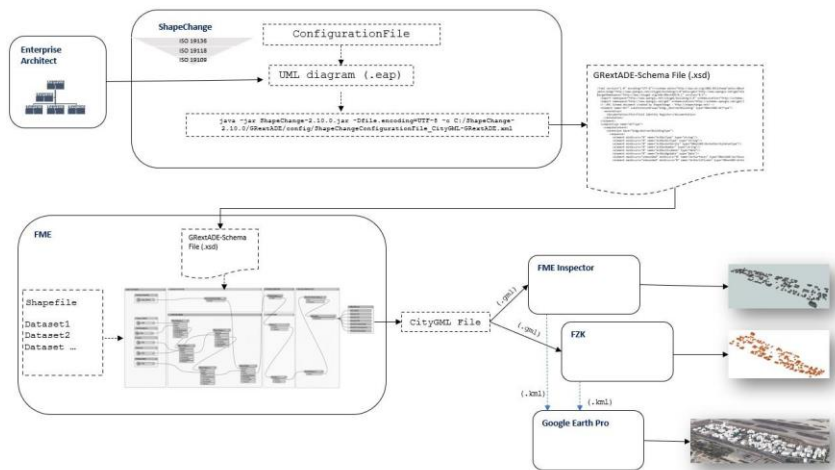
Ο σχεδιασμός του μοντέλου (*Εικόνα 53*) έγινε με χρήση διαγραμμάτων UML στο λογισμικό Enterprise Architect (EA), το οποίο είναι ένα εργαλείο μοντελοποίησης και σχεδιασμού που βασίζεται στο OMG UML⁷³ και υποστηρίζει πλήρως την ανάπτυξη μοντέλων δεδομένων συμβατών με GML (Van den Brink, Van Eekelen, κ.ά., 2013). Τα στερεότυπα UML που χρησιμοποιούνται στα πρότυπα ISO 19100⁷⁴ καθώς και τα μοντέλα δεδομένων GML και CityGML έχουν επίσης εφαρμοστεί βάσει του πλαισίου EA για τη διευκόλυνση του κατάλληλου σχεδιασμού των CityGML ADEs σε εννοιολογικό επίπεδο.

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο ανοιχτού κώδικα ShapeChange⁷⁵ για τη μετατροπή του διαγράμματος UML σε XML σχήμα. Το ShapeChange είναι ένα εργαλείο που βασίζεται σε JAVA και είναι σε θέση να εφαρμόζει κανόνες κωδικοποίησης UML σε GML. Η τεκμηρίωση των εφαρμοζόμενων κανόνων που περιγράφονται στα ISO 19136,(ISO - ISO 19136:2007 - Geographic Information — Geography Markup Language (GML), 2007), ISO 19118 (ISO - ISO 19118:2011 - Geographic Information — Encoding, 2011) και ISO 19109 (ISO - ISO 19109:2015 - Geographic Information — Rules for Application Schema, 2015; Open Geospatial Consortium, 2012); OGC, 2012). Το σχήμα XML (.XSD) δημιουργείται μόνο για τις κλάσεις και τα χαρακτηριστικά της επέκτασης. Για μπορέσει το ShapeChange να αναγνώσει και να αναλύσει το διάγραμμα UML που προκύπτει από το λογισμικό EA (αρχείο .EAP), δημιουργήθηκε το αρχείο διαμόρφωσης (ConfigurationFile) του ShapeChange και ακολούθησε η εξαγωγή του σχήματος ορισμού XML.

⁷³ <https://www.omg.org/>

⁷⁴ <https://www.iso.org/committee/54904/x/catalogue/>

⁷⁵ <http://shapechange.net>



Εικόνα 53:: Η ροή εργασιών ανάπτυξης της επέκτασης GRextADE / The development workflow of the GRextADE extension

Για τη δημιουργία έγκυρων συνόλων δεδομένων XML του GRextADE κατά υπαγόρευση του αρχείου ορισμού σχήματος XML (.XSD) χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό μετασχηματισμού FME. Το FME επιτρέπει την ανάγνωση των γεωχωρικών δεδομένων σε διαφορετικές μορφές και τη μετάδοση των ερμηνευμένων δεδομένων στα αντίστοιχα σύνολα δεδομένων ADE σύμφωνα με έναν σαφή ορισμό της σημασιολογικής χαρτογράφησης μεταξύ των δεδομένων εισόδου και εξόδου.

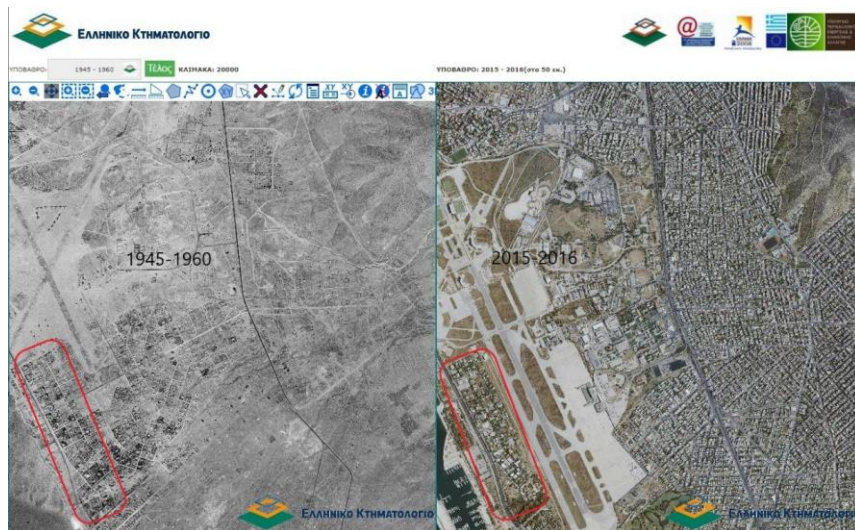
Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων έγινε με τη χρήση τριών δημοφιλών εφαρμογών 3D οπτικοποίησης: του εμπορικού εργαλείου οπτικοποίησης FME Inspector της εταιρίας Safe Software το οποίο είναι ενσωματωμένο στο λογισμικό FME, του εργαλείου ανοιχτού κώδικα FZK και τέλος με χρήση του Google Earth Pro⁷⁶.

7.3 Εφαρμογή της επέκτασης

Σαν περιοχή μελέτης επιλέχτηκε το παραλιακό μέτωπο της περιοχής του Ελληνικού, που γειτνιάζει με την περιοχή του παλιού αεροδρομίου. Η επιλεγείσα περιοχή έχει οικοδομηθεί στις αρχές του 1920 και το 1938 λειτούργησε το αεροδρόμιο (Εικόνα 54). Αφορά τα ήδη 292 κτίσματα που υπάρχουν στο οικοδομημένο τμήμα της περιοχής.

⁷⁶ <https://www.google.com/earth/versions/#earth-pro>

Είναι μια περιοχή που θα βρεθεί στο επίκεντρο των αλλαγών που θα δρομολογηθούν με την ανοικοδόμηση της περιοχής του πρώην αεροδρομίου⁷⁷ και τη μεγαλύτερη επιχειρούμενη αστική ανάπλαση στην Ευρώπη.



Εικόνα 54: Παράθεση ορθοφωτογραφιών της περιοχής του Αγίου Κοσμά Ελληνικού κατά τις περιόδους 1945-1960 και 2015-2016 (Πηγή: Ελληνικό Κτηματολόγιο ΑΕ)

Η ανάπλαση του Ελληνικού σύμφωνα με μελέτη του IOBE⁷⁸, θα εισφέρει πάνω από 14 δισ. ευρώ έσοδα στην ελληνική οικονομία στη διάρκεια κατασκευής του και θα δημιουργηθούν περίπου 70.000 θέσεις εργασίας σε ένα ευρύ φάσμα οικονομικών δραστηριοτήτων και υπηρεσιών μετά την ολοκλήρωσή του. Μεταξύ των άλλων σχεδιάζεται η δημιουργία:

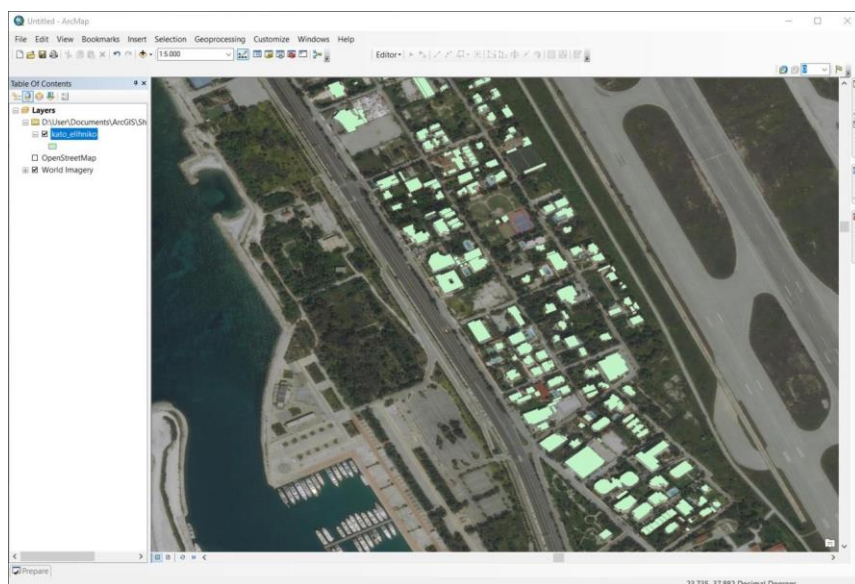
- Μητροπολιτικού Πάρκου, συνολικής έκτασης 2.000.000 τ.μ.
- Δύο ξενοδοχεία στην παράκτια ζώνη.
- Περίπου 800 κατοικίες διαφόρων ειδών (διαμερίσματα, μονοκατοικίες κλπ.).
- Ουρανοξύστης κατοικιών με ύψος έως 200 μέτρα από τη στάθμη της θάλασσας.
- Επέκταση της μαρίνας του Αγίου Κοσμά.

⁷⁷ Η επένδυση περιλαμβάνει οικιστικές αναπτύξεις, ξενοδοχειακές μονάδες, εμπορικές δραστηριότητες, χώρους διασκέδασης, μουσεία, αθλητικές εγκαταστάσεις, χώρους αναψυχής και πλήρη διαμόρφωση και ανάδειξη ολόκληρου του παραλιακού μετώπου.

⁷⁸ IOBE (Foundation for Economic & Industrial Research), http://iobe.gr/iobe_en.asp

- Εμπορικό κέντρο με χώρους 72.000 τ.μ.
- Χώροι γραφείων.
- Αθλητικές εγκαταστάσεις

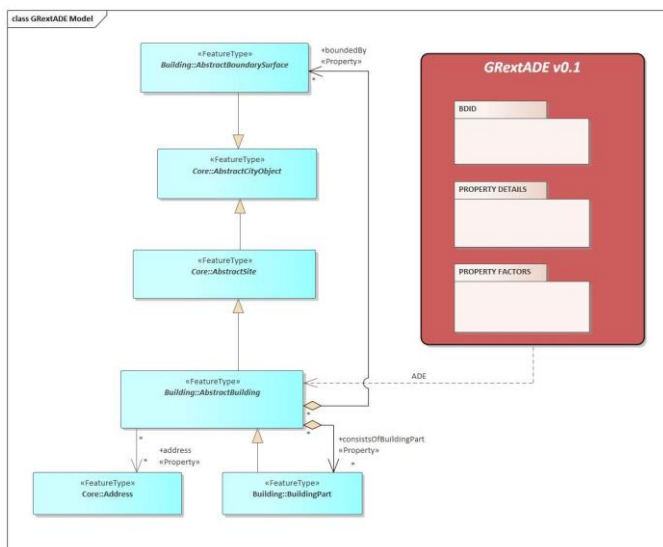
Σαν πρώτο βήμα έγινε αποτύπωση των ιχνών των κτιρίων της περιοχής με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS και δημιουργήθηκε το αντίστοιχο shapefile με τις πληροφορίες των υπό εξέταση επιφανειών των κτιρίων (Εικόνα 55). Λόγω του ότι δεν ήταν εφικτό να υπάρχει πρόσβαση σε στοιχεία και λεπτομέρειες που αφορούσαν τις ιδιοκτησίες της περιοχής μελέτης επιλέχτηκε η λύση των γεννητριών ψευδοτυχαίων αριθμών προκειμένου να προκύψουν τα συνοδευτικά αρχεία πληροφοριών που θα εισαχθούν στο υπό κατασκευή μοντέλο το οποίο δημιουργήθηκε σε επίπεδο λεπτομέρειας LOD1 με δυνατότητες αναβάθμισης σε LOD2.



Εικόνα 55: Τα ίχνη των κτιρίων της περιοχής Αγίου Κοσμά Ελληνικού στο λογισμικό ArcGIS (Πηγή: Ιδία εργασία)

7.4 Τα διαγράμματα UML του GExtADE

Η ενότητα *Building* του CityGML είναι αυτή που επεκτείνεται με το GExtADE. Ουσιαστικά το «*FeatureType*» *Building* είναι το σημείο σύνδεσης του βασικού μοντέλου και των στερεοτύπων του GExtADE (Εικόνα 56). Η επέκταση υλοποιήθηκε με την ανάπτυξη τριών διαγραμμάτων i) *BDID*, ii) *PROPERTY DETAILS* και iii) *PROPERTY FACTORS*.

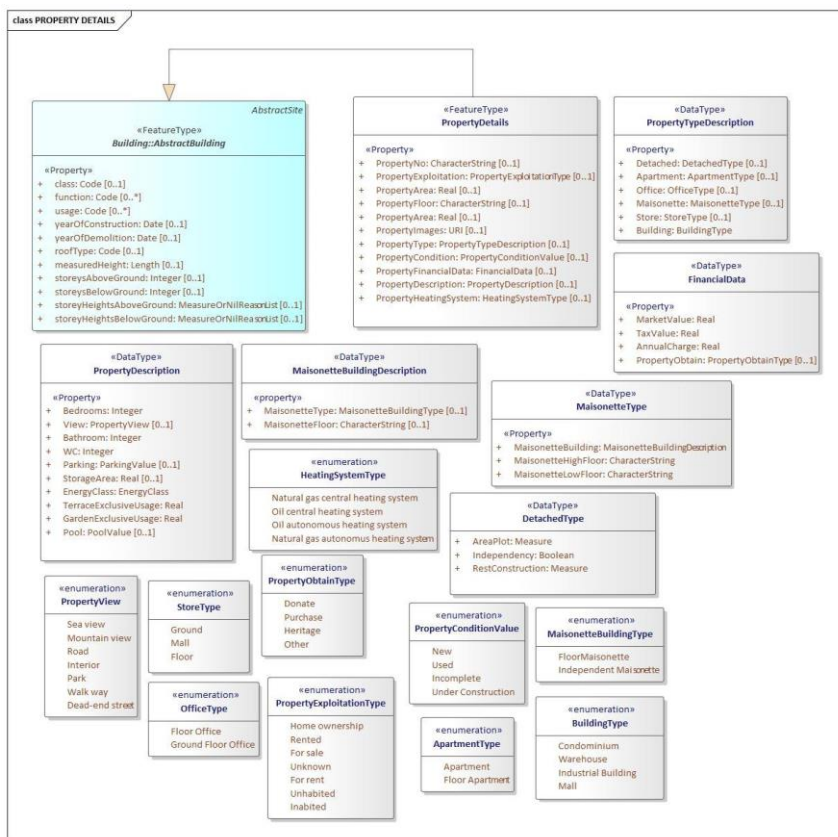


Εικόνα 56: Η επέκταση GExtADE του CityGML / The GExtADE extension of CityGML (Πηγή: Ιδία εργασία)

Το BDID (Building Digital ID), έχει δομηθεί με πληροφορίες που ήδη υπάρχουν και συγκεντρώνονται στα πληροφοριακά συστήματα των αρμόδιων φορέων αλλά και της νέας υπηρεσίας HTK που ουσιαστικά είναι κόμβος συγκέντρωσης όλων των δεδομένων που περιγράφουν ένα ακίνητο (Εικόνα 57).

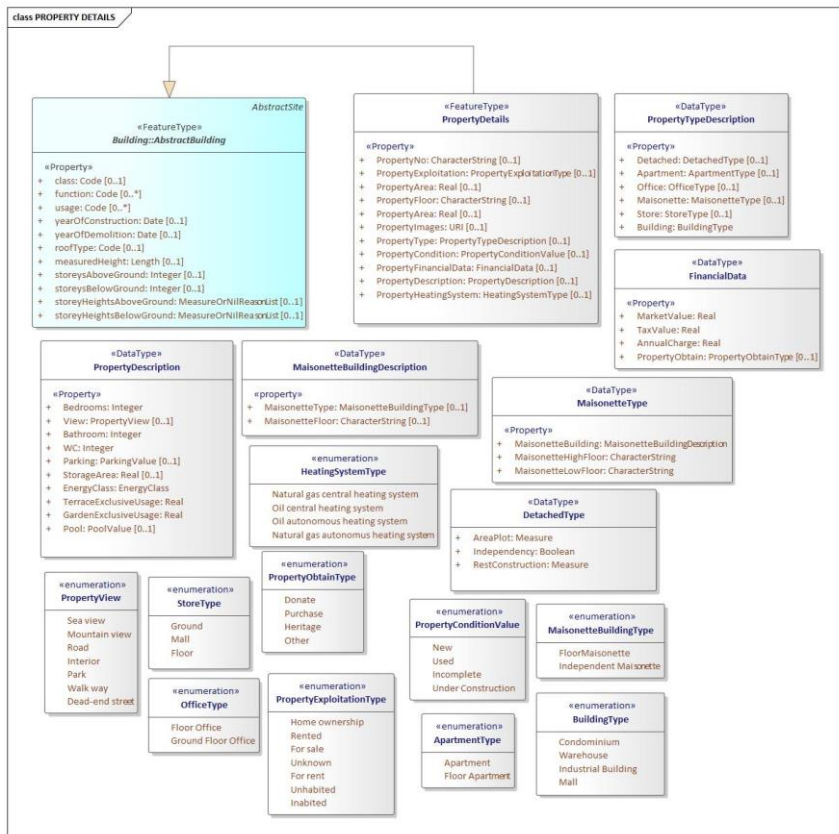
Η φιλοσοφία που ακολουθείται είναι η εξής: δηλώνεται καταρχήν το οικοπέδο με τα χαρακτηριστικά του («FeatureType» PFIR). Με έναν χαρακτηριστικό μοναδικό αριθμό (PFNumber) και συνδέονται με αυτό οι ιδιοκτησίες που υφίστανται επί αυτού («FeatureType» BIR). Έτσι ένα κτίριο έχει σημείο αναφοράς το οικοπέδο και ο αντίστοιχος μοναδικός αριθμός του (PrNumb) εμπεριέχει και τον αριθμό του οικοπέδου σαν «δεύτερο συνθετικό». Αφού πραγματοποιηθεί η σύνδεση ακολουθεί ο χαρακτηρισμός των ιδιοκτησιών και η εισαγωγή στοιχείων που τις συνοδεύουν (εμβαδόν, χρήση, όροφος κλπ.) αλλά και η σύνδεση των κύριων νομιμοποιητικών εγγράφων που συνοδεύουν την ιδιοκτησία (MainDocCopy) από το πεδίο έως την αποπεράτωση της κατασκευής (τοπογραφικό, άδεια κατασκευής, αρχιτεκτονική μελέτη κλπ.). Το στερεότυπο «FeatureType» ACT υποστηρίζει την εισαγωγή πληροφοριών που έχουν να κάνουν με πράξεις επί αυτών (πχ νομιμοποίηση αυθαίρετων χώρων), πιστοποιητικά (πχ πιστοποιητικό ενεργειακής κατάστασης), με τις

αντίστοιχες ημερομηνίες που τα συνοδεύουν και την εκδούσα αρχή (υπουργείο, εταιρία παροχής ενέργειας κλπ.).



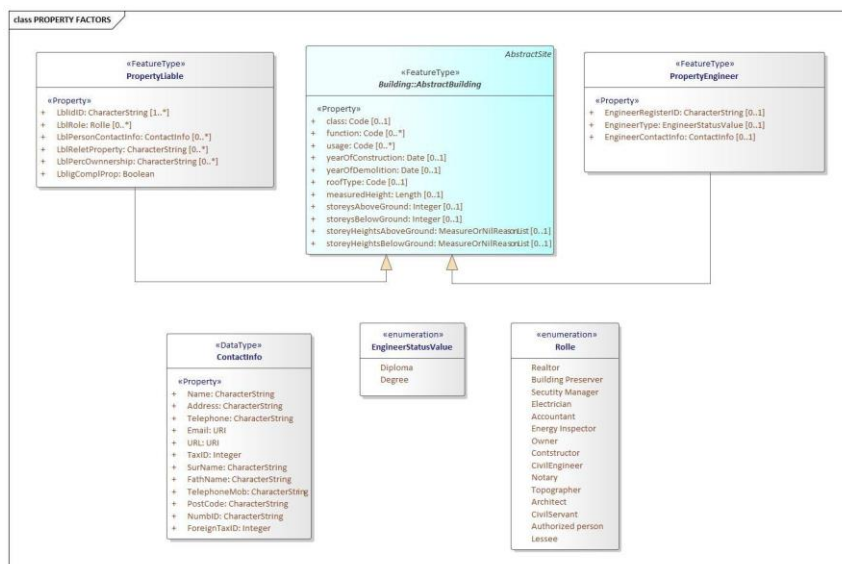
Εικόνα 57: Το UML διάγραμμα του BDID (Building Digital ID) (Πηγή: Ιδία εργασία)

Το διάγραμμα *PROPERTY DETAILS* (Εικόνα 58) επιτρέπει την εισαγωγή περαιτέρω πληροφορίας στο μοντέλο και την εμπορική αποτύπωση του ακινήτου μέσω του «FeatureType» *PropertyDetails*. Υπάρχει η δυνατότητα, εκτός των γενικών πληροφοριών να εισαχθούν πληροφορίες και χαρακτηριστικά για τη χρήση, την κατάσταση, την αξία του (εμπορική και φορολογητέα) ακόμα και την ετήσια επιβάρυνση του ιδιοκτήτη.



Εικόνα 58: Το UML διάγραμμα του PROPERTY DETAILS / UML diagram of the PROPERTY DETAILS (Πηγή: Ιδία εργασία)

Το διάγραμμα *PROPERTY FACTORS* (Εικόνα 59) μέσω του «*FeatureType*» *PropertyLiable* υποστηρίζει την εισαγωγή των υπόχρεων της ιδιοκτησίας (για παράδειγμα τα στοιχεία του ιδιοκτήτη που είναι φορολογικά υπόχρεος) ή την εμπλοκή των συντελεστών στην κατασκευή (τοπογράφος, πολιτικός μηχανικός, αρχιτέκτονας κλπ.). Διακριτός είναι ο ρόλος του Μηχανικού («*FeatureType*» *PropertyEngineer*) που επιμελείται τον έλεγχο των στοιχείων που εισάγονται στο πληροφοριακό σύστημα.



Εικόνα 59: Το UML διάγραμμα του PROPERTY FACTORS (Πηγή: Ιδία εργασία)

Ένας από τους σημαντικούς στόχους, κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή του GRestADE, ήταν η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης και ο εμπλουτισμός του χωρίς να διαταράσσεται η δομή και η λειτουργικότητά του. Επιδιώχθηκε να μη γίνει καμία παρέμβαση στο υπάρχον μοντέλο του προτύπου CityGML, ούτε και στην κλάση *Building* που είναι το επίκεντρο της επέκτασης. Καθοριστικής σημασίας ήταν το γεγονός ότι δεν υπήρχε ένα αντίστοιχο ολιστικό πλαίσιο μοντελοποίησης στην Ελλάδα. Κατά συνέπεια η απλότητα και η ευελιξία της επέκτασης ήταν ζητούμενα, προκειμένου να είναι ευκολότερες οι διορθώσεις και οι αναθεωρήσεις του GRestADE.

Ακολουθήθηκε η φιλοσοφία που διέπει το CityGML, δηλαδή χρήση ενός απλού πυρήνα με δυνατότητα επέκτασης για συγκεκριμένες εφαρμογές και ελάχιστο αριθμό κοινών λειτουργιών. Κατά τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η ανάπτυξη ενός μεγάλου και περίπλοκου μοντέλου δεδομένων με μεγάλο αριθμό κλάσεων.

7.5 Η μετατροπή του GRestADE σε XML σχήμα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η εξαγωγή του XML σχήματος από το διάγραμμα UML πραγματοποιήθηκε με το εργαλείο ανοιχτού κώδικα ShapeChange. Δημιουργήθηκε το αρχείο (Configuration File) για να είναι δυνατή η ανάγνωση και η ανάλυση του UML διαγράμματος (Εικόνα 60).

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>

<ShapeChangeConfiguration xmlns:xi="http://www.w3.org/2001/XInclude"
  xmlns="http://www.interactive-instruments.de/ShapeChange/Configuration/1.1"
  xmlns:sc="http://www.interactive-instruments.de/ShapeChange/Configuration/1.1"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="http://www.interactive-instruments.de/ShapeChange/Configuration/1.1 http://shapchange.net/res

  <input>
    <parameter name="inputModelType" value="EA7"/>
    <parameter name="inputFile" value="C:/ShapeChange-2.10.0/GRextADE/CityGML-GRextADE.eap"/>
    <parameter name="appSchemaName" value="GRextADE"/>
    <parameter name="checkingConstraints" value="disabled"/>
    <parameter name="representTaggedValues" value="topLevel,relationType,maxOccurs"/>
    <xi:include href="http://shapchange.net/resources/config/StandardAliases.xml"/>
    <stereotypeAliases>
      <stereotypeAlias wellknown="" alias="Property"/>
    </stereotypeAliases>
  </input>

  <log>
    <parameter name="reportLevel" value="INFO"/>
    <parameter name="logFile" value="C:/ShapeChange-2.10.0/GRextADE/OUTPUT/log.xml"/>
  </log>

  <targets>
    <TargetXmlSchema class="de.interactive_instruments.ShapeChange.Target.XmlSchema.XmlSchema" mode="enabled">
      <targetParameter name="outputDirectory" value="C:/ShapeChange-2.10.0/GRextADE/OUTPUT/XSDS" />
      <targetParameter name="defaultEncodingRule" value="custom" />
      <rules>
        <EncodingRule extends="citygml-ade" name="custom">
          <rule name="rule-xsd-all-tagged-values" />
        </EncodingRule>
      </rules>
      <xi:include href="http://shapchange.net/resources/config/StandardRules.xml"/>
      <xi:include href="http://shapchange.net/resources/config/StandardNamespaces-v31.xml"/>
      <xi:include href="http://shapchange.net/resources/config/StandardMapEntries-v31.xml"/>
      <xmlNamespace>
        <XmlNamespace nsabr="core" ns="http://www.opengis.net/citygml/2.0" location="http://schemas.opengis.net/citygml/2.0/core.xsd"/>
        <XmlNamespace nsabr="app" ns="http://www.opengis.net/citygml/appearance/2.0" location="http://schemas.opengis.net/citygml/appearance/2.0/core.xsd"/>
        <XmlNamespace nsabr="brid" ns="http://www.opengis.net/citygml/bridge/2.0" location="http://schemas.opengis.net/citygml/bridge/2.0/core.xsd"/>
        <XmlNamespace nsabr="hidm" ns="http://www.opengis.net/citygml/building/2.0" location="http://schemas.opengis.net/citygml/building/2.0/core.xsd"/>
      </xmlNamespace>
    </TargetXmlSchema>
  </targets>
</ShapeChangeConfiguration>
```

Εικόνα 60: Απόσπασμα από το ConfigurationFile της εφαρμογής ShapeChange για την επέκταση GRextADE (Πηγή: Ιδία εργασία)

Στη συνέχεια ακολούθησε η εξαγωγή του αρχείου σχήματος ορισμού CityGML-GRextADE.xsd (Εικόνα 61).

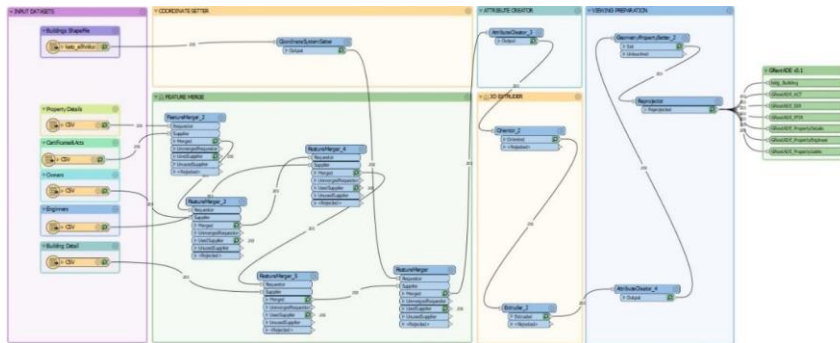


Εικόνα 61: Απόσπασμα τη μετατροπή του "FeatureType" BIR στο αρχείο σχήματος XML (CityGML-GRextADE.xsd) (Πηγή: Ιδία εργασία)

7.6 Η δημιουργία του αρχείου gml

Για τη δημιουργία του τελικού αρχείου που ενσωματώνει το δημιουργηθέν ADE στη δομή CityGML χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό μετασχηματισμού FME. Το FME αφού “διαβάσει” το ADE σχηματοποιεί τις διασυνδέσεις με το βασικό πρότυπο και επιτρέπει την ανάγνωση γεωχωρικών δεδομένων των αρχείων εισαγωγής με τα απαραίτητα datasets και την αντιστοίχσή τους με τα χαρακτηριστικά της επιχειρούμενης

επέκτασης (Εικόνα 62). Τέλος επιτρέπει τη μετάδοση των ερμηνευμένων δεδομένων στα αντίστοιχα σύνολα δεδομένων ADE σύμφωνα με έναν σαφή ορισμό της σημασιολογικής χαρτογράφησης μεταξύ των δεδομένων εισόδου και εξόδου.

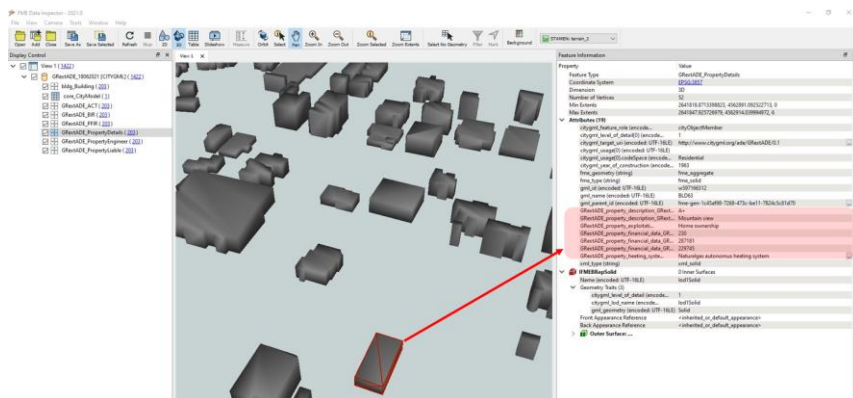


Εικόνα 62: Σχηματοποίηση των διασυνδέσεων μέσω FME και η μετάδοση των ερμηνευμένων δεδομένων στα αντίστοιχα σύνολα δεδομένων ADE (Πηγή: Ιδία εργασία).

7.7 Οπτικοποίηση του GRestADE

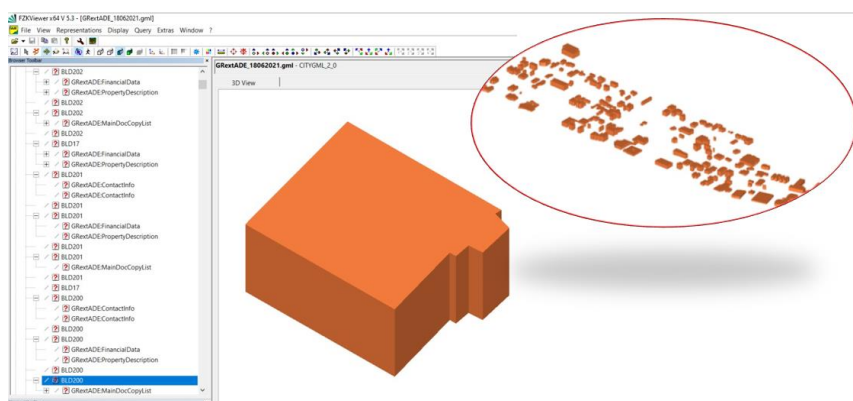
Η οπτικοποίηση των πληροφοριών που ενσωματώθηκαν στο μοντέλο, πραγματοποιήθηκε με τρία λογισμικά διαφορετικής φιλοσοφίας. Το ενσωματωμένο εργαλείο οπτικοποίησης FME Inspector του FME. Το λογισμικό ανοιχτού κώδικα FZK και το δημοφιλές Google Earth Pro.

Το FME Inspector απαιτεί τη δήλωση της θέσης του σχήματος XML (.XSD) προκειμένου να δημιουργήσει τις συσχετίσεις με το βασικό μοντέλο του προτύπου CityGML. Προσφέρει τη δυνατότητα μιας σειράς παραμετροποιήσεων προκειμένου να προβάλει τις επιθυμητές πληροφορίες (Εικόνα 63)) και τέλος δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής του οπτικοποιημένου αποτελέσματος σε διάφορους τύπους αρχείων. Επιπλέον είναι σε θέση να προβάλει διαφορετικούς τύπους λεπτομέρειας αλλά και διαφορετικά ADE.



Εικόνα 63: Οπτικοποίηση 3D κτιρίων της περιοχής Ελληνικού, σε επίπεδο λεπτομέρειας LOD1 και προβολή πληροφοριών του GRextADE μέσω του λογισμικού FME Inspector (Πηγή: Ιδία εργασία)

Το λογισμικό FZK προκειμένου να υποστηρίξει οποιαδήποτε επέκταση ADE χρειάζεται να τοποθετηθεί το σχήμα XML (.XSD) στον κατάλογο με τα υπόλοιπα σχήματα που προσφέρονται από την εγκατάσταση του λογισμικού. Υπολείπεται των δυνατοτήτων παραμετροποίησης του FME Inspector αλλά προσφέρει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον προβολής των πληροφοριών του GRextADE (Εικόνα 64). Επιτρέπει την εξαγωγή του οπτικοποιημένου 3D μοντέλου σε τύπους αρχείων IFC, KML, Collada, STL και gbXML.



Εικόνα 64: Οπτικοποίηση 3D κτιρίων της περιοχής Ελληνικού, σε επίπεδο λεπτομέρειας LOD1 και προβολή πληροφοριών του GRextADE μέσω του λογισμικού FZK (Πηγή: Ιδία εργασία)

Χωρίς πρόβλημα γίνεται και η προβολή του 3D μοντέλου από το περιβάλλον του λογισμικού Google Earth (Εικόνα 65). Η προβολή των πληροφοριών που υποστηρίζονται από το GRextADE προβάλλονται με επάρκεια και μάλιστα είναι δυνατή η οργάνωση τους σε layers για εύκολη πρόσβαση από το web περιβάλλον.



Εικόνα 65: Η προβολή μέσω του Google Earth Pro πληροφοριών που ενσωματώθηκαν στα 3D μοντέλα με την επέκταση GRestADE (Πηγή: Ιδία εργασία)

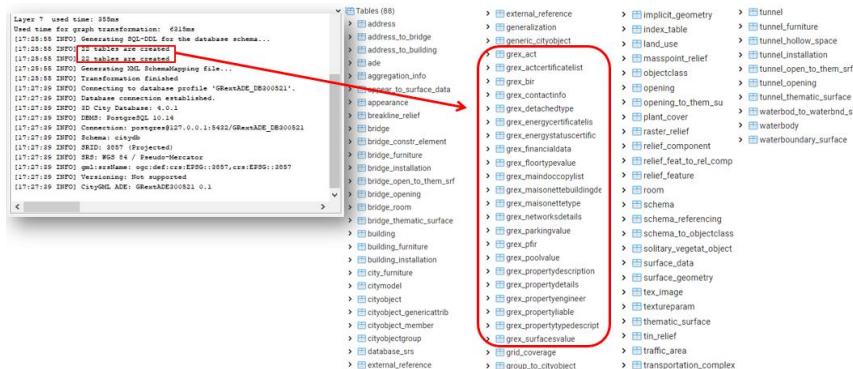
Είναι σαφές ότι ναι μεν τα λογισμικά FME Inspector και FZK προσφέρουν τη δυνατότητα προβολής σύνθετων πληροφοριών τόσο για το σύνολο των δεδομένων (ολόκληρη πόλη) όσο μεμονομένων δεδομένων ενός κτιρίου, αλλά η φιλικότητα και οικειότητα του περιβάλλοντος του Google Earth Pro δίνει τη δυνατότητα αξιοποίησης του GRestADE από απλούς χρήστες και web εφαρμογές.

7.8 Παρατηρήσεις και σχολιασμός

Είναι σαφές ότι το GRestADE είναι μια πρόταση που φιλοδοξεί να θέσει κανόνες κωδικοποίησης σ' έναν χώρο με σφάεστατες αδυναμίες και ελλείψεις. Αναμφίβολα η σχεδιαζόμενη προσέγγιση είναι υποκειμενική και ενδεχομένως να υπάρχουν διαφορετικές εναλλακτικές προτάσεις. Στο κεφάλαιο συμπερασμάτων αξιολογείται στο σύνολό της η επιχειρούμενη επέκταση. Οι βασικοί στόχοι που τέθηκαν κατά τον σχεδιασμό της επέκτασης επιτεύχθηκαν σε μεγάλο βαθμό (βλ. Κεφάλαιο Συμπεράσματα) και τα αποτελέσματα των δοκιμών είναι εξόχως ενθαρρυντικά.

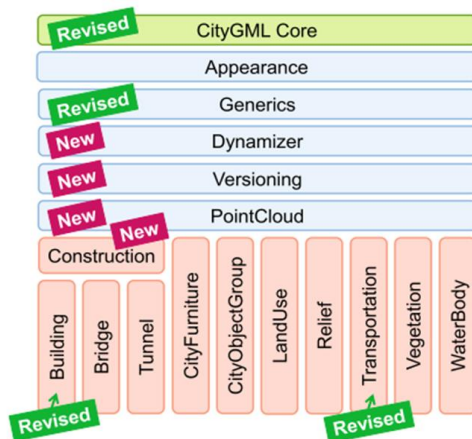
Απεδείχθη ότι είναι δυνατόν να συγκεντρωθούν ανομοιογενείς πληροφορίες σε διαφορετική μορφή από ποικιλία μέσων και αρχείων, οργανώνονται με επάρκεια, να ενσωματώνονται σε 3D μοντέλα κτιρίων. Η οπτικοποίηση των 3D μοντέλων γίνεται χωρίς προβλήματα και μάλιστα από εφαρμογές που έχουν σχεδιαστεί για διαφορετικούς σκοπούς. Επίσης απεδείχθη ότι μπορούν να δημιουργηθούν με

αυτοματοποιημένη διαδικασία οι πίνακες και οι συσχετίσεις τους στη βάση δεδομένων 3DCityDB της επέκτασης GRestADE με το πρότυπο CityGML (Εικόνα 66).



Εικόνα 66: Η επέκταση των πινάκων του CityGML με βάση το GRestADE στη βάση δεδομένων 3DCityDB με χρήση του εργαλείου Importer/Exporter (Πηγή: Ιδία εργασία)

Όσο αναφορά τη μελλοντική εργασία που πρέπει να γίνει στην προτεινόμενη ADE θα πρέπει καταρχήν να επιτευχθεί η προσαρμογή του GRestADE στην επόμενη έκδοση CityGML 3.0⁷⁹. Στην επερχόμενη έκδοση θα παρουσιαστεί μια ποικιλία νέων δυνατοτήτων και αναθεωρήσεων (Εικόνα 67) που θα αυξήσουν τη χρηστικότητα του CityGML (Kutzner κ.ά., 2020).



Εικόνα 67: Επισκόπηση του CityGML 3.0. Τα κάθετα πλαίσια δείχνουν τις θεματικές ενότητες. Οι οριζόντιες ενότητες καθορίζουν έννοιες που ισχύουν για όλες τις θεματικές ενότητες (Πηγή: Kutzner κ.ά., 2020a)

⁷⁹ <https://github.com/opengeospatial/CityGML-3.0CM>

Κεφάλαιο 8, 3D αναπαράσταση δικτύων κοινής ωφελείας με χρήση τεχνολογιών AR

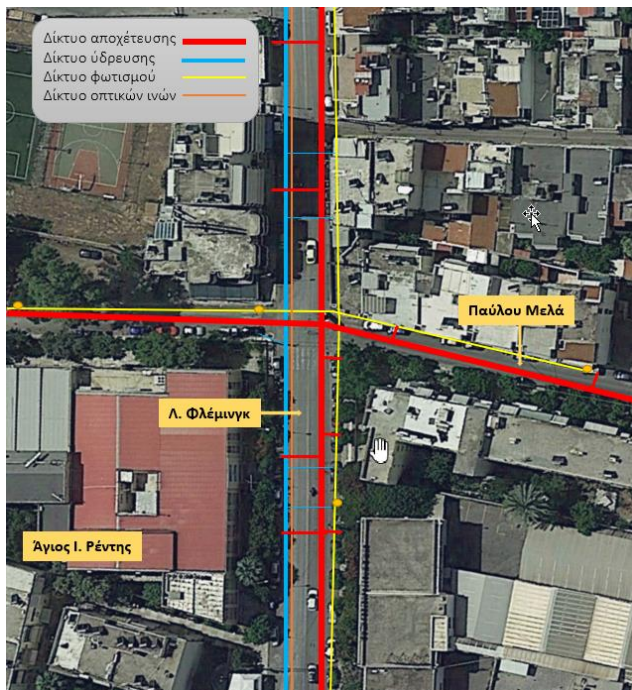
8.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 5 έγινε μια ανασκόπηση των δυνατοτήτων της τεχνολογίας AR και την αξιοποίηση της σ' ένα μεγάλο φάσμα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Έχοντας αναπτύξει μια επέκταση του προτύπου CityGML (GRextADE) για τις ανάγκες της Ελλάδας και τον εμπλουτισμό της με χωρική πληροφορία (βλ. Κεφάλαιο 7) θεωρήθηκε σκόπιμο να επιχειρηθεί, σαν φυσική συνέχεια, η περαιτέρω μοντελοποίηση με στόχο την οπτικοποίηση του από εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας.

Έχοντας επικεντρωθεί στο αστικό περιβάλλον επιλέχθηκε αντίστοιχα και στην παρούσα εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας να ακολουθηθεί το ίδιο πλαίσιο εφαρμογής και για λόγους συμβατότητας σαν βασικό εργαλείο μοντελοποίησης το λογισμικό FME. Εκτός των άλλων κρίθηκε χρήσιμο η διασωλήνωση του συνόλου των εργασιών της παρούσας διατριβής να αποτελέσουν έναν ολοκληρωμένο οδηγό προκειμένου στο μέλλον να είναι ευκολότερη η προσαρμογή και πιθανές βελτιώσεις των εφαρμογών.

8.2 Πεδίο εφαρμογής

Δομικό στοιχείο του αστικού περιβάλλοντος είναι οι υποδομές κοινής ωφελείας, οι οποίες εξασφαλίζουν τις κατάλληλες συνθήκες διαβίωσης για τον άνθρωπο (Duffy-Deno & Eberts, 1989; Graham, 2000; Uddin κ.ά., 2013). Στόχευση της παρούσας εφαρμογής είναι η δημιουργία ενός 3D μοντέλου υποδομών κοινής ωφελείας όπως το δίκτυο ύδρευσης, αποχέτευσης και οπτικών ινών για θέαση μέσω εφαρμογών επαυξημένης πραγματικότητας. Το γεωχωρικό σύνολο δεδομένων που περιγράφει την υποδομή που θα επιχειρηθεί να προβληθεί μέσω επαυξημένης πραγματικότητας στο πραγματικό του πλαίσιο την τοποθεσία όπου πραγματικά ανήκει (Εικόνα 68).



Εικόνα 68: Περιοχή μελέτης, η συμβολή των οδών Λ. Φλέμινγκ και Π. Μελά στο κέντρο του δήμου του Αγίου Ιωάννη του Ρέντη (Πηγή: Ιδία εργασία)

Η υπό ανάπτυξη εφαρμογή θα μπορούσε για παράδειγμα να αξιοποιηθεί από ένα συνεργείο συντήρησης ή επισκευής ενός δικτύου. Μέσω αυτής θα είναι δυνατός ο εντοπισμός του σημείου πρόσβασης χρησιμοποιώντας την κάμερα ενός κινητού τηλεφώνου. Θα προβάλλεται όχι μόνο η θέση του δικτύου αλλά και επιπρόσθετες πληροφορίες για αυτό (πχ. υλικό, ημερομηνία τοποθέτησης) αλλά και για άλλα δίκτυα (πχ. οπτικών ινών) έτσι ώστε να αποφευχθεί πιθανή βλάβη σε αυτά κατά την προσπάθεια προσέγγιση του σημείου που πρέπει να επισκευαστεί. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα εργαλείο το οποίο είναι δυνατόν να συμβάλει στη διαχείριση, συντήρηση και η επιδιόρθωση όλων αυτών των υποδομών οι οποίες είναι απαραίτητες για την ομαλή λειτουργία μιας πόλης (Behzadan κ.ά., 2015; Schall κ.ά., 2013).

8.3 Μεθοδολογία ανάπτυξης εφαρμογής AR

Όπως αναφέρθηκε (βλ. 8.1), ως εργαλείο μετασχηματισμού επιλέχθηκε το λογισμικό FME, προκειμένου να υπάρξει συνέχεια με την προηγούμενης εφαρμογή επέκτασης GReXTADE. Κύριο στοιχείο της δημιουργίας του μοντέλου είναι τα αρχεία τα οποία περιέχουν τα δίκτυα υποδομής (shapefiles). Τα αναφερόμενα αρχεία είναι δυνατόν να

δημιουργηθούν από οποιαδήποτε εφαρμογή GIS και είναι σημαντικό ότι είναι δυνατόν να βρεθούν από διάφορες πηγές και φορείς (δημόσιους ή ιδιωτικούς).

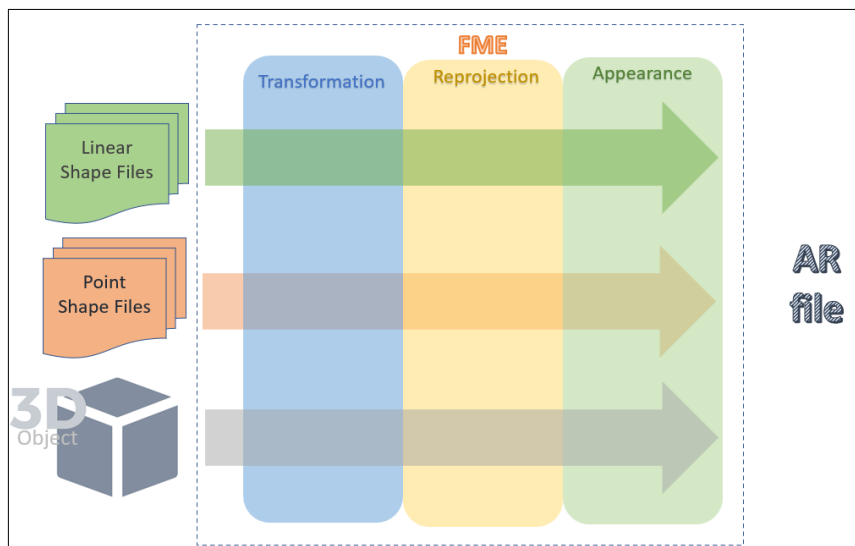
	ID	DHMOS_CODE	STATUS	DIEUTH	HIMER_TOPOTH	HIMER_ANTIK	DIAMETROS
1	STCB00540	STCBRGEX	OPERATING	L FLEMING 21, RENTIS	2/1/1998	22/5/2025	600
2	STCB00998	STCBRGEX	OPERATING	L FLEMING 35, RENTIS	2/1/1998	22/5/2025	600
3	STCB00542	STCBRGEX	OPERATING	L FLEMING 49, RENTIS	2/1/1998	22/5/2025	600
4	STCB00543	STCBRGEX	OPERATING	P MELE 54, RENTIS	2/1/1998	22/5/2025	600
5	STCB00544	STCBRGEX	OPERATING	P MELE 64, RENTIS	2/1/1998	22/5/2025	600
6	STCB00545	STCBRGEX	OPERATING	P MELE 72, RENTIS	2/1/1998	22/5/2025	600

Εικόνα 69: Δείγμα αρχείου με πληροφορίες για το δίκτυο ύδρευσης του Δήμου Α.Ι. Ρέντη (Πηγή: Ιδία εργασία)

Τα στοιχεία που απαιτήθηκαν προκειμένου να περιγραφούν οι υποδομές ήταν τριών ειδών. Διανυσματικά αρχεία γραμμών⁸⁰, σημείων και αρχεία 3D αντικειμένων. Τα διανυσματικά αρχεία γραμμών περιγράφουν γραμμικά δίκτυα όπως ύδρευσης και αποχέτευσης (Εικόνα 69). Τα σημειακά περιγράφουν θέσεις αντικειμένων στον φυσικό κόσμο όπως πυροσβεστικοί κρουνοί, σχάρες και καπάκια φρεατίων. Επίσης επιλέχθηκαν αρχεία με 3D μοντέλα που θα αντικαταστήσουν τα σημεία με το αντικείμενο που αντιπροσωπεύουν για παράδειγμα πυροσβεστικοί κρουνοί και βάνες.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε έγινε εξαγωγή των συντεταγμένων από τα διανυσματικά αρχεία (γραμμικά ή σημειακά), και αναγωγή τους σε 3D χρησιμοποιώντας μετασχηματιστές γεωμετριών (FME), και επαναπροβολή τους στον φυσικό κόσμο μετασχηματίζοντας τις θέσεις των γεωμετριών, φροντίζοντας να τους προσδώσουμε μορφή και υφές που παραπέμπουν σε ρεαλιστικά αντικείμενα. Τέλος το μοντέλο εξάγεται σε μορφή κατάλληλη για οπτικοποίηση από εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας (Εικόνα 70).

⁸⁰ Shapefiles



Εικόνα 70: Η διασολήγηση των εργασιών κατά τη διαδικασία μετασχηματισμού των δεδομένων σε αρχείο AR
(Πηγή: Ιδία εργασία)

Ξεκινώντας από τα διανυσματικά αρχεία τα οποία περιέχουν σε γραμμική μορφή το περιγραφόμενο δίκτυο πχ. ύδρευσης, τα αναγάγουμε σε 3D, φροντίζοντας να αποδώσουμε την κατάλληλη γεωμετρία στο περιγραφόμενο στοιχείο. Για παράδειγμα να δώσουμε τη σωστή διάμετρο του σωλήνα ύδρευσης (πχ. 5cm) τον οποίον θέλουμε να οπτικοποιήσουμε προκειμένου να είναι ρεαλιστικός. Στη συνέχεια εμπλουτίζουμε το υπό διαμόρφωση μοντέλο μας με πληροφορίες οι οποίες θα είναι δυνατόν να προβληθούν κατά την 3D αναπαράσταση μέσω μιας εφαρμογής AR. Έχουμε να κάνουμε με δύο ειδών πληροφορίες, αυτές που αναφέρονται στο δίκτυο και την προσφερόμενη υπηρεσία και σε εκείνες που περιγράφουν ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Δηλαδή έχουμε τη περιγραφή του αναφερόμενου δικτύου με πληροφορίες για παράδειγμα του τι μεταφέρει, που είναι τοποθετημένο, ενδεχομένως άδειες και πιστοποιητικά λειτουργία. Κατά δεύτερον με πληροφορίες για χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες, όπως η διάμετρος, ο τύπος του υλικού (pvc, είδος μετάλλου), έτος κατασκευής, έτος τοποθέτησης, το βάθος, αποστάσεις από τα όρια του δρόμου κλπ..

Όσο αναφορά την έκταση του υπό διαμόρφωση μοντέλου θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας ότι όταν δημιουργούμε σκηνές AR χρησιμοποιώντας δεδομένα πόλης, σπάνια θέλουμε να μετατρέψουμε ολόκληρο το σύνολο δεδομένων σε μορφή AR.

Ουσιαστικά μας ενδιαφέρει ένα τμήμα - ίσως μια διασταύρωση ή ένα τμήμα ενός δρόμου. Άρα θα χρειαστεί να καθορίσουμε το τμήμα ενδιαφέροντος φιλτράροντας τα δεδομένα που αναφέρονται στην υπό εξέταση περιοχή.

Τέλος, θα ορίσουμε τα σημεία-δείκτες (δηλαδή τις συντεταγμένες) που θα ενεργοποιείται ο μηχανισμός AR με τη βοήθεια του GPS και θα προβάλει το 3D μοντέλο με τις πληροφορίες που το συνοδεύουν μέσω της κάμερας του κινητού μας τηλεφώνου.

8.4 Μετασχηματισμός χαρακτηριστικών ενός σημείου

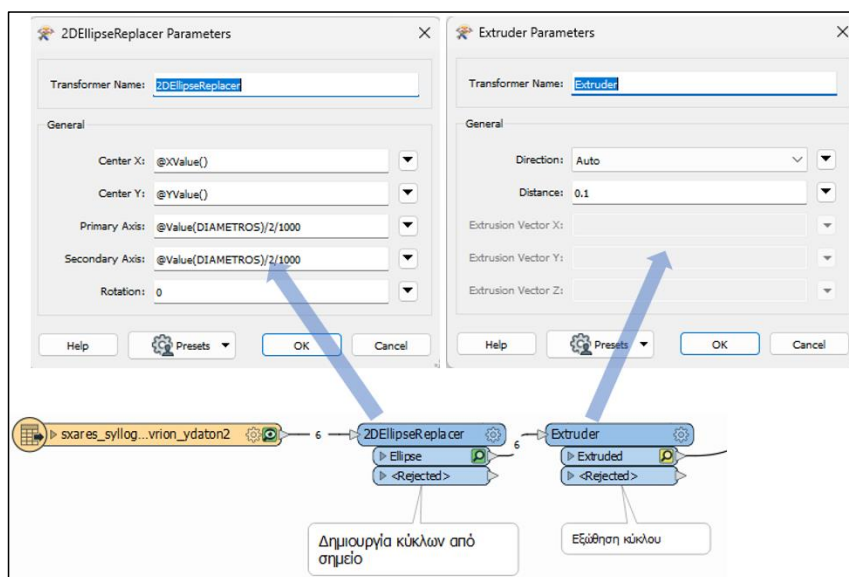
Ουσιαστικά για να μετατραπούν τα σημειακά χαρακτηριστικά σε τρισδιάστατες γεωμετρίες υπάρχουν δύο τρόποι. Ο πρώτος είναι να αλλάξει η γεωμετρία του σημείου και ο δεύτερος να αντικατασταθεί το σημείο με ένα υπάρχον 3D μοντέλο.

8.4.1 Αλλαγή γεωμετρίας σημείου

Αλλαγή γεωμετρίας ενός σημείου γίνεται αν απλά θέλουμε να αναπαραστήσουμε ένα σημείο που υποδεικνύει τη θέση ενός αντικειμένου. Όπως για παράδειγμα ένα καπάκι φρεατίου ή μια κολώνα φωτισμού. Αυτό που απαιτείται είναι τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν τις γεωμετρικές του ιδιότητες. Αν αυτά είναι γνωστά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να δημιουργηθεί η νέα γεωμετρία. Στην περίπτωση ενός καλύμματος φρεατίου τα χαρακτηριστικά της διαμέτρου και του ύψους τα οποία δίνονται σε μία μονάδα μέτρησης μπορούν να κλιμακωθούν χρησιμοποιώντας τα σαν παραμέτρους στον κατάλληλο μετασχηματιστή.

Για παράδειγμα, στο διανυσματικό αρχείο τύπου σημείων (shapefile) "sxares_sylloghs_omvriou_ydaton2" όπου κρατούνται στοιχεία για τις κυκλικές σχάρες συλλογής όμβριων υδάτων υπάρχει η ιδιότητα διαμέτρου που ονομάζεται "DIAMETROS" (Εικόνα 69). Αν χρησιμοποιηθεί στον μετασχηματιστή *2DEllipseReplacer* ως παράμετρος εισαγωγής είναι δυνατή η κλιμάκωση της τιμής του χαρακτηριστικού από χιλιοστά σε μέτρα. Οι παράμετροι «Axis» απαιτούν ακτίνες, γι' αυτό θα διαιρέσουμε τη διάμετρο με το 2. Στη συνέχεια θα εξωθήσουμε ελαφρώς την έλλειψη (ο μετασχηματιστής *Extruder*) για να επιτευχθεί η επιθυμητή τρισδιάστατη γεωμετρία (Εικόνα 71). Αντιστοίχως αν θέλουμε να κλιμακώσουμε σημεία που υποδηλώνουν για παράδειγμα κολώνες, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το χαρακτηριστικό του πραγματικού ύψους, εάν είναι διαθέσιμο.

Το τελευταίο βήμα είναι ο καθορισμός της εμφάνισης της νέας γεωμετρίας χρησιμοποιώντας τον μετασχηματιστή *AppearanceSetter* προκειμένου να επιλέξουμε τον τρόπο εμφάνισης στην εφαρμογή AR (Εικόνα 73). Αφού ολοκληρωθεί και ο καθορισμός της εμφάνισης, το υπό διαμόρφωση στοιχείο είναι έτοιμο προς εξαγωγή σε μορφή κατάλληλη προς οπτικοποίηση από την εφαρμογή AR.



Εικόνα 71: Διαδικασία κλιμάκωσης και εξώθησης γεωμετρίας στο λογισμικό FME (Πηγή: Ιδία εργασία)

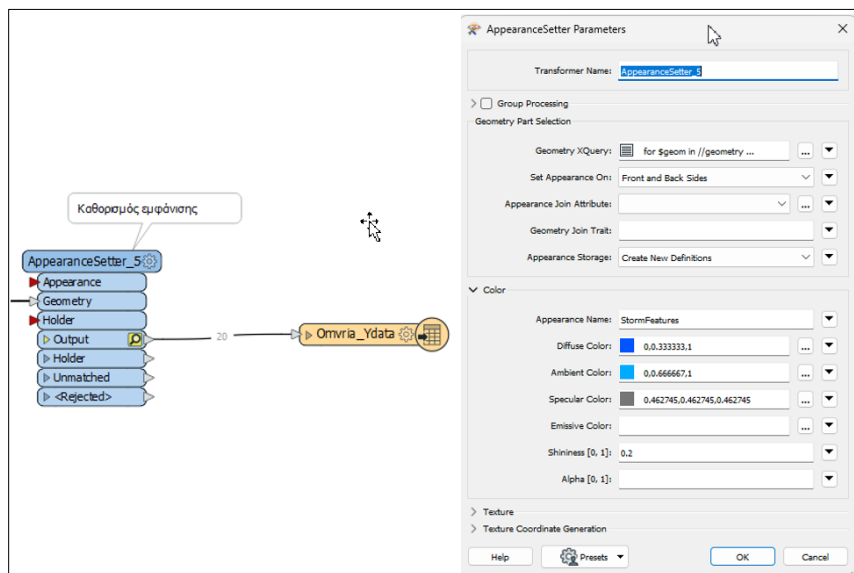
8.4.2 Αντικατάσταση σημειακών γεωμετριών με 3D μοντέλο

Η αντικατάσταση ένα σημείο με ένα 3D μοντέλο είναι θεωρητικά απλή. Η δυσκολία εμφανίζεται όταν χρειάζεται να προσανατολίσουμε τρισδιάστατα μοντέλα που αντιπροσωπεύουν σημειακά χαρακτηριστικά κατά μήκος γραμμικών χαρακτηριστικών όπως για παράδειγμα μία βάνα νερού (Εικόνα 72).

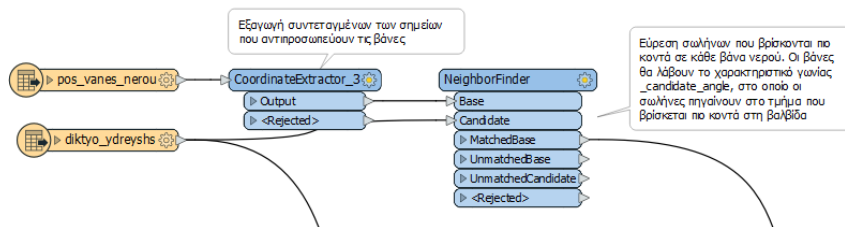


Εικόνα 72: 3D μοντέλο βάνας νερού από το Sketchfab (Πηγή: <https://sketchfab.com/>)

Καταρχήν θα πρέπει να εισάγουμε προς μετασχηματισμό το κατάλληλο μοντέλο. Ο μετασχηματισμός που θα υποστεί έχει να κάνει με την κλίμακα και τον προσανατολισμό προκειμένου να μπορεί να τοποθετηθεί στο σωστό σημείο και υπό την κατάλληλη γωνία. Για παράδειγμα εάν θέλουμε να εισάγουμε μια βάνα νερού θα πρέπει να την τοποθετήσουμε με έναν ρεαλιστικό τρόπο προκειμένου να ταιριάζει η γεωμετρία της με τον σωλήνα νερού που θα περνά από μέσα της. Δηλαδή μια βάνα θα πρέπει να ακολουθεί τον σωλήνα στον οποίο είναι εγκατεστημένη. Σε αυτήν την περίπτωση, πρέπει να περάσουμε τα σημεία που αντιπροσωπεύουν τις βάνες και τις γραμμές που απεικονίζουν σωλήνες μέσω του μετασχηματιστή *NeighborFinder*, ο οποίος προσδιορίζει βρίσκει έναν σωλήνα πιο κοντά σε κάθε βάνα (Εικόνα 74).

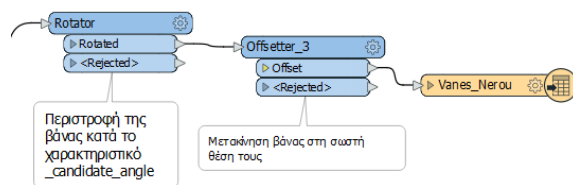


Εικόνα 73: Καθορισμός εμφάνισης των προβλλόμενων 3D αντικειμένων (Πηγή: Ιδία εργασία)



Εικόνα 74: Διαδικασία αντιστοίχισης σημείων με τις βάνες νερού (Πηγή: Ιδία εργασία)

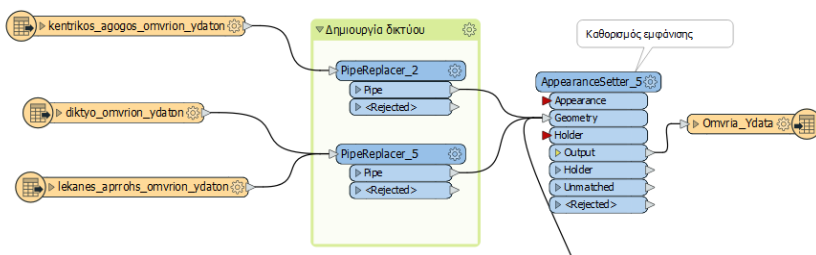
Αυτός ο μετασχηματιστής θα προσθέσει επίσης τη σωστή γωνία στο βασικό χαρακτηριστικό. Μόλις αλλάξουμε τη γεωμετρία των βανών από σημεία σε μοντέλα 3D, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη γωνία για να περιστρέψουμε το μοντέλο (Rotator) και να το τοποθετήσουμε κατά μήκος του σωλήνα (Εικόνα 75).



Εικόνα 75: Περιστροφή βανών κατά μήκος σωλήνα (Πηγή: Ιδία εργασία)

8.5 Μετασχηματισμός γραμμικών χαρακτηριστικών

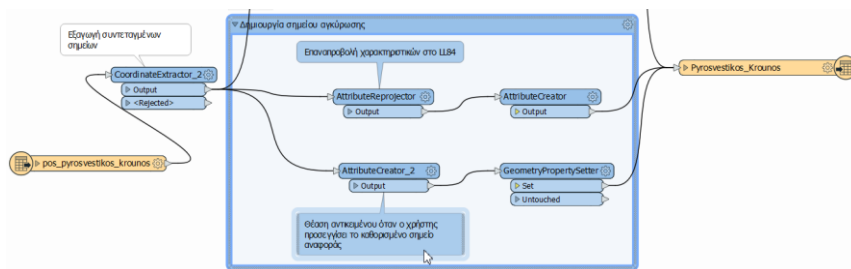
Για τον μετασχηματισμό γραμμής όπως είναι το δίκτυο ύδρευσης αξιοποιείται ο μετασχηματιστής *PipeReplacer*. Οι γραμμές των αρχείων (.shp) που αντιπροσωπεύουν, για παράδειγμα το δίκτυο ύδρευσης, θα μετασχηματιστούν σε 3D σωλήνες με τη σωστή γεωμετρία (Εικόνα 76).



Εικόνα 76: Δημιουργία 3D σωλήνα από γραμμή (Πηγή: Ιδία εργασία)

8.6 Θέση πρόσδεσης αντικειμένου

Η θέση πρόσδεσης αντικειμένου (anchor) είναι το χαρακτηριστικό που περιέχει τη θέση (συντεταγμένες) του προς θέαση αντικείμενου στον φυσικό κόσμο. Όταν ο χρήστης προσεγγίσει τη θέση, θα εμφανιστεί στην οθόνη της συσκευής το αντικείμενο με τη σωστή γεωαναφορά (Εικόνα 77).



Εικόνα 77: Τοποθέτηση αντικειμένου στον φυσικό κόσμο (Πηγή: Ιδία εργασία)

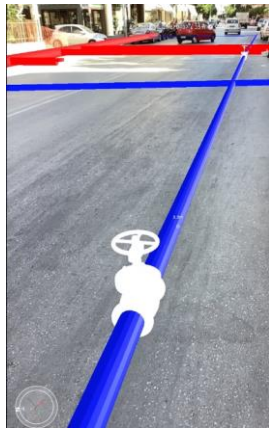
Αν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε ως θέση πρόσδεσης το σημείο που βρίσκεται ο πυροσβεστικός κρουνός, θα πρέπει να εξαχθούν οι συντεταγμένες του (CoordinateExtractor) και στη συνέχεια να μετασχηματιστούν (AttributeReprojector) στο σύστημα αναφοράς LL84⁸¹ προκειμένου να είναι δυνατή η προβολή του στον φυσικό κόσμο με δυνατότητες πλοήγησης. Τέλος με τον μετασχηματιστή AttributeCreator δημιουργείται το αντίστοιχο χαρακτηριστικό το οποίο θα εξαχθεί.

8.7 Οπτικοποίηση μέσω AR

Το τελικό αρχείο με την αποθήκευση του σε έναν διακομιστή (server) στο διαδίκτυο μπορεί να είναι διαθέσιμο για προβολή και πρόσβαση στα στοιχεία που έχουν ενσωματωθεί στο μοντέλο σε οποιαδήποτε φορητή συσκευή είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο. Εναλλακτικά, το μοντέλο μπορεί να αποσταλεί σε οποιαδήποτε συσκευή και να αποθηκευτεί τοπικά. Ο χρήστης ανοίγοντας την κάμερα της συσκευής του και προσεγγίζοντας το σημείο το οποίο έχει οριστεί ως σημείο πρόσδεσης θα βλέπει στην οθόνη του το προβαλλόμενο μοντέλο. Έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τις πληροφορίες που θα εμφανίζονται αλλά και την κλίμακα του μοντέλου.

⁸¹ Είναι το παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (WGS 84). Αφορά το τρισδιάστατο πλαίσιο αναφοράς συντεταγμένων για τον καθορισμό γεωγραφικού πλάτους, μήκους και ύψους που χρησιμοποιείται για πλοήγηση και εντοπισμό θέσης.

Για να μπορέσει ο χρήστης να δει το αντικείμενο μέσω επαυξημένης πραγματικότητας απαιτείται η αντίστοιχη εφαρμογή AR που θα μπορέσει να διαβάσει τα δεδομένα. Το λογισμικό μετασχηματισμού FME παρέχει δωρεάν την αντίστοιχη⁸² εφαρμογή (Εικόνα 78). Όταν επιλεγεί η εφαρμογή θα πρέπει να υποδειχθεί το αρχείο δεδομένων που θέλουμε να οπτικοποιηθεί μέσω AR στην οθόνη της συσκευής μας.



Εικόνα 78: Προβολή της θέσης δικτύου νερού μέσω της εφαρμογής AR (Πηγή: Ιδία εργασία)

Το προς οπτικοποίηση αρχείο μπορεί να βρίσκεται είτε τοπικά στη συσκευή του χρήστη ή στο cloud σε κάποιον εξυπηρετητή. Μέσω του προγράμματος περιήγησης αρχείων, εντοπίζεται η θέση του αρχείου και όταν ο χρήστης πλησιάσει το σημείο πρόσδεσης του αντικειμένου στο πραγματικό χώρο δηλαδή έρθει σε εγγύτητα με τις συντεταγμένες που υποδηλώνουν τη θέση ή τις θέσεις των αντικειμένων των οποίων έχουν εισαχθεί στον AR μετασχηματισμό τότε προβάλλονται και τα αντικείμενα (Εικόνα 79). Κατά την εκκίνηση της εφαρμογής και μέχρι να γίνει ανάγνωση του μοντέλου απαιτείται ένα μικρό χρονικό διάστημα προκειμένου η συσκευή μας να μπορέσει να σαρώσει τον χώρο και να αναγνωρίσει τις επιφάνειες. Στο μεσοδιάστημα αυτό αποφεύγουμε τη μετακίνηση και περιστροφή της συσκευής έτσι ώστε οι δέκτες – αισθητήρες (GPS και πυξίδα) της συσκευής να προσδιορίσουν την πραγματική θέση του χρήστη ως προς το μοντέλο.

⁸² App Store και Google Play.

Μόλις εμφανιστεί το AR μοντέλο στην οθόνη έχουμε τη δυνατότητα να πλησιάσουμε ή να επιχειρήσουμε να αλλάξουμε τη γωνία θέασης.



Εικόνα 79: Οπτικοποίηση δικτύου ύδρευσης (μπλε), όμβριων υδάτων (κόκκινο) και υπόδειξη πυροσβεστικού κρουνού, μέσω τεχνολογίας AR στον Δήμο Αγ. Ι. Ρέντη (Πηγή: Ιδία εργασία)

8.8 Παρατηρήσεις και σχολιασμός

Στο κεφάλαιο Συμπερασμάτων παρουσιάζεται μια εκτενής αναφορά και σχολιασμός των τελικών αποτελεσμάτων της εφαρμογής. Παρ' όλα αυτά ως γενικό σχόλιο θα επισημαίναμε επί του παρόντος τα εξής:

- Το τελικό αποτέλεσμα κρίνεται ικανοποιητικό.
- Υπάρχουν θέματα προς βελτίωση, αλλά σχετίζονται κυρίως με τους περιορισμούς του υλικού (hardware).
- Η απαιτήσις της εφαρμογής σε πόρους είναι υψηλές.
- Η υλοποίηση επί του παρόντος παρουσιάζει αυξημένη πολυπλοκότητα.

Τέλος θα πρέπει να σημειώσουμε ότι οι εξελίξεις στην τεχνολογία επαυξημένης πραγματικότητας (AR) είναι ραγδαίες και είναι θέμα χρόνου η αντιμετώπιση των περισσότερων των αδυναμιών των οποίων παρατηρήθηκαν κατά την υλοποίηση της εφαρμογής.

Συμπεράσματα

Κύριος στόχος της διατριβής είναι η ανάδειξη των βέλτιστων λύσεων για τη χωρική ανάλυση 3D μοντέλων πόλεων και η δυνατότητα αξιοποίησης τους μέσω τεχνολογιών AR. Επιχειρήθηκε να απαντηθούν τα τρία θεμελιώδη προβλήματα-προκλήσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 1. Δηλαδή η αδυναμία εξεύρεσης κατάλληλων δεδομένων 3D μοντελοποίησης, η ενσωμάτωση χωρικής πληροφορίας σε 3D μοντελοποιημένα αντικείμενα και οι δυνατότητες οπτικοποίησής τους μέσω τεχνολογίας AR.

Επιστέγασμα της προσπάθειας αυτής ήταν η δημιουργία τριών (3) πρωτότυπων εφαρμογών, οι οποίες αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής και επιχειρούν να επιλύσουν και να απαντήσουν ζητήματα και προκλήσεις που διατυπώθηκαν με τη μορφή ερευνητικών ερωτημάτων στο Κεφάλαιο 1.

Αξιολόγηση μεθοδολογίας συλλογής/δημιουργίας συνόλων δεδομένων

Στο κεφάλαιο 8 παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία δημιουργίας μαζικών δεδομένων για τη δημιουργία εκτεταμένων 3D αστικών χώρων. Μέσω της μεθοδολογίας αυτής επιχειρείται να δοθεί μία λύση στο μείζον πρόβλημα της εξεύρεσης δεδομένων για τις επιχειρούμενες 3D μοντελοποιήσεις. Διερευνήθηκαν οι δυνατότητες δημιουργίας και συλλογής μεγάλης κλίμακας δεδομένων (datasets) από δυναμικούς διαδικτυακούς χάρτες, προκειμένου να αξιοποιηθούν στην 3D μοντελοποίηση αστικού χώρου.

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε μια σχεδόν αυτοματοποιημένη διαδικασία συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων (datasets) από το OSM. Δημιουργήθηκαν 2D διανυσματικά πολύγωνα και με την ανύψωση τους αποτέλεσαν τη βάση δημιουργίας ενός 3D αστικού χώρου με δυνατότητες ενσωμάτωσης χωρικής ανάλυσης. Η “προσεγγιστική” φύση των δεδομένων ουδόλως εμπόδισε τον στόχο της μελέτης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σκοπός δεν είναι η πιστή αναπαράσταση 3D μοντέλων κτιρίων. Άλλωστε το επίπεδο λεπτομέρειας είναι τέτοιο που δεν την προϋποθέτει (LOD1). Κάνοντας μια δειγματοληπτική έρευνα σε κτίρια της περιοχής η μέθοδος που προτείνεται με την παρούσα για τον υπολογισμό του ύψους των κτιρίων εμπεριείχε σφάλμα της τάξης του $\pm 1,5$ μέτρου. Ο υπολογισμός του σφάλματος έγινε με επιτόπια καταμέτρηση του αριθμού των ορόφων και χρήση του λογισμικού Google Earth Pro που παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού του ύψους των κτιρίων προσδιορίζοντας με τον δείκτη του ποντικιού τις δύο κορυφές (βάση κτιρίου και οροφή). Για την

εγκυρότητα των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένα χαρτόνι επιφανείας 100εκ. x 100εκ. δηλαδή ενός (1) τετραγωνικού μέτρου. Κύριος λόγος του σφάλματος ήταν οι αλλαγές προδιαγραφών με το πέρασμα των χρόνων στις υψομετρικές απαιτήσεις των κατοικιών (τα παλαιότερα κτίσματα έχουν μεγαλύτερο ύψος ορόφου) αλλά και οι “παρεμβάσεις” στις οικοδομικές προδιαγραφές. Το αποτέλεσμα δεν απέχει πολύ από τις προτάσεις του CityGML για μοντέλα LOD1 και τις ανάγκες αναλύσεων GIS. Έρευνες στον διεθνή χώρο έχουν επιτύχει μέσο σφάλμα στο $\pm 0,8$ μέτρα με συνδυασμό αεροφωτογραφιών και σάρωση LiDAR (Biljecki, 2017b).

Στη διεθνή βιβλιογραφία μερίδα ερευνών χαρακτηρίζει τις προσεγγιστικές μεθόδους μετατροπής μοντέλων LOD0 σε LOD1 ως ανορθόδοξες και ανακριβείς. Μάλιστα οι Over, Schilling, Neubauer & Zipf (2010) αναφέρουν ότι “ο υπολογισμός των υψών του κτιρίου χρησιμοποιώντας μόνο τον αριθμό των ορόφων δεν είναι μια αξιόπιστη μέθοδος”. Στην πραγματικότητα όμως και οι “ορθόδοξοι” μέθοδοι συλλογής παρουσιάζουν αντικρουόμενα αποτελέσματα. Σε αρκετές προσεγγίσεις η σάρωση με laser από αεροσκάφος και η δημιουργία point cloud 3D μοντέλων παρουσιάζει σφάλματα αρκετών μέτρων (Hamilton & Morgan, 2010; Varga & Bašić, 2015). Η τάση αξιοποίησης δεδομένων από δυναμικούς διαδικτυακούς χάρτες παρουσιάζει μία αξιοπρόσεκτη δυναμική και μάλιστα λαμβάνουν χώρα έρευνες που αποσκοπούν στη 3D αναπαράσταση των εσωτερικών χώρων (κατόψεων ορόφων) των κτιρίων (Wang & Zipf, 2017).

Όσον αφορά την ακρίβεια των μετρήσεων, διαπιστώθηκε ότι στα πυκνοκατοικημένα σημεία της περιοχής μελέτης, η ακρίβεια υπολογισμού του ύψους κτιρίων είναι μεγάλη, δεδομένου ότι γίνεται η μέγιστη αξιοποίηση του συντελεστή ύψους. Παρακολουθώντας τα ερευνητικά αποτελέσματα σε βάθος χρόνου παρατηρείται μια αξιοσημείωτη, κλιμακούμενη αναστροφή της πρότερης διστακτικότητας αξιοποίησης δεδομένων από μη συμβατικές μεθόδους συλλογής. Κυρίαρχο ρόλο σ’ αυτή την αλλαγή έχει διαδραματίσει η τεχνολογική εξέλιξη και η βελτίωση των μεθοδολογιών. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε χρήζει τεχνικών βελτιώσεων και για την επίτευξη μεγάλης ακρίβειας θα πρέπει να διερευνηθεί μελλοντικά η δυνατότητα χρήσης τεχνολογιών μηχανικής μάθησης και εκπαίδευσης των συστημάτων.

Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων ήταν επιθυμητό να υλοποιηθεί με όσο το δυνατό απλούστερες μεθόδους ώστε να μην απαιτούνται γνώσεις ανάπτυξης εφαρμογών διαδικτύου. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν τα ενσωματωμένα εργαλεία της εφαρμογής Qgis. Το αποτέλεσμα ήταν ικανοποιητικό αλλά παρουσιάστηκαν διάφορες ασυμβατότητες έως ότου επιτευχθεί. Οι ασυμβατότητες αυτές οφείλονταν στις διαφορετικές εκδόσεις των προσθέτων της εφαρμογής Qgis και των φυλλομετρητών. Κρίθηκε απαραίτητη η προσφυγή στα κείμενα τεκμηρίωσης των προσθέτων για να γίνουν οι απαραίτητες παραμετροποιήσεις.

Αν και ένας από τους στόχους ήταν η απλοποίηση των διαδικασιών η όλη διαδικασία παραμένει αρκετά σύνθετη. Μερικοί από τους λόγους είναι:

- Η εμπλοκή πολλών εφαρμογών.
- Οι βασικές λειτουργίες των συστημάτων GIS (ισχύει και για τις εμπορικές εφαρμογές) βασίζεται στη λειτουργία προσθέτων.
- Η διαλειτουργικότητα των εφαρμογών είναι προβληματική.
- Οι συνεχείς αναβαθμίσεις επηρεάζουν τη σταθερότητα των συστημάτων και τη διαλειτουργικότητα.
- Τα εργαλεία δεν είναι φιλικά στον χρήστη.
- Οι διαδικασίες εξαρτώνται από απροσδιόριστους παράγοντες.

Για να θεωρηθεί ολοκληρωμένη η παρούσα μελέτη θα πρέπει να γίνει δοκιμή στο πεδίο με χρήση εφαρμογών που θα αξιοποιούν την υπό εξέταση υλοποίηση.

Αξιολόγηση επέκτασης GRextADE

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάστηκε το GRextADE. Μία πρόταση επέκτασης (ADE) της τρέχουσας έκδοσης του προτύπου CityGML, προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες 3D σχεδιασμού του αστικού περιβάλλοντος για την περίπτωση της Ελλάδας. Επιπλέον επιχειρήθηκε η ενσωμάτωση σημασιολογικών χαρακτηριστικών στα 3D κτιριακά μοντέλα. Επίκεντρο της προτεινόμενης επέκτασης αποτέλεσε το νέο πληροφοριακό σύστημα, Ηλεκτρονική Ταυτότητα Κτηρίων – HTK, που υιοθετήθηκε από τις ελληνικές αρχές με την έλευση του 2021.

Βασικός λόγος ανάπτυξης της πλειοψηφίας των ADEs ήταν η αδυναμία του βασικού μοντέλου CityGML να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις για παροχή πρόσθετων πληροφοριών διαφόρων εφαρμογών. Για τον λόγο αυτό μια σειρά από ADEs έχουν

σχεδιαστεί από διάφορες κοινότητες προκειμένου να επιτευχθεί προσαρμογή του CityGML με τις απαιτήσεις τους (Biljecki κ.ά., 2018a).

Στην περίπτωση της Ελλάδας η ιδιομορφία που υπάρχει είναι η απουσία κάποιας υποδομής κωδικοποίησης της 3D μοντελοποίησης του αστικού χώρου. Αλλωστε όπως έχει προαναφερθεί (βλ. 7.1.2) ακόμα και η καταγραφή της ακίνητης περιουσίας μέσω του έργου *Ελληνικό Κτηματολόγιο* δεν έχει ολοκληρωθεί. Εν αντίθεση με τα παραδείγματα που αναφέρθηκαν (βλ. 7.1.1), όπου στις προσπάθειες δημιουργίας εθνικών προτύπων υπήρχε ήδη μια υποδομή και ουσιαστικά γίνονταν οι προσπάθειες προκειμένου να προσαρμοστεί η υποδομή αυτή με το πρότυπο CityGML και παράλληλα να επεκταθεί προκειμένου να καλύψει μια σειρά από εθνικές ανάγκες. Εκ των πραγμάτων έπρεπε να ληφθεί υπόψιν η ιδιάζουσα αυτή κατάσταση. Αναγνωρίζοντας τη σημαντικότητα που έχει το έργο της HTK για την Ελλάδα και τις προσδοκίες που έχει δημιουργήσει, επελέγει η λύση κατά τον σχεδιασμό του GRextADE να μην αγνοηθεί το νέο πληροφοριακό σύστημα και να δημιουργηθεί η υποδομή για συνεργασία της νέας πλατφόρμας με τη σχεδιαζόμενη επέκταση του CityGML. Παράλληλα είναι μία καθολική πρόταση στο πρόβλημα απουσίας ενός εθνικού 3D προτύπου.

Το GRextADE είναι μια πρόταση που φιλοδοξεί να θέσει κανόνες κωδικοποίησης σ' έναν χώρο με σαφέστατες αδυναμίες και ελλείψεις. Αναμφίβολα η προτεινόμενη προσέγγιση δέχεται βελτιώσεις και ενδεχομένως να υπάρξουν και διαφορετικές εναλλακτικές προτάσεις. Οι βασικοί στόχοι που τέθηκαν κατά τον σχεδιασμό της επέκτασης ήταν οι εξής:

- Η σχεδιαζόμενη πρόταση να είναι όσο το δυνατό πιο ολοκληρωμένη, να αποτελεί μια καθολική πρόταση που να καλύπτει το σύνολο των δραστηριοτήτων του κτηματολογίου και της κτηματαγοράς.
- Το πληροφοριακό σύστημα της HTK να αποτελέσει επίκεντρο της προτεινόμενης λύσης.
- Το σχεδιαζόμενο μοντέλο να είναι απλό, ευέλικτο και επεκτάσιμο.
- Να μπορεί να δημιουργηθεί το υπόβαθρο στο σχήμα βάσης δεδομένων προκειμένου να αποθηκευτούν οι 3D πληροφορίες που αφορούν τα κτίρια.
- Να εξασφαλίζεται η συμβατότητα με την επερχόμενη έκδοση CityGML 3.0 .

Τα αποτελέσματα των δοκιμών είναι ενθαρρυντικά, βρίσκονται σε συμφωνία με τους αρχικούς στόχους και προσφέρουν το υπόβαθρο πάνω στο οποίο θα μπορούσε το Ελληνικό κράτος να αποκτήσει ένα εθνικό πρότυπο. Απεδείχθη ότι είναι δυνατόν να συγκεντρωθούν ανομοιογενείς πληροφορίες σε διαφορετική μορφή από ποικιλία μέσων και αρχείων, οργανώνονται με επάρκεια, να ενσωματώνονται σε 3D μοντέλα κτιρίων. Η οπτικοποίηση των 3D μοντέλων γίνεται χωρίς προβλήματα και μάλιστα από εφαρμογές που έχουν σχεδιαστεί για διαφορετικούς σκοπούς. Συγκεντρώνονται και επεκτείνονται οι πληροφορίες των αντικειμένων από τις υπάρχουσες υποδομές των πληροφοριακών συστημάτων.

Στον Πίνακα 6, παρατίθεται η συνολική αποτίμηση της επέκτασης GRextADE με βάση κριτήρια που αξιολογούν την ταχύτητα μοντελοποίησης των 3D δεδομένων, την ακεραιότητα τους, την οπτικοποίηση και τις απαιτήσεις σε πόρους του συστήματος. Επιχειρήθηκε η σταδιακή αύξηση του αριθμού 3D μοντελοποιημένων κτιρίων σε επίπεδο λεπτομέρειας LOD1. Ως γενικό συμπέρασμα εξάγεται ότι το GRextADE διασφαλίζει τη συνοχή και ακεραιότητα των δεδομένων χωρίς απώλειες ανεξαρτήτως του όγκου δεδομένων αλλά το εξαχθέν αρχείο (.gml) είναι πολύ μεγάλο όταν αφορά εκτενή 3D μοντελοποίηση. Κατά συνέπεια τίθενται περιορισμοί στην οπτικοποίηση του από τις εφαρμογές. Επίσης αυξάνονται ιδιαίτερα και οι απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα την αδυναμία φορητών συσκευών να διαχειριστούν ενιαία αρχεία προκειμένου να απεικονίσουν το σύνολο, για παράδειγμα της κτιριακής υποδομής μιας μεγάλης πόλης. Στις δοκιμές που επιχειρήθηκαν ο απαιτούμενος χρόνος αναπαράστασης της ευρύτερης περιοχής της πρωτεύουσας ήταν περίπου 4½ λεπτά.

Πίνακας 6: Συνολική αποτίμηση της επέκτασης GRextADE

Αρ. 3D Κτηρίων	Ταχύτητα μοντελοποίησης			Μέγιστη απαίτηση	Πληροφορίες		3D Μοντέλο		
	Συν. χρόνος	CPU	User	Χρήσης μνήμης	Μέγεθος αρχείου	Οπτικοποίησης FZK	FME	Διαχείριση FZK	FME
203	0,3sec	0,2sec	0,1sec	72.456KB	4.938KB	καμιά απώλεια	καμιά απώλεια	1	1
1.000	12,9sec	12,5sec	0,7sec	113.092KB	8.136KB	καμιά απώλεια	καμιά απώλεια	1	1
10.000	19,8sec	18,7sec	1,1sec	375.536KB	30.694KB	καμιά απώλεια	καμιά απώλεια	1	1
50.000	44,3sec	41,1sec	3,2sec	545.736KB	160.118KB	καμιά απώλεια	καμιά απώλεια	2	2
100.000	101,0sec	95,5sec	5,5sec	1.024.472KB	347.758KB	καμιά απώλεια	καμιά απώλεια	3	3
296.382*	296,0sec	272,5sec	23,5sec	2.952.564KB	1.172.345KB	καμιά απώλεια	καμιά απώλεια	3	3

Note: 1 άριστη, 2 αποδεκτή, 3 προβληματική

* Το σύνολο των κτηρίων της Αθήνας

**Προδιαγραφές υπολογιστή δοκιμών: Intel(R) Core(TM) i5-8300H 2.30 GHz, Samsung 970 Evo SSD 250GB M.2 NVMe, Win 10 x64, 16 GB RAM, Nvidia GTX 1050 4GB

Δυστυχώς δεν ήταν δυνατή η πρόσβαση σε πραγματικά δεδομένα στα πληροφορικά συστήματα που λειτουργούν στη χώρα προκειμένου να αξιολογηθεί η ποιότητα και ο όγκος τους. Επίσης δεν είναι σαφές ακόμα από τις αρχές ποιου είδους δεδομένα και σε ποια μορφή θα είναι ελεύθερα για το κοινό και ποια θα αποτελέσουν αντικείμενο αξιοποίησης για εφαρμογές. Επιπροσθέτως δεν υπάρχει προς το παρόν ένα πλαίσιο κινήτρων για εταιρίες και ερευνητικά προγράμματα που θα μπορούσαν να αποτελέσουν αρωγοί της προσπάθειας αυτής. Άλλωστε σε όλα τα εθνικά πρότυπα η ταυτόχρονη παρουσία και συμμετοχή ιδιωτών, εκπαιδευτικών ιδρυμάτων και κρατικών φορέων υπήρξε σημαντική τόσο στη σχεδίαση όσο και στην ανάπτυξη τους. Η διεξαγόμενη βιβλιογραφική ανασκόπηση κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η βιωσιμότητα ενός ADE είναι συνυφασμένη με την αποδοχή του από τους κυβερνητικούς φορείς και η υιοθέτηση του από αυτούς προσφέρει αξιοπιστία και αποδοχή.

Θέμα προς εξέταση αποτελεί η επίτευξη της προσαρμογής του GRextADE στην επόμενη έκδοση CityGML 3.0⁸³. Στη νέα έκδοση του προτύπου εισάγεται η έννοια του όγκου. Αναθεωρούνται οι θεματικές έννοιες *Building*, *Transportation* όπως και δομές *CityGML Core*, *Generic*. Ορίζονται νέες θεματικές *Dynamizer*, *Versioning*, *Point Cloud*, *Construction* και αναθεωρείται η έννοια του επιπέδου λεπτομέρειας (LOD). Στην πραγματικότητα, όπως ήδη έχει αναφερθεί, το GRextADE έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι εύκολη η προσαρμογή του στην καινούργια έκδοση. Με βάση τις προδιαγραφές του CityGML 3.0 (Kutzner κ.ά., 2020), έχει σχεδιαστεί το UML

⁸³ <https://github.com/opengeospatial/CityGML-3.0CM>

διάγραμμα, έχει δημιουργηθεί το αρχείο διαμόρφωσης (ConfigurationFile) του ShapeChange και έχει εξαχθεί το σχήμα XML (.XSD). Ο βασικός λόγος που δεν παρουσιάστηκε εξ αρχής η υλοποίηση του στο CityGML 3.0 είναι η αδυναμία των λογισμικών οπτικοποίησης να εναρμονιστούν με την πιλοτική έκδοση του CityGML 3. Δοκιμάστηκαν διάφορες λύσεις με προεξέχουσα αυτή της επιλογής εξαγωγής αρχείου GML μέσω του λογισμικού FME. Δυστυχώς οι επιχειρούμενες προσπάθειες οπτικοποίησης του εξαχθέντος αρχείου από τις διάφορες εφαρμογές παρουσίαζαν μια σειρά από ασυμβατότητες. Είναι θέμα χρόνου η υιοθέτηση της έκδοσης 3.0 από τα περισσότερα λογισμικά, οπότε προτιμήθηκε να εστιαστεί η έρευνα στην υλοποιούμενη επέκταση και όχι σε τεχνικά ζητήματα που αφορούν τα λογισμικά.

Αξιολόγηση αναπαράστασης δικτύων κοινής ωφελείας με χρήση τεχνολογιών AR

Η τρίτη εφαρμογή που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής αφορά την αξιοποίηση της τεχνολογίας επαυξημένης πραγματικότητας (AR) προκειμένου να οπτικοποιηθεί η χωρική πληροφορία που έχει ενσωματωθεί στα 3D μοντέλα. Σαν αποτέλεσμα της έρευνας αυτής, παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 8 η δημιουργία ενός 3D μοντέλου υποδομών κοινής ωφελείας (δίκτυο ύδρευσης, αποχέτευσης και οπτικών ινών) και θέαση αυτού μέσω μιας εφαρμογής επαυξημένης πραγματικότητας.

Η επιχειρούμενη μοντελοποίηση ολοκληρώθηκε με χρήση του λογισμικού FME. Ο βασικός λόγος της επιλογής του FME, ήταν η ικανότητα του στη διαχείριση γεωχωρικών δεδομένων, η οποία διαπιστώθηκε κατά τη δημιουργία της εφαρμογής της επέκτασης GRextADE που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 7. Κατά συνέπεια κρίθηκε ως ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρξει συνέχεια από τη διαδικασία διασοληνώσεις των εργασιών της επέκτασης του προτύπου CityGML. Η όλη μοντελοποίηση της διαδικασίας παρουσίασε αυξημένη πολυπλοκότητα, και κρίθηκε απαραίτητο αρκετές φορές προσφυγή στο κείμενο τεκμηρίωσης του λογισμικού. Απαιτήθηκε η παραμετροποίηση μιας σειράς μετασχηματιστών προκειμένου να είναι εφικτή η ανάγνωση των δεδομένων και εξαγωγή των χαρακτηριστικών τους βάση των οποίων έγινε ο μετασχηματισμός. Οι ιδιαιτερότητες οι οποίες περιγράφονται οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στις απαιτήσεις και στη μεθοδολογία του λογισμικού FME που προσφάτως ενέταξε στις βιβλιοθήκες του, δυνατότητες μετασχηματισμού δεδομένων σε αρχεία AR. Εντός του διαστήματος που απαιτήθηκε για την ολοκλήρωση της

μελέτης δημιουργίας αρχείων AR για μέσω του εν λόγω λογισμικού υπήρξαν αρκετές βελτιώσεις και έγινε σημαντική πρόοδος στη λειτουργικότητα του.

Το τελικό αποτέλεσμα κρίνεται ως ικανοποιητικό. Υπάρχουν θέματα προς βελτίωση, όπως για παράδειγμα η ακρίβεια του συστήματος ή ταχύτητα ενεργοποίησης της εφαρμογής, αλλά έχουν να κάνουν κυρίως με τους περιορισμούς του υλικού (hardware). Η απαιτήσης της εφαρμογής σε πόρους είναι υψηλές και για αυτό δε μπορούν όλες οι συσκευές να την υποστηρίξουν. Η ποιότητα του υλικού (επεξεργαστής, δέκτης GPS, κάμερα, επιταχυνσίμετρο κλπ.) παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην εμπειρία αξιοποίησης της τεχνολογίας AR (Delgado κ.ά., 2020; Oufqir κ.ά., 2020).

Η τελική εφαρμογή λειτουργεί καλύτερα σε εφαρμογές που χρησιμοποιούν λειτουργικό iOS (Apple). Ανταποκρίνονται γρηγορότερα, έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια και δεν καταπονούνται οι συσκευές. Ενώ αντιθέτως σε συσκευές Android υπήρχε δυσκολία ανάγνωσης του περιβάλλοντος χώρου και ιδιαίτερη καθυστέρηση να εμφανιστούν οι πληροφορίες στην οθόνη. Όταν τελικά συνέβαινε αυτό οι συσκευές παρουσίαζαν υπερθέρμανση. Αυτό ίσως εξηγείται από το γεγονός ότι ο αρχικός κώδικας AR της εταιρείας Safe Software (FME) παρουσιάστηκε για το λειτουργικό iOS και με καθυστέρηση σχεδόν ενός έτους υποστήριξε και το Android. Όπως γίνεται αντιληπτό δεν έχουν ολοκληρωθεί οι απαραίτητες αναβαθμίσεις προκειμένου να διορθωθούν προβλήματα του κώδικα.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι στη διεθνή βιβλιογραφία είναι ελάχιστες οι αναφορές σε χρηστικές εφαρμογές μέσω τεχνολογίας AR. Ο χώρος εξακολουθεί να είναι υπό διαμόρφωση και δεν έχει δημιουργηθεί μια επαρκής βάση διαθέσιμης ο πληροφορίας (Lonreglio & Kinatader, 2020). Οι περισσότερες έρευνες, δοκιμές και τελικές εφαρμογές εστιάζουν κυρίως στο ψυχαγωγικό κομμάτι. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για να αξιοποιηθεί μια τεχνολογία σε χρηστικά ζητήματα και να αντιμετωπίσει προβλήματα πρέπει να μπορεί να ενταχθεί στις υπάρχουσες δομές, προκειμένου να αναγνώσει και τελικά να επιλύσει προβλήματα. Με την τεχνολογία AR δε μπορεί να συμβεί προς το παρόν κάτι τέτοιο γιατί οι περιορισμοί που τίθενται από το υλικό αλλά και τα διαθέσιμα εργαλεία ανάπτυξης εφαρμογών είναι αρκετοί.

Γενικά συμπεράσματα επί της διατριβής

Στα πλαίσια της συγγραφής επιτεύχθηκαν μια σειρά από στόχους που τέθηκαν στην καταγραφή των προκλήσεων και των ερευνητικών ερωτημάτων.

Καταρχάς παρουσιάστηκε μια διαδικασία 3D μοντελοποίησης αστικού χώρου σε επίπεδο λεπτομέρειας LOD1. Μέσω αυτής της διαδικασίας απεδείχθη ότι είναι εφικτό να συλλεχθούν με μαζικό τρόπο από εργαλεία που διατίθενται δωρεάν όπως οι διαδραστικούς διαδικτυακούς χάρτες και μάλιστα με συνεργατικό τρόπο. Το τελικό αποτέλεσμα είναι εντός των γενικών αποδεκτών πλαισίων που η διεθνής ερευνητική προσπάθεια έχει καταγράψει, με πολύ πιο σύνθετες και ακριβές διαδικασίες LiDAR (Biljecki, 2017), κατάλληλο για τη χρήση σε προσομοιώσεις. Τέλος, παρουσιάστηκε μια ολοκληρωμένη διασωλήνωση των εργασιών προκειμένου να αποτελέσουν έναν οδικό χάρτη για επερχόμενες ερευνητικές προσπάθειες.

Αναπτύχθηκε μεθοδολογία επέκτασης του μοντέλου CityGML (Biljecki, 2018a), το GReXTADE, προκειμένου να ενσωματώσει πληροφορίες για την αξιοποίηση ενός ακινήτου. Η επέκταση αυτή αναπτύχθηκε με βάση την περίπτωση της Ελλάδας και δύναται να αποτελέσει ένα εθνικό πρότυπο διαχείρισης δεδομένων. Ο τρόπος μοντελοποίησης του διασφαλίζεται με τη διαλειτουργικότητα του μοντέλου επέκτασης, με τις επερχόμενες αναβαθμίσεις του προτύπου CityGML. Επιπροσθέτως το υπό ανάπτυξη πρότυπο αξιοποιεί πληροφορίες προερχόμενες από ανομοιογενείς πηγές. Επίλογος της προσπάθειας επέκτασης είναι η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος χαρτογράφησης της διαλειτουργικότητας των εμπλεκόμενων εφαρμογών και των τύπων των αρχείων με ταυτόχρονη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με χρήση διαφορετικών εφαρμογών οπτικοποίησης και αναπαράστασης 3D περιεχομένου.

Κατέστη δυνατή η οπτικοποίηση δεδομένων (σημειακών, γραμμικών), που είτε δημιουργήθηκαν μέσω GIS ή βρίσκονταν εντός μιας ΒΔ ενός GIS, μέσω της τεχνολογία AR. Σαν κύριο μέσω οπτικοποίησης χρησιμοποιήθηκαν μετασχηματισμοί των πρωταρχικών δεδομένων (GIS) και η θέαση του αποτελέσματος κατέστη δυνατή σε εκτεταμένο πεδίο (Arena κ.ά., 2022; Chen κ.ά., 2019). Εκτιμάται ότι η υιοθέτηση τεχνολογιών AR και η σύζευξη της με τα συστήματα GIS θα επιφέρει ανάπτυξη εφαρμογών διαχείρισης χωρικών δεδομένων σε 3D μοντέλα πόλεων λόγω της δημοφιλίας των προσιτών φορητών συσκευών (Smartphones, Tablets). Αναμενόμενο αποτέλεσμα η αύξηση του ενδιαφέροντος από οργανισμούς, φορείς, εταιρίες για

εξατομίκευση αυτών των υπηρεσιών με ταυτόχρονη συμμετοχή τους στην 3D μοντελοποίηση, συλλογή και ενημέρωση πληροφοριών (Dwivedi κ.ά., 2021).

Στον επίλογο της ερευνητικής προσπάθειας θα επισημαίναμε τη χρησιμότητα υιοθέτησης, από τη χώρα μας, ενός εθνικού προτύπου 3D μοντελοποίησης αστικών χώρων (Basanow κ.ά., 2008) όπως συμβαίνει σταδιακά με τις περισσότερες χώρες του πλανήτη (Biljecki, 2018a). Ο μοναδικός τρόπος να πάψει να υφίσταται το χαοτικό περιβάλλον με την ύπαρξη πολλών και ανομοιογενών ψηφιακών αρχείων με αμφιβόλου ποιότητας και ακρίβειας στοιχείων είναι η υποστήριξη και ενίσχυση του θεσμού της HTK. Το ανοικτό διεθνές πρότυπο CityGML με κατάλληλες προσαρμογές και επεκτάσεις όπως το GRextADE (Kolbe, 2009) μπορεί να θέσει το κανονιστικό πλαίσιο (Basanow κ.ά., 2008) που απαιτείται προκειμένου να αποθηκευτούν, διαχειριστούν και να οπτικοποιηθούν πληροφορίες για το σύνολο της αγοράς ακινήτων στην Ελλάδα.

Με βάση τη βιβλιογραφική έρευνα, που έλαβε χώρα στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, η δυνατότητα οπτικοποίησης ενσωματωμένης πληροφορίας σε 3D μοντέλα είναι κρίσιμο ζήτημα (Johansson κ.ά., 2016). Παρουσιάζει μια σειρά από πλεονεκτήματα που σε βάθος χρόνου θα αυξάνονται (Yao, 2019). Η τεχνολογία AR, που διερευνήθηκε και επελέγη για την ανάπτυξη της εφαρμογής οπτικοποίησης χωρικής πληροφορίας (Κεφάλαιο 8), παρουσιάζει μια αξιοπρόσεκτη δυναμική. Η δυνατότητα αξιοποίησης της από κοινές φορητές συσκευές προσφέρει την ευκαιρία να χρησιμοποιηθούν οι χωρικές πληροφορίες μέσω εφαρμογών (Musolesi, 2014) για ευρεία γκάμα χρηστών (Peddie, 2017) και θέασής τους ως εμπλουτισμένη πληροφορία σε προβαλλόμενα 3D μοντέλα. Ενδεχομένως η ευρεία και μαζική αξιοποίηση 3D πληροφοριών από εφαρμογές για φορητές συσκευές να είναι η πιθανή λύση στο πρόβλημα βιωσιμότητας που παρουσιάζουν, οι απαιτητικές σε πόρους, συλλογές 3D δεδομένων.

Μελλοντική εργασία

Η παρούσα διατριβή διερεύνησε τις δυνατότητες χωρικής ανάλυσης 3D μοντέλων πόλεων σε περιβάλλον GIS και τη δυνατότητα αξιοποίησης τους μέσω τεχνολογιών AR. Στα πλαίσια της έρευνας επιχειρήθηκε να απαντηθούν μια σειρά από προβλήματα της 3D μοντελοποίησης. Όπως η αδυναμία εξεύρεσης κατάλληλων δεδομένων

μοντελοποίησης, η ενσωμάτωση χωρικής πληροφορίας σε 3D μοντελοποιημένα αντικείμενα και οι δυνατότητες οπτικοποίησης τους μέσω τεχνολογίας AR.

Για τη συλλογή και δημιουργία συνόλων δεδομένων, μέσω της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στην παρούσα διατριβή, απαιτείται η αξιοποίηση τους μέσω εφαρμογών, στο πεδίο. Με τον τρόπο αυτό θα είναι δυνατή η αξιολόγηση των παραχθέντων δεδομένων προκειμένου να αξιοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Μελλοντικά πεδία έρευνας επί της επεκτάσεως GRextADE θα πρέπει να είναι καταρχήν η προσαρμογή της στην επόμενη έκδοση CityGML 3.0 και κατά δεύτερον η δοκιμή της με πραγματικά δεδομένα των πληροφοριακών συστημάτων που λειτουργούν στη χώρα. Με τον τρόπο αυτό θα είναι δυνατή η αξιολόγηση του βαθμού και της ποιότητας ενσωμάτωσης των πληροφοριών στα 3D μοντέλα αλλά και το πραγματικό μέγεθος των εξαχθέντων μοντέλων. Τέλος θα πρέπει γίνει εφαρμογή της επέκτασης GRextADE για 3D δεδομένα μοντέλων με υψηλότερο επίπεδο λεπτομέρειας (LOD2-LOD4) προκειμένου να γίνει επανεκτίμηση της επέκτασης και οι απαιτούμενες προσαρμογές. Η αύξηση του επιπέδου λεπτομέρειας των προβαλλόμενων 3D στοιχείων θα δημιουργήσει περισσότερες δυνατότητες αξιοποίησης του προτύπου.

Θέμα προς μελλοντική συζήτηση και έρευνα είναι η διάθεση και η διαβαθμισμένη πρόσβαση στα δεδομένα από τις αρχές. Θα πρέπει να υπάρξουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις ενημέρωσης, διάθεσης και αξιοποίησης των πληροφοριών προκειμένου να είναι βιώσιμα 3D μοντέλα πόλεων της ελληνικής επικράτειας.

Όσο αναφορά την οπτικοποίηση μέσω τεχνολογίας AR απαιτείται περισσότερος χρόνος ωρίμανσης της τεχνολογίας και επιπλέον σύζευξη με τα συστήματα GIS. Ο επιθυμητός βαθμός εξαρτάται απόλυτα από τις τεχνολογικές εξελίξεις και τις εταιρίες κατασκευής λογισμικού (software) και υλικού (hardware). Κρίσιμα ζητήματα είναι η ακρίβεια του συστήματος, η ταχύτητα ενεργοποίησης της εφαρμογής, η διαβαθμισμένη πρόσβαση στις πληροφορίες και η δυνατότητα λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο των εφαρμογών.

Βιβλιογραφία

Ελληνόγλωσση

Δημοπούλου Έφη. (2015). nD Κτηματολόγιο : Σχεδιασμός, Ανάπτυξη, Πρότυπα, Μοντελοποίηση - Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, 2015, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. <https://amelib.seab.gr/archive/item/30591?lang=el>

Καϊμάρης, Δ., & Καρανικόλας, Ν. (2014). Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών. Ζήτη. <https://ikee.lib.auth.gr>

Καλογήρου, Σ. (2015). Χωρική ανάλυση: μεθοδολογία και εφαρμογές με τη γλώσσα R. <https://www.openbook.gr/xwriki-analysi/>

Ξενόγλωσση

Aggarwal, R., & Singhal, A. (2019). Augmented Reality and its effect on our life. Proceedings of the 9th International Conference On Cloud Computing, Data Science and Engineering, Confluence 2019, 510–515. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8776989>

3D Model of the City of Adelaide - Dataset - data.sa.gov.au. (2015). <https://data.sa.gov.au/data/dataset/3d-model>

Ababsa, F.; Zendjebil, I.; Didier, J.-Y.; Pouderoux, J.; Vairon, J. Outdoor augmented reality system for geological applications. In Proceedings of the 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Kaohsiung, Taiwan, 11–14 July 2012. <http://doi.org/10.1109/AIM.2012.6265927>

Adithya, C.; Kowsik, K.; Namrata, D.; Nageli, V.; Shrivastava, S.; Rakshit, S. Augmented reality approach for paper map visualization. In Proceedings of the 2010 International Conference on Communication and Computational Intelligence (INCOCCI), Erode, India, 27–29 December 2010.

Afghantoloe, A., Doodman, S., Karimipour, F., & Mostafavi, M. A. (2014). Coevrage estimation of geosensor in 3D vector environments. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 40(2W3), 1–6. <https://doi.org/10.5194/ISPRSARCHIVES-XL-2-W3-1-2014>

Afroz, A.; Ballal, H.; Pettit, C. Implementing augmented reality sandbox in geodesign: A future for geodesign. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2018, 4. <http://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-5-2018>

Agoub, A., Kunde, F., & Kada, M. (2016). Potential of Graph Databases in Representing and Enriching Standardized Geodata. Dreiländertagung Der DGPF, Der OVG Und Der SGPF in Bern, Schweiz, July, 208–216. https://www.researchgate.net/profile/Felix_Kunde/publication/305701542

Agugiaro, G. (2016a). Enabling “energy-awareness” in the semantic 3D city model of Vienna. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 4(4W1), 81–88. <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ANNALS-IV-4-W1-81-2016>

Agugiaro, G. (2016b). Energy planning tools and CityGML-based 3D virtual city models: experiences from Trento (Italy). Applied Geomatics, 8(1), 41–56. <https://doi.org/10.1007/s12518-015-0163-2>

- Akbar, M., Aliabadi, S., Patel, R., & Watts, M. (2013). A fully automated and integrated multi-scale forecasting scheme for emergency preparedness. *Environmental Modelling and Software*, 39, 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.12.006>
- Albert J, Bachmann M, & Hellmeier A. (2003, April 2). Zielgruppen und Anwendungen für Digitale Stadtmodelle und Digitale Geländemodelle. Erhebungen im Rahmen der SIG 3D der GDI NRW. <http://www.ikg.uni-bonn.de/sig3d/docs>
- Albrecht, F., Moser, J., & Hijazi, I. (2013). ASSESSING FAÇADE VISIBILITY IN 3D CITY MODELS FOR CITY MARKETING. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-2-W2, 1–5. <https://doi.org/10.5194/ISPRSARCHIVES-XL-2-W2-1-2013>
- Alshammari, K., Beach, T., & Rezgui, Y. (2021). Cybersecurity for digital twins in the built environment: Current research and future directions. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 159–173. <https://doi.org/10.36680/J.ITCON.2021.010>
- Alzahrani, N. M., & Alfouzan, F. A. (2022). Augmented Reality (AR) and Cyber-Security for Smart Cities—A Systematic Literature Review. *Sensors* 2022, Vol. 22, Page 2792, 22(7), 2792. <https://doi.org/10.3390/S22072792>
- Amorim, J. H., Valente, J., Pimentel, C., Miranda, A. I., & Borrego, C. (2012). Detailed modelling of the wind comfort in a city avenue at the pedestrian level. 03008. <https://doi.org/10.1051/3U3D/201203008>
- Andrea, R., Lailiyah, S., Agus, F., & Ramadiani. (2019). “Magic Boosed” an elementary school geometry textbook with marker-based augmented reality. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 17(3), 1242–1249. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.V17I3.11559>
- Anne-Kathrin Birkenbeul. (2020). Interoperable Data Exchange – A Key Factor for BIM | GIM International. <https://www.Gim-International.Com/>. <https://www.gim-international.com/content/article>
- Apollonio, F. I., Gaiani, M., & Benedetti, B. (2012). 3D reality-based artefact models for the management of archaeological sites using 3D Gis: A framework starting from the case study of the Pompeii Archaeological area. *Journal of Archaeological Science*, 39(5), 1271–1287. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.12.034>
- Arena, F., Collotta, M., Pau, G., & Termine, F. (2022). An Overview of Augmented Reality. *Computers* 2022, Vol. 11, Page 28, 11(2), 28. <https://doi.org/10.3390/COMPUTERS11020028>
- Arens, C., Stoter, J., & van Oosterom, P. (2005). Modelling 3D spatial objects in a geo-DBMS using a 3D primitive. *Computers and Geosciences*, 31(2), 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.013>
- Ashtari, N., Bunt, A., McGrenere, J., Nebeling, M., & Chilana, P. K. (2020). Creating Augmented and Virtual Reality Applications: Current Practices, Challenges, and Opportunities. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376722>
- Awange, J., & Kiema, J. (2019). Fundamentals of GIS (Issue March). https://doi.org/10.1007/978-3-030-03017-9_14

- Aydar, S. A., Yomralioğlu, T., & Özbek, E. D. (2016). Modeling Turkey National 2D Geo-Data Model as a CityGML Application Domain Extension in UML. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 3(3), 1–10. <https://doi.org/10.30897/IJEGEO.306475>
- Azpilicueta, L., Lopez-Iturri, P., Zuñiga-Mejia, J., Celaya-Echarri, M., Rodríguez-Corbo, F. A., Vargas-Rosales, C., Aguirre, E., Michelson, D. G., & Falcone, F. (2020). Fifth-Generation (5G) mmWave Spatial Channel Characterization for Urban Environments' System Analysis. *Sensors*, 20(18). <https://doi.org/10.3390/s20185360>
- Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355–385. <https://doi.org/10.1162/PRES.1997.6.4.355>
- Barthold, C.; Subbu, K.P.; Dantu, R. Evaluation of gyroscope-embedded mobile phones. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Anchorage, AK, USA, 9–12 October 2011. <http://doi.org/10.1109/ICSMC.2011.6083905>
- Basiouka, S., Potsiou, C., & Bakogiannis, E. (2015). OpenStreetMap for cadastral purposes: An application using VGI for official processes in urban areas. *Survey Review*, 47(344), 333–341. <https://doi.org/10.1179/1752270615Y.0000000011>
- Bassani, M., Grasso, N., & Piras, M. (2015). 3D GIS based evaluation of the available sight distance to assess safety of urban roads. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(3W3), 137–143. <https://doi.org/10.5194/ISPRSARCHIVES-XL-3-W3-137-2015>
- Becker, T., Nagel, C., & Kolbe, T. H. (2011). Integrated 3D Modeling of Multi-utility Networks and Their Interdependencies for Critical Infrastructure Analysis. 1–20. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12670-3_1
- Becker, T., Nagel, C., & Kolbe, T. H. (2013). Semantic 3D modeling of multi-utility networks in cities for analysis and 3D visualization. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 41–62. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29793-9_3
- Bednarczyk, M. The Use of Augmented Reality in Geomatics. In *Proceedings of the 10th International Conference "Environmental Engineering"*, Cairo, Egypt, 7–9 April 2020. <http://doi.org/10.3846/enviro.2017.162>
- Behzadan, A. H., Dong, S., & Kamat, V. R. (2015). Augmented reality visualization: A review of civil infrastructure system applications. *Advanced Engineering Informatics*, 29(2), 252–267. <https://doi.org/10.1016/J.AEI.2015.03.005>
- Bernasocchi, M., Coltekin, A., & Gruber, S. (2012). An open source geovisual analytics toolbox for multivariate spatio-temporal data in environmental change modeling. Bernasocchi, Marco; Cöltekin, Arzu; Gruber, Stephan (2012). An Open Source Geovisual Analytics Toolbox for Multivariate Spatio-Temporal Data in Environmental Change Modeling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1-2:123-128., 1–2, 123–128. <https://doi.org/10.5194/ISPRSANNALS-I-2-123-2012>
- Biljecki, F. (2017). Level of detail in 3D city models. PhD Thesis, 353. <https://doi.org/10.4233/UUID:F12931B7-5113-47EF-BFD4-688AAE3BE248>
- Biljecki, F., Chow, Y. S., & Lee, K. (2023). Quality of crowdsourced geospatial building information: A global assessment of OpenStreetMap attributes. *Building and Environment*, 237, 110295. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.110295>

- Biljecki, F., Heuvelink, G. B. M., Ledoux, H., & Stoter, J. (2017). The effect of acquisition error and level of detail on the accuracy of spatial analyses. *Cartography and Geographic Information Science*, 00(00), 1–21. <https://doi.org/10.1080/15230406.2017.1279986>
- Biljecki, F., Kumar, K., & Nagel, C. (2018a). CityGML Application Domain Extension (ADE): overview of developments. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0055-6>
- Biljecki, F., Kumar, K., & Nagel, C. (2018b). CityGML Application Domain Extension (ADE): overview of developments. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0055-6>
- Biljecki, F., Ledoux, H., & Stoter, J. (2017). Does a finer level of detail of a 3D city model bring an improvement for estimating shadows? *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 0(9783319256894), 31–47. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25691-7_2
- Biljecki, F., Ledoux, H., & Stoter, J. (2017). Generating 3D city models without elevation data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64, 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.01.001>
- Biljecki, F., Ledoux, H., Du, X., Stoter, J., Soon, K. H., & Khoo, V. H. S. (2016). The most common geometric and semantic errors in CityGML datasets, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(2W1), 13–22. <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ANNALS-IV-2-W1-13-2016>
- Biljecki, F., Ledoux, H., Stoter, J., & Zhao, J. (2014). Formalisation of the level of detail in 3D city modelling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 48, 1–15. <https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2014.05.004>
- Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2015a). Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2015, Vol. 4, Pages 2842–2889, 4(4), 2842–2889. <https://doi.org/10.3390/IJGI4042842>
- Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2015b). Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842–2889. <https://doi.org/10.3390/ijgi4042842>
- Billen, R., & Zlatanova, S. (2003). 3D spatial relationships model: A useful concept for 3D cadastre? *Computers, Environment and Urban Systems*, 27(4), 411–425. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(02\)00040-6](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(02)00040-6)
- Billen, R., Cutting-Decelle, A., Marina, O., Almeida, J.-P., Cagliioni, M., Falquet, G., Leduc, T., Métral, C., Moreau, G., Perret, J., Rabino, G., García, R., Yatskiv, I., & Zlatanova, S. (2014). 3D City Models and urban information: Current issues and perspectives. <https://doi.org/10.1051/TU0801/201400001>
- Blut, C., & Blankenbach, J. (2020). Three-dimensional CityGML building models in mobile augmented reality: a smartphone-based pose tracking system. *International Journal of Digital Earth*, 14(1), 32–51. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1733680>
- Boates, I., Agugiario, G., & Nichersu, A. (2018). Network modelling and semantic 3d city models: Testing the maturity of the utility network ADE for CityGML with a water network test case. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(4), 13–20. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-13-2018>

- Bobrich, J.; Otto, S. Augmented maps. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2002, 34, 502–505.
- Boeters, R., Arroyo Ohoi, K., Biljecki, F., & Zlatanova, S. (2015). Automatically enhancing CityGML LOD2 models with a corresponding indoor geometry. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(12), 2248–2268.
<https://doi.org/10.1080/13658816.2015.1072201>
- Booch, G., Rumbaugh, J., & Jacobson, I. (2005). *The Unified Modeling Language User Guide*. Addison-Wesley. <https://books.google.gr/books?id=BqFQAAAAMAAJ>
- Borouhaki, S., & Malczewski, J. (2010). Measuring consensus for collaborative decision-making: A GIS-based approach. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(4), 322–332. <https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2010.02.006>
- Brashear, H.; Kim, J.S.; Lyons, K.; Starner, T.; Westeyn, T.; Lyons, K. GART: The Gesture and Activity Recognition Toolkit. *Human-Comput. Interact* 2007, 4552, 718–727.
http://doi.org/10.1007/978-3-540-73110-8_78
- Braun, N. Storytelling in Collaborative Augmented Reality Environments. WSCG, Czech Republic. 2003. Available on-line: <https://www.semanticscholar.org/paper>
- Breunig, M., & Zlatanova, S. (2011). 3D geo-database research: Retrospective and future directions. *Computers & Geosciences*, 37(7), 791–803.
<https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2010.04.016>
- Breunig, M., Borrmann, A., Rank, E., Hinz, S., Kolbe, T., Schilcher, M., Mundani, R. P., Jubierre, J. R., Flurl, M., Thomsen, A., Donaubauer, A., Ji, Y., Urban, S., Laun, S., Vilgertshofer, S., Willenborg, B., Menninghaus, M., Steuer, H., Wursthorn, S., Mazroobsemnani, N. (2017). Collaborative multi-scale 3D city and infrastructure modeling and simulation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4-W4(4W4), 341–352. <https://doi.org/10.5194>
- Bric, V., Pilouk, M., & Tempfli, K. (1994). Towards 3D - GIS : experimenting with a vector data structure (pp. 634–640). <https://research.utwente.nl/en/publications>
- Brink, L. van den, Stoter, J., & Zlatanova, S. (2014). Modeling an application domain extension of CityGML in UML OGC Best Practice. In *Open Geospatial Consortium*.
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-4-C26-11-2012>

- Bruse, M., Nouvel, R., Wate, P., Kraut, V., & Coors, V. (2016). An Energy-Related CityGML ADE and Its Application for Heating Demand Calculation. *International Journal of 3-D Information Modeling*, 4(3), 59–77. <https://doi.org/10.4018/IJ3DIM.2015070104>
- Burrough, P. A., Lloyd, C. D., & McDonnell, R. A. (2015). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.
<https://books.google.gr/books?id=afYZzgEACAAJ>
- Carmigniani, J., & Furht, B. (2011). Augmented Reality: An Overview. *Handbook of Augmented Reality*, 3–46. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0064-6_1
- Caudell, T. P., & Mizell, D. W. (1992). Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. 659–669 vol.2.
<https://doi.org/10.1109/HICSS.1992.183317>
- Caudell, T. P., & Mizell, D. W. (2003). Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. 659–669 vol.2.
<https://doi.org/10.1109/HICSS.1992.183317>
- Chaturvedi, K., & Kolbe, T. H. (2016). Integrating Dynamic Data and Sensors with Semantic 3D City Models in the Context of Smart Cities. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(2W1), 31–38.
<https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W1-31-2016>
- Chen, L. C., Wu, C. H., Shen, T. S., & Chou, C. C. (2014). The application of geometric network models and building information models in geospatial environments for fire-fighting simulations. *Computers, Environment and Urban Systems*, 45, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2014.01.003>
- Chen, L., & Luo, H. (2014). A BIM-based construction quality management model and its applications. *Automation in Construction*, 46, 64–73.
<https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2014.05.009>
- Chi, H.-L.; Kang, S.-C.; Wang, X. Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and construction. *Autom. Constr.* 2013, 33, 116–122. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.017>
- Christian Harder, E. (2015). *The ArcGIS Book*. 156.
<http://downloads.esri.com/learnarcgis/pdf/the-arcgis-book.pdf>
- Christodoulou, S. E., Vamvatsikos, D., & Georgiou, C. (2010). A BIM-based framework for forecasting and visualizing seismic damage, cost and time to repair.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113517469>
- Chylinski, M., Heller, J., Hilken, T., Keeling, D. I., Mahr, D., & de Ruyter, K. (2020). Augmented Reality Marketing: A Technology-Enabled Approach to Situated Customer Experience. <https://doi.org/10.1016/J.AUSMJ.2020.04.004>
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Coors, V. (2003a). 3D-GIS in networking environments. *Computers, Environment and Urban Systems*, 27(4), 345–357. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(02\)00035-2](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(02)00035-2)

- Coors, V. (2003b). 3D-GIS in networking environments. *Computers, Environment and Urban Systems*, 27(4), 345–357. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(02\)00035-2](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(02)00035-2)
- Cor, E., Vesson, M., Rolland, E., Schetelat, P., Schiopu, N., & Lebert, A. (2018). A Proposition to Extend CityGML and ADE Energy Standards for Exchanging Information for LCA Simulation at Urban Scale Adélaïde. *Designing Sustainable Technologies, Products and Policies*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-66981-6>
- Costa, M. C., Santos, P., Patrício, J. M., & Manso, A. (2021). An Interactive Information System That Supports an Augmented Reality Game in the Context of Game-Based Learning. *Multimodal Technologies and Interaction* 2021, Vol. 5, Page 82, 5(12), 82. <https://doi.org/10.3390/MTI5120082>
- Côté, S.; Trudel, P.; Desbiens, M.; Giguère, M.; Snyder, R. Live mobile panoramic high accuracy augmented reality for engineering and construction. In *Proceedings of the 13th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, London, UK, 30–31 October 2013; pp. 1–10.
- Cranmer, E.E.; tom Dieck, M.C.; Fountoulaki, P. Exploring the value of augmented reality for tourism. *Tour. Manag. Perspect.* 2020,
- Czyńska, K., & Rubinowicz, P. (2014). Application of 3D virtual city models in urban analyses of tall buildings : today practice and future challenges. *Architecturae et Artibus*, 6(1), 9–13.
- Dampage, U., Egodagamage, D. A., Waidyaratne, A. U., DIssanayaka, D. A. W., & Senarathne, A. G. N. M. (2021). Spatial Augmented Reality Based Customer Satisfaction Enhancement and Monitoring System. *IEEE Access*, 9, 97990–98004. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3093829>
- Dao, T. H. D., Zhou, Y., Thill, J. C., & Delmelle, E. (2012). Spatio-temporal location modeling in a 3D indoor environment: The case of AEDs as emergency medical devices. *International Journal of Geographical Information Science*, 26(3), 469–494. <https://doi.org/10.1080/13658816.2011.597753>
- Datcu, D., Lukosch, S., & Brazier, F. (2015). On the Usability and Effectiveness of Different Interaction Types in Augmented Reality, 31(3), 193–209. <https://doi.org/10.1080/10447318.2014.994193>
- Date, S., Date, A., Date, P., Editor, E. G., Heazel, C., Geospatial, O., To, C., This, W., Standard, O. G. C., Guidance, E., Citygml, O. G. C., Standard, C. M., Standard, O. G. C., Guidance, E., Document, E. G., & Document, D. (2021). Open Geospatial Consortium OGC City Geography Markup Language (CityGML) 3 . 0 Conceptual Model Users Guide. <https://docs.ogc.org/guides/20-066.html>
- De Kluijver, H., & Stoter, J. (2003). Noise mapping and GIS: Optimising quality and efficiency of noise effect studies. *Computers, Environment and Urban Systems*, 27(1), 85–102. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(01\)00038-2](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(01)00038-2)
- De La Losa, A., & Cervele, B. (1999). 3D Topological modeling and visualisation for 3D GIS. *Computers & Graphics*, 23(4), 469–478. [https://doi.org/10.1016/S0097-8493\(99\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S0097-8493(99)00066-7)
- De Roo, B., Bourgeois, J., & De Maeyer, P. (2017). Usability assessment of a virtual globe-based 4D archaeological GIS. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 0(9783319256894), 323–335. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25691-7_18

- Donkers, S., Ledoux, H., Zhao, J., & Stoter, J. (2016). Automatic conversion of IFC datasets to geometrically and semantically correct CityGML LOD3 buildings. *Transactions in GIS*, 20(4), 547–569. <https://doi.org/10.1111/TGIS.12162>
- Duffy-Deno, K. T., & Eberts, R. W. (1989). Public Infrastructure and Regional Economic Development: A Simultaneous Equations Approach. Working Paper, 89–09. <https://www.clevelandfed.org/publications/working-paper/1989>
- Dutta, A., Saran, S., & Senthil Kumar, A. (2017). Development of CityGML Application Domain Extension for Indoor Routing and Positioning. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 45(6), 993–1004. <https://doi.org/10.1007/s12524-017-0665-y>
- Dwivedi, Y. K., Ismagilova, E., Hughes, D. L., Carlson, J., Filieri, R., Jacobson, J., Jain, V., Karjaluoto, H., Kefi, H., Krishen, A. S., Kumar, V., Rahman, M. M., Raman, R., Rauschnabel, P. A., Rowley, J., Salo, J., Tran, G. A., & Wang, Y. (2021). Setting the future of digital and social media marketing research: Perspectives and research propositions. *International Journal of Information Management*, 59, 102168. <https://doi.org/10.1016/J.IJINFOMGT.2020.102168>
- Edert, J., & Gesquière, G. (2016). Temporal ADE for CityGML Use cases. https://www.lirmm.fr/ModuleImage/Gesquiere_2016.pdf
- Egenhofer, M. J. (1989). A formal definition of binary topological relationships. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 367 LNCS, 457–472. https://doi.org/10.1007/3-540-51295-0_148/COVER
- Eleanor E. Cranmer, M. Claudia tom Dieck, Paraskevi Fountoulaki, Exploring the value of augmented reality for tourism, *Tourism Management Perspectives*, Volume 35, 2020, 100672, ISSN 2211-9736, <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2020.100672>.
- Ellul, C., & Haklay, M. (2006a). Requirements for topology in 3D GIS. *Transactions in GIS*, 10(2), 157–175. <https://doi.org/10.1111/J.1467-9671.2006.00251.X>
- Eriksson, H., Johansson, T., Olsson, P. O., Andersson, M., Engvall, J., Hast, L., & Harrie, L. (2020). Requirements, development, and evaluation of a national building standard—a Swedish case study. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/ijgi9020078>
- Fan, H., Yang, A., & Zipf, A. (2016). Intrinsic OSM data quality assessment The intrinsic quality assessment of building footprints data on OpenStreetMap in Baden- Württemberg (pp. 253–260). <https://www.researchgate.net/publication/311249851>
- Fassi, F., Achille, C., Mandelli, A., Rechichi, F., & Parri, S. (2015). A NEW IDEA OF BIM SYSTEM FOR VISUALIZATION, WEB SHARING AND USING HUGE COMPLEX 3D MODELS FOR FACILITY MANAGEMENT. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5-W4(5W4), 359–366. <https://doi.org/10.5194/ISPRSARCHIVES-XL-5-W4-359-2015>
- Fath, K., Stengel, J., Sprenger, W., Wilson, H. R., Schultmann, F., & Kuhn, T. E. (2015). A method for predicting the economic potential of (building-integrated) photovoltaics in urban areas based on hourly Radiance simulations. *Solar Energy*, 116, 357–370. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2015.03.023>

- Feiner, S.; MacIntyre, B.; Höllerer, T.; Webster, A. A touring machine: Prototyping 3D mobile augmented reality systems for exploring the urban environment. *Pers. Technol.* 1997, 1, 208–217. <http://doi.org/10.1007/BF01682023>
- Fenais, A.; Ariaratnam, S.T.; Ayer, S.K.; Smilovsky, N. Integrating geographic information systems and augmented reality for mapping underground utilities. *Infrastructures* 2019, 4, 60. <http://doi.org/10.3390/infrastructures4040060>
- Fischer, M. M., & Wang, J. (2011). Spatial Data Analysis. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-21720-3>
- Fra, D. T., Erling, T. K., Uml, T., & Arcgis, G. E. (2017). GISTools. 4–7.
- Frolov, Yu. S. (1975). Measuring the shape of geographical phenomena: A history of the issue. *Soviet Geography*, 16(10), 676–687. <https://doi.org/10.1080/00385417.1975.10640104>
- Garner, K. H., & Singla, D. K. (2018). 3D modeling: a future of cardiovascular medicine1. *Https://Doi.Org/10.1139/Cjpp-2018-0472*, 97(4), 277–286. <https://doi.org/10.1139/CJPP-2018-0472>
- Geogr. Compass 2015, 9, 14–26. <http://doi.org/10.1111/gec3.12193>
- George, E., Liacouras, P., Rybicki, F. J., & Mitsouras, D. (2017). Measuring and Establishing the Accuracy and Reproducibility of 3D. <https://doi.org/10.1148/RG.2017160165>
- Ghassoun, Y., Löwner, M. O., & Weber, S. (2015). Exploring the benefits of 3D city models in the field of urban particles distribution modelling—A comparison of model results. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, PartF3*, 193–205. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12181-9_12
- Ghassoun, Y., Ruths, M., Löwner, M. O., & Weber, S. (2015). Intra-urban variation of ultrafine particles as evaluated by process related land use and pollutant driven regression modelling. *Science of the Total Environment*, 536, 150–160. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.07.051>
- Ghazwani, Y., & Smith, S. (2020). Interaction in Augmented Reality. 39–44. <https://doi.org/10.1145/3385378.3385384>
- Giertsen, C., & Lucas, A. (1994). 3D Visualization for 2D GIS: an Analysis of the Users' Needs and a Review of Techniques*. *Computer Graphics Forum*, 13(3), 1–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1467-8659.1330001>
- Gilbert, J.K. Visualization: A metacognitive skill in science and science education. In *Visualization in Science Education*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2005; pp. 9–27. http://doi.org/10.1007/1-4020-3613-2_2
- Giorgis, S.; Mahlen, N.; Anne, K. Instructor-led approach to integrating an augmented reality sandbox into a large-enrollment introductory geoscience course for nonmajors produces no gains. *J. Geosci. Educ.* 2017, 65, 283–291. <http://doi.org/10.5408/17-255.1>
- Glander, T., & Dollner, J. (2008). Techniques for generalizing building geometry of complex virtual 3D City models. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 381–400. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72135-2_21
- Goetz, M., & Zipf, A. (2012). Towards Defining a Framework for the Automatic Derivation of 3D CityGML Models from Volunteered Geographic Information. *International Journal of 3-D Information Modeling*, 1(2), 1–16. <https://doi.org/10.4018/IJ3DIM.2012040101>

- González, E.A.; Souvestre, F.; Benito, J.R.L. Augmented reality interface for E2LP: Assistance in electronic laboratories through augmented reality. In *Embedded Engineering Education*; Springer: Rotterdam, The Netherlands, 2016; pp. 93–108.
http://doi.org/10.1007/978-3-319-27540-6_6
- Graham, S. (2000). Constructing premium network spaces: reflections on infrastructure networks and contemporary urban development. *International Journal of Urban and Regional Research*, 24(1), 183–200. <https://doi.org/10.1111/1468-2427.00242>
- Gröger, G., & Plümer, L. (2012). Transaction rules for updating surfaces in 3D GIS. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 69, 134–145.
<https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2012.03.004>
- Gröger, G., Kolbe, T. H., Czerwinski, A., & Nagel, C. (2008). OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. Open Geospatial Consortium August 2008, 08-007r1, 234. <http://www.opengis.net/spec/citygml/2.0>
- Gröger, G., Kutzner, T., & Kolbe, T. (2013). A CityGML-based encoding for the INSPIRE Data Specification on Buildings. <https://www.semanticscholar.org>
- Gruber, U., Riecken, J., & Seifert, M. (2014). Germany on the way to 3D-cadastre. *ZfV - Zeitschrift Fur Geodasie, Geoinformation Und Landmanagement*, 139(4), 223–228.
<https://doi.org/10.12902/zfv-0028-2014>
- Guo, Y.; Du, Q.; Luo, Y.; Zhang, W.; Xu, L. Application of augmented reality GIS in architecture. *ISPRS VIII 2008*, 37, 331–336.
- Hamaina, R., Leduc, T., & Moreau, G. (2013). A New Method to Characterize Density Adapted to a Coarse City Model. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 249–263. <https://www.academia.edu/30253306>
- Han, D.-I.; Jung, T.; Gibson, A. *Dublin AR: Implementing augmented reality in tourism*. In *Information and Communication Technologies in Tourism 2014*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013; pp. 511–523.
- Harman, P. (2000). Home based 3D entertainment-an overview. *Proceedings 2000 International Conference on Image Processing (Cat. No.00CH37101)*, 1, 1–4 vol.1.
<https://doi.org/10.1109/ICIP.2000.900877>
- Hassan, M., Ghosh, P., Tesch, J., Tzionas, D., & Black, M. J. (2021). Populating 3D Scenes by Learning Human-Scene Interaction (pp. 14708–14718). <https://posa.is.tue.mpg.de>.
- Havard, V., Baudry, D., Louis, A., & Mazari, B. (2015). Augmented reality maintenance demonstrator and associated modelling. *2015 IEEE Virtual Reality Conference, VR 2015 - Proceedings*, 329–330. <https://doi.org/10.1109/VR.2015.7223429>
- Hecht, R., Kunze, C., & Hahmann, S. (2013). Measuring Completeness of Building Footprints in OpenStreetMap over Space and Time. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2(4), 1066–1091. <https://doi.org/10.3390/ijgi2041066>
- Hecht, R., Meinel, G., & Buchroithner, M. (2015a). Automatic identification of building types based on topographic databases – a comparison of different data sources. *International Journal of Cartography*, 1(1), 18–31. <https://doi.org/10.1080/23729333.2015.1055644>

- Hecht, R., Meinel, G., & Buchroithner, M. (2015b). Automatic identification of building types based on topographic databases – a comparison of different data sources. <https://doi.org/10.1080/23729333.2015.1055644>
- Helbich, M., Jochem, A., Mücke, W., & Höfle, B. (2013). Boosting the predictive accuracy of urban hedonic house price models through airborne laser scanning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 39, 81–92. <https://doi.org/10.1016>
- Herbert, G. D., & Chen, X. (2015). A comparison of usefulness of 2D and 3D representations of urban planning. *Cartography and Geographic Information Science*, 42, 22–32. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:140590650>
- Herring, J. (1990). A mathematical framework for the definition of topological relationships. Fourth International Symposium. <https://www.academia.edu/1420008>
- Hijazi, I., Ehlers, M., Zlatanova, S., Becker, T., & van Berlo, L. (2011). Initial Investigations for Modeling Interior Utilities Within 3D Geo Context: Transforming IFC-Interior Utility to CityGML/UtilityNetworkADE. 95–113. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12670-3_6
- Hijazi, I., Kolbe, T. H., & Kutzner, T. (2017). Use Cases and their Requirements on the Semantic Modeling of 3D Supply and Disposal Networks. 37. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung Der DGPF in Würzburg – Publikationen Der DGPF, Band 26, 2017 Use, September, 288–301. <https://www.researchgate.net/publication/316552453>
- Hoel, E. (2009). Topological Data Models. *Encyclopedia of Database Systems*, 3132–3140. https://doi.org/10.1007/978-0-387-39940-9_431
- Hsieh, C. M., Aramaki, T., & Hanaki, K. (2011). Managing heat rejected from air conditioning systems to save energy and improve the microclimates of residential buildings. *Computers, Environment and Urban Systems*, 35(5), 358–367. <https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2011.02.001>
- Huang, J.; Ong, S.-K.; Nee, A.Y. Real-time finite element structural analysis in augmented reality. *Adv. Eng. Softw.* 2015, 87, 43–56. <http://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.04.014>
- Huang, J.; Ong, S.-K.; Nee, A.Y. Visualization and interaction of finite element analysis in augmented reality. *Comput.-Aided Des.*
- Huang, W., Sun, M., & Li, S. (2016). A 3D GIS-based interactive registration mechanism for outdoor augmented reality system. *Expert Systems with Applications*, 55, 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.01.037>
- Huey, L.C.; Sebastian, P.; Drieberg, M. Augmented reality based indoor positioning navigation tool. In *Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Open Systems*, Langkawi, Malaysia, 25–28 September 2011. <http://doi.org/10.1109/ICOS.2011.6079276>
- InGeoForum: Information and Cooperation Forum for Geodata of ZGDV e.V. (2013). <https://www.ingeoforum.de/en.html>
- INSPIRE Thematic Working Group - WUR. (2013). <https://www.wur.nl/en/project/INSPIRE-Thematic-Working-Group.htm>
- Ionescu, C., Papava, D., Olaru, V., & Sminchisescu, C. (2014). Human3.6M: Large scale datasets and predictive methods for 3D human sensing in natural environments. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 36(7), 1325–1339. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2013.248>

- Isikdag, U., & Zlatanova, S. (2010). Interactive modelling of buildings in Google Earth: A 3D tool for urban planning. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 0, 52–70. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04791-6_4
- Ismael Chivite. (2017). AuGeo: An Augmented Reality mobile app for your GIS data. <https://www.esri.com/arcgis>
- ISO - ISO 19109:2015 - Geographic information — Rules for application schema. (2015). <https://www.iso.org/standard/59193.html>
- ISO - ISO 19118:2011 - Geographic information — Encoding. (2011). <https://www.iso.org/standard/44212.html>
- ISO - ISO 19136:2007 - Geographic information — Geography Markup Language (GML). (2007). <https://www.iso.org/standard/32554.html>
- Iyendo Jnr, T., & Alibaba, H. (2015). Computer aided design (CAD) technology versus students' learning in architectural design pedagogy – A controversial topic review. *International Journal of Development Research*, 5, 3152–3158.
- J.M. Huang, S.K. Ong, A.Y.C. Nee, Visualization and interaction of finite element analysis in augmented reality, *Computer-Aided Design*, Volume 84, 2017, Pages 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.10.004>.
- Jamali, A. (2012). Semantic modelling for geo-database using CITYGML4J. <https://www.researchgate.net/publication/322767619>
- Jasche, F., Hofmann, S., & Ludwig, T. (2021). Comparison of different types of augmented reality visualizations for instructions. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3411764.3445724>
- Jayaraj, P., & Ramiya, A. M. (2018). 3D CITYGML BUILDING MODELLING FROM LIDAR POINT CLOUD DATA. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-175-2018>
- Jia, X., & Guo, Q. (2011). The preliminary study on 3D terrain visualization. *Communications in Computer and Information Science*, 238 CCIS, 178–184. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24273-1_24/COVER
- Jobst, M., & Germanchis, T. (2007). The employment of 3D in cartography - An overview. *Multimedia Cartography: Second Edition*, 217–228. https://doi.org/10.1007/978-3-540-36651-5_15
- Jokela, J. (2016). CityGML building model production from airborne laser scanning. Undefined. <https://core.ac.uk>
- Josephat, M., Oloo, O., & Van Der Krapf, M. (2015). Spatial data infrastructure and voluntary geographic information. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, 2(1), 3159–3199. www.jmest.org
- Joshi, S., Saxena, S., Godbole, T., & Shreya. (2016). Developing Smart Cities: An Integrated Framework. *Procedia Computer Science*, 93, 902–909. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2016.07.258>
- Kaddioui, A.; Shahrour, I.; El Oirrak, A. Uses of augmented reality for urban utilities management. *MATEC Web Conf.* 2019, 295, 8. <http://doi.org/10.1051/mateconf/201929502009>

- Kaden, R., & Kolbe, T. H. (2014). Simulation-Based Total Energy Demand Estimation of Buildings using Semantic 3D City Models. *International Journal of 3-D Information Modeling*, 3(2), 35–53. <https://doi.org/10.4018/IJ3DIM.2014040103>
- Kamilaris, A., Wohlgemuth, V., Karatzas, K., & Athanasiadis, I. N. (Eds.) (2021). *Advances and New Trends in Environmental Informatics: Digital Twins for Sustainability*. (Progress in IS). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-61969-5>
- Kaňuk, J., Gallay, M., & Hofierka, J. (2015). Generating time series of virtual 3-D city models using a retrospective approach. *Landscape and Urban Planning*, 139, 40–53. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2015.02.015>
- Kaufmann, H.; Meyer, B. Simulating educational physical experiments in augmented reality. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Asia 2008 Educators Programme*, Singapore, 10–13 December 2008; pp. 1–8. <http://doi.org/10.1145/1507713.1507717>
- Kavisha, K. (2020). Modelling and managing massive 3D data of the built environment. <https://doi.org/10.4233/UUID:47218911-C93D-4295-A3DE-231D023C1743>
- Kemec, S., & Duzgun, H. S. (2006). Use of 3D visualization in natural disaster risk assessment for urban areas. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 557–566. https://doi.org/10.1007/978-3-540-36998-1_43/COVER
- Kemec, S., Zlatanova, S., & Duzgun, H. S. (2010). A framework for defining a 3D model in support of risk management. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 0, 69–82. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03442-8_5
- Kerski, J.J. Geo-awareness, geo-enablement, geotechnologies, citizen science, and storytelling: Geography on the world stage.
- Kim, K. H., & Wilson, J. P. (2015). Planning and visualising 3D routes for indoor and outdoor spaces using CityEngine. *Journal of Spatial Science*, 60(1), 179–193. <https://doi.org/10.1080/14498596.2014.911126>
- Kim, M., Lee, D., Kim, T., Oh, S., & Cho, H. (2023). Automated extraction of geometric primitives with solid lines from unstructured point clouds for creating digital buildings models. *Automation in Construction*, 145, 104642. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2022.104642>
- Kirakosian, S., Daskalogrigorakis, G., Maravelakis, E., & Mania, K. (2021). Near-contact Person-to-3D Character Dance Training: Comparing AR and VR for Interactive Entertainment. *IEEE Conference on Computational Intelligence and Games, CIG*, 2021-August. <https://doi.org/10.1109/COG52621.2021.9619037>
- KIT - Karlsruhe Institute of Technology. (2021). <https://www.kit.edu/english/>
- Kolbe, T. H. (2003). Towards unified 3D city models. https://www.academia.edu/51413472/Towards_unified_3D_city_models
- Kolbe, T. H. (2009). Representing and exchanging 3D city models with CityGML. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 15–31. https://doi.org/10.1007/978-3-540-87395-2_2
- Konde, A. (2015). Web Based Spatio-Semantic Analysis of Traffic Noise Using 3D Geospatial Information. <https://www.academia.edu/82847067>

- Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., & Chamzas, C. (2007). On 3D reconstruction of the old city of Xanthi. A minimum budget approach to virtual touring based on photogrammetry. *Journal of Cultural Heritage*, 8(1), 26–31. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2006.08.003>
- Krüger, A., Kolbe, T. H., Krüger, A., & Kolbe, T. H. (2012). Building Analysis for Urban Energy Planning Using Key Indicators on Virtual 3d City Models - the Energy Atlas of Berlin. *ISPRAr*, 39B2, 145–150. <https://doi.org/10.5194/ISPRSARCHIVES-XXXIX-B2-145-2012>
- Kuffer, M. (2008). 3D Noise Modeling for Urban Environmental Planning and Management. , Vienna, Austria, CORP–Competence Center of <https://www.academia.edu/26227538>
- Kumar, K., Ledoux, H., & Stoter, J. (2016). A CityGML extension for handling very large TINs. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(2W1), 137–143. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W1-137-2016>
- Kumar, K., Ledoux, H., & Stoter, J. (2018). Compactly representing massive terrain models as TINs in CityGML. *Transactions in GIS*, 22(5), 1152–1178. <https://doi.org/10.1111/tgis.12456>
- Kumar, K., Ledoux, H., Commandeur, T. J. F., & Stoter, J. E. (2017). Modelling urban noise in CityGML ADE: Case of the Netherlands. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(4W5), 73–81. <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ANNALS-IV-4-W5-73-2017>
- Kundu, S.N.; Muhammad, N.; Sattar, F. Using the augmented reality sandbox for advanced learning in geoscience education. In *Proceedings of the 2017 IEEE 6th International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE)*, Hong Kong, China, 12–14 December 2017. <http://doi.org/10.1109/TALE.2017.8252296>
- Kunze, C., & Hecht, R. (2015). Semantic enrichment of building data with volunteered geographic information to improve mappings of dwelling units and population. *Comput. Environ. Urban Syst.*, 53, 4–18. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:206937953>
- Kutzner, G. T., Writer, C., Writer, C., Fme, E., Utilitynetwork, C., The, A. D. E., Writer, C., Writer, C., Ade, C. U., Writer, C., Writer, A., Writer, T. A., Dataset, C., & Definition, F. T. (2017). Importing the CityGML UtilityNetwork ADE in an FME Workspace. 2–5. <https://github.com/TatjanaKutzner>
- Kutzner, T., & Kolbe, T. H. (2016). Extending Semantic 3D City Models by Supply and Disposal Networks for Analysing the Urban Supply Situation. 36. *Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung Der DGPF*, 13. <https://www.researchgate.net/publication/304158830>
- Kutzner, T., Chaturvedi, K., & Kolbe, T. H. (2020). CityGML 3.0: New Functions Open Up New Applications. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(1), 43–61. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00095-z>
- Kwan, M. P., & Lee, J. (2005). Emergency response after 9/11: the potential of real-time 3D GIS for quick emergency response in micro-spatial environments. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(2), 93–113. <https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2003.08.002>
- Kwiatek, C.; Sharif, M.; Li, S.; Haas, C.; Walbridge, S. Impact of augmented reality and spatial cognition on assembly in construction. *Autom. Constr.* 2019, 108, 102935. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102935>

- Kyza, E. A., & Georgiou, Y. (2018). Scaffolding augmented reality inquiry learning: the design and investigation of the TraceReaders location-based, augmented reality platform. *Https://Doi.Org/10.1080/10494820.2018.1458039*, 27(2), 211–225.
<https://doi.org/10.1080/10494820.2018.1458039>
- Labetski, A., Kumar, K., Ledoux, H., & Stoter, J. (2018). A metadata ADE for CityGML. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1), 16. <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0057-4>
- LaGarry, H. (2004). TECHNICAL REPORT: North American Geologic-Map Data Model Science Language Technical Team. <https://www.researchgate.net/publication/313194559>
- Landeschi, G., Dell'Unto, N., Lundqvist, K., Ferdani, D., Campanaro, D. M., & Leander Touati, A. M. (2016). 3D-GIS as a platform for visual analysis: Investigating a Pompeian house. *Journal of Archaeological Science*, 65, 103–113.
<https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.11.002>
- Leberl, F. W., Ledner, R., & Walcher, W. (1998). Advances in Built-Up Area 3D GIS Data for Telecommunications. <http://leberl.icg.tugraz.at>
- Ledoux, H., & Meijers, M. (2011). Topologically consistent 3D city models obtained by extrusion. *International Journal of Geographical Information Science*, 25(4), 557–574.
<https://doi.org/10.1080/13658811003623277>
- Ledoux, H., Arroyo Ohori, K., Kumar, K., Dukai, B., Labetski, A., & Vitalis, S. (2019). CityJSON: a compact and easy-to-use encoding of the CityGML data model. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40965-019-0064-0>
- Lee, J. (2004). 3D GIS for geo-coding human activity in micro-scale urban environments. *Springer, Figure 1*, 162–178. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30231-5_11
- Lewis, J. L., Casello, J. M., & Groulx, M. (2012). Effective Environmental Visualization for Urban Planning and Design: Interdisciplinary Reflections on a Rapidly Evolving Technology. *Journal of Urban Technology*, 19(3), 85–106. <https://doi.org/10.1080/10630732.2012.673057>
- Li, L., Luo, F., Zhu, H., Ying, S., & Zhao, Z. (2016). A two-level topological model for 3D features in CityGML. *Computers, Environment and Urban Systems*, 59, 11–24.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2016.04.007>
- Li, Q., Sun, X., Yang, B., & Jiang, S. (2013). Geometric structure simplification of 3D building models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 84, 100–113.
<https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2013.07.006>
- Lim, J., Janssen, P., Biljecki, F., & Biljecki, F. (2020). Visualising detailed CityGML and ADE at the building scale. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 44(4/W1), 83–90.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-4-W1-2020-83-2020>
- Limpisathian, B. P., Brewer, C. A., & Perkins, S. W. (2015). Custom Cartography of Frank Lloyd Wright Sites for UNESCO World Heritage Nomination. 27th International Cartographic Conference.
- Lin, P.-J.; Kao, C.-C.; Lam, K.-H.; Tsai, I.-C. Design and implementation of a tourism system using mobile augmented reality and GIS technologies. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Technologies and Engineering Systems (ICITES2013)*, Kaohsiung, Taiwan, 12–14 December 2013. http://doi.org/10.1007/978-3-319-04573-3_133

- Liu, R., & Issa, R. R. A. (2012). 3D visualization of sub-surface pipelines in connection with the building utilities: Integrating GIS and BIM for facility management. Congress on Computing in Civil Engineering, Proceedings, 341–348.
<https://doi.org/10.1061/9780784412343.0043>
- Liu, Y. B., Gebremeskel, S., De Smedt, F., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2003). A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling. *Journal of Hydrology*, 283(1–4), 91–106. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00242-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00242-7)
- Lovreglio, R., & Kinateder, M. (2020). Augmented reality for pedestrian evacuation research: Promises and limitations. *Safety Science*, 128, 104750.
<https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2020.104750>
- Luchetti, G.; Mancini, A.; Sturari, M.; Frontoni, E.; Zingaretti, P. Whistland: An augmented reality crowd-mapping system for civil protection and emergency management. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2017, 6, 41. <http://doi.org/10.3390/ijgi6020041>
- Maciej Serda, Becker, F. G., Cleary, M., Team, R. M., Holtermann, H., The, D., Agenda, N., Science, P., Sk, S. K., Hinnebusch, R., Hinnebusch A, R., Rabinovich, I., Olmert, Y., Uld, D. Q. G. L. Q., Ri, W. K. H. U., Lq, V., Frxqwu, W. K. H., Zklfk, E., Edvhg, L. V, ... ح. ف. اطمى. (2013). 3D City Modelling for Planning Activities, Case Study: Haydarpasa Train Station, Haydarpasa Port and Surrounding Backside Zones, Istanbul. *Uniwersytet Śląski*, 7(1), 343–354. <https://doi.org/10.2/JQUERY.MIN.JS>
- Mandel, A., Ferrero, V. O., Graser, A., & Bruy, A. (2016). QGIS 2 Cookbook.
<https://www.packtpub.com/product/qgis-2-cookbook/9781783984961>
- Mantha, B., García de Soto, B., & Karri, R. (2021). Cyber security threat modeling in the AEC industry: An example for the commissioning of the built environment. *Sustainable Cities and Society*, 66, 102682. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2020.102682>
- Maragkogiannis, K., Kolokotsa, D., Maravelakis, E., & Konstantaras, A. (2014). Combining terrestrial laser scanning and computational fluid dynamics for the study of the urban thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, 13, 207–216.
<https://doi.org/10.1016/J.SCS.2013.12.002>
- Marina, O., Masala, E., Pensa, S., & Stavric, M. (2012). Interactive model of urban development in residential areas in Skopje. 02004. <https://doi.org/10.1051/3U3D/201202004>
- Métral, C., Falquet, G., & Vonlanthen, M. (2007). An ontology-based model for urban planning communication. *Studies in Computational Intelligence*, 61, 61–72.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-71976-2_6
- Michael Goodchild. (1985). Geographic information systems in undergraduate geography: a contemporary dilemma. *Operational Geographer*, 8(1), 34–38.
<https://doi.org/10.2/JQUERY.MIN.JS>
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Trans. Information Systems*, E77-D, no. 12, 1321–1329.
<https://www.researchgate.net/publication/231514051>
- Mine, M. R., Van Baar, J., Grundhöfer, A., Rose, D., & Yang, B. (2012). Projection-based augmented reality in Disney theme parks. *Computer*, 45(7), 32–40.
<https://doi.org/10.1109/MC.2012.154>

- Mirzakhani, M., Ashrafzadeh, H., & Ashrafzadeh, A. (2010). The virtual university: Advantages and disadvantages. ICDLE 2010 - 2010 4th International Conference on Distance Learning and Education, Proceedings, 32–36. <https://doi.org/10.1109/ICDLE.2010.5606048>
- Mitaritonna, A., Abasolo, M. J., & Montero, F. (2020). An Augmented Reality-based Software Architecture to Support Military Situational Awareness.. <https://doi.org/10.1109/ICECCE49384.2020.9179187>
- Model, C., & Swg, O. G. C. C. (2018). Notes on the CityGML 3 . 0 Conceptual Model. January. <https://docs.ogc.org/guides/20-066.html>
- Molenaar, M. (1990). A formal data structure for three-dimensional vector maps. <https://doi.org/10.3/JQUERY-UI.JS>
- Molenaar, M. (1992). A topology for 3-D vector maps. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. <https://research.wur.nl/en/publications/a-topology-for-3-d-vector-maps>
- Morrison, A.; Oulasvirta, A.; Peltonen, P.; Lemmela, S.; Jacucci, G.; Reitmayr, G.; Näsänen, J.; Juustila, A. Like bees around the hive: A comparative study of a mobile augmented reality map. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Paris, France, 27 April–2 May 2013. <http://doi.org/10.1145/1518701.1518991>
- Musialski, P., Wonka, P., Aliaga, D. G., Wimmer, M., Van Gool, L., & Purgathofer, W. (2013). A survey of urban reconstruction. Computer Graphics Forum, 32(6), 146–177. <https://doi.org/10.1111/CGF.12077/ABSTRACT>
- Musolesi, M. (2014). Big mobile data mining: Good or evil? IEEE Internet Computing, 18(1), 78–81. <https://doi.org/10.1109/MIC.2014.2>
- Naps, T.; Cooper, S.; Koldehofe, B.; Leska, C.; Rößling, G.; Dann, W.; Korhonen, A.; Malmi, L.; Rantakokko, J.; Ross, R.J. Evaluating the educational impact of visualization. Acm Sigcse Bull. 2003, 35, 124–136. <http://doi.org/10.1145/960492.960540>
- Nguyen-Gia, T.-A., Dao, M.-S., & Mai-Van, C. (2017). A comparative survey of 3D GIS models. 2017 4th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science, 126–131. <https://doi.org/10.1109/NAFOSTED.2017.8108051>
- Nicholls, G., & Ist, P. (2013). Using augmented reality as an extension to utility GIS. PositionIT, February, 62–64. <https://www.springerprofessional.de>
- Norris, T. B. (2017). Public Participation GIS, Participatory GIS, and Participatory Mapping. Geography. <https://doi.org/10.1093/OBO/9780199874002-0160>
- Nouvel, R., Bahu, J., Kaden, R., Kaempf, J., Cipriano, P., Munich, T. U., & Hamburg, H. C. U. (2015). Development of the citygml application domain extension energy for urban energy simulation. <https://doi.org/10.26868/25222708.2015.2863>
- Nouvel, R., Kaden, R., Bahu, J.-M., Kaempf, J., Cipriano, P., Lauster, M., Benner, J., Munoz, E., Tournaire, O., & Casper, E. (2015). Genesis of the CityGML Energy ADE. Proceedings of International Conference CISBAT 2015 “Future Buildings and Districts – Sustainability from Nano to Urban Scale”, 931–936. <https://doi.org/10.5075/EPFL-CISBAT2015-931-936>
- Nurminen, A. (2008). Mobile 3D city maps. IEEE Computer Graphics and Applications, 28(4), 20–31. <https://doi.org/10.1109/MCG.2008.75>
- OGC. (2019). CityGML and AR Engineering Report. <https://docs.ogc.org/per/18-025.html>

- Ohori, K. A., Biljecki, F., Kumar, K., Ledoux, H., & Stoter, J. (2018). Modeling cities and landscapes in 3D with CityGML. *Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice*, 199–215. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3_11/COVER
- Ohori, K., Ledoux, H., Biljecki, F., & Stoter, J. (2015). Modeling a 3D City Model and Its Levels of Detail as a True 4D Model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(3). <https://doi.org/10.3390/ijgi4031055>
- Oosterom, P. Van, & Fendel, E. (2016). 4 th International Workshop on 3D Cadastres Proceedings 4 th International Workshop on 3D Cadastres. 4th INTERNATIONAL WORKSHOP ON 3D CADASTRES.
- Open Geospatial Consortium. (2012). OGC.CityGML UML diagrams Version 2.0. 12, 2002–2012. <http://www.citygml.org/fileadmin/citygml>
- Over, M., Schilling, A., Neubauer, S., & Zipf, A. (2010). Generating web-based 3D City Models from OpenStreetMap: The current situation in Germany. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(6), 496–507. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2010.05.001>
- ÖZKUL, E.; KUMLU, S.T. Augmented reality applications in tourism. *Int. J. Contemp. Tour. Res.* 2019, 3, 107–122. <http://doi.org/10.30625/ijctr.625192>
- Papadopoulou, E.-E.; Kasapakis, V.; Vasilakos, C.; Papakonstantinou, A.; Zouros, N.; Chroni, A.; Soulakellis, N. Geovisualization of the Excavation Process in the Lesvos Petrified Forest, Greece Using Augmented Reality. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2020, 9, 374. <http://doi.org/10.3390/ijgi9060374>
- Papagiannakis, G., Singh, G., & Magnenat-Thalmann, N. (2008). A survey of mobile and wireless technologies for augmented reality systems. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 19. <https://doi.org/10.1002/cav.221>
- Peddie, J. (2017). Types of Augmented Reality. *Augmented Reality*, 29–46. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54502-8_2
- Pédrinis, F., Morel, M., & Gesquière, G. (2015). Change detection of cities. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, PartF3*, 123–139. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12181-9_8
- Pepe, M., Costantino, D., & Restuccia Garofalo, A. (2020). An Efficient Pipeline to Obtain 3D Model for HBIM and Structural Analysis Purposes from 3D Point Clouds. *Applied Sciences*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/app10041235>
- Perez, D., Kämpf, J., & Scartezzini, J.-L. (2013, June). Simulation of Urban Energy Flow: A Graph Theory Inspired Approach. <https://www.researchgate.net/publication/262843861>
- Pfound M. (2001). 3D GIS Architecture: A topological data structure. <https://www.researchgate.net/publication/293590120>
- Piburn, J.; Morton, A. *The Science Behind Pokemon GO*; Oak Ridge National Lab. (ORNL): Oak Ridge, TN, USA, 2016.
- Pigot, S. (1992). A topological model for a 3-dimensional spatial information system. https://figshare.utas.edu.au/articles/thesis/A_topological_model_for_a_3-dimensional_spatial_information_system/23243285

- Pilouk, M. (1996). Integrated modelling for 3D GIS. <https://core.ac.uk/download/pdf/29332651.pdf>
- Postert, P., Berger, M., & Bill, R. (2021). Utilizing CityGML for AR-Labeling and Occlusion in Urban Spaces. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-61969-5_15
- Prandi, F., Di Staso, U., Berti, M., Giovannini, L., Cipriano, P., & De Amicis, R. (2016). Hybrid approach for large-scale energy performance estimation based on 3D city model data and typological classification. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 153–168. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19602-2_10
- Previtali, M., Barazzetti, L., Brumana, R., Cuca, B., Oreni, D., Roncoroni, F., & Scaioni, M. (2014). Automatic façade modelling using point cloud data for energy-efficient retrofitting. *Applied Geomatics*, 6(2), 95–113. <https://doi.org/10.1007/S12518-014-0129-9>
- Prieto, I., & Izgara, J. L. (2012). Visualization of 3D city models on mobile devices. *Proceedings, Web3D 2012 - 17th International Conference on 3D Web Technology*, 101–104. <https://doi.org/10.1145/2338714.2338731>
- Prilaz, B. (2009). 3D MODEL AND A SCALE MODEL OF THE CITY OF ZAGREB. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:47865886>
- Qin, R. (2014). Change detection on LOD 2 building models with very high resolution spaceborne stereo imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 96, 179–192. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2014.07.007>
- Qingquan, L. (2000). Algorithms for tetrahedral network(ten) generation. *Geo-Spatial Information Science*, 3(1), 11–16. <https://doi.org/10.1007/BF02826801/METRICS>
- Quijano-Sánchez, L., Cantador, I., Cortés-Cediel, M. E., & Gil, O. (2020). Recommender systems for smart cities. *Information Systems*, 92. <https://doi.org/10.1016/J.IS.2020.101545>
- Rahlf, J., Breidenbach, J., Solberg, S., Næsset, E., & Astrup, R. (2014). Comparison of four types of 3D data for timber volume estimation. *Remote Sensing of Environment*, 155, 325–333. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2014.08.036>
- Rahman, A. (2005). Developing Three Dimensional Topological Model for 3D GIS. <https://www.researchgate.net/publication/44387435>
- Rahman, K. S. (2017). The New Utilities: Private Power, Social Infrastructure, and the Revival of the Public Utility Concept. *Cardozo Law Review*, 39. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2986387
- Reza Ranjbar, H., Reza Gharagozlou, A., & Reza Vafaei Nejad, A. (2012). 3D Analysis and Investigation of Traffic Noise Impact from Hemmat Highway Located in Tehran on Buildings and Surrounding Areas. *Journal of Geographic Information System*, 04(04), 322–334. <https://doi.org/10.4236/JGIS.2012.44037>
- Rock, I., di Vita, J., & Barbeito, R. (1981). The effect on form perception of change of orientation in the third dimension. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7(4), 719–732. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.7.4.719>
- Roopavath, U. K., & Kalaskar, D. M. (2017). Introduction to 3D printing in medicine. *3D Printing in Medicine*, 1–20. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100717-4.00001-6>
- Roschlaub, R., & Batscheider, J. (2016). An Inspire-Konform 3D building model of Bavaria using cadastre information, LiDAR and image matching. *International Archives of the*

- Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 41(July), 747–754. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B4-747-2016>
- Roschlaub, R., Batscheider, J., & Internet, H. (2018). Transformation of a Cadastre-Compliant 3D Building Model of Bavaria to INSPIRE *. 13, 62–77. <https://doi.org/10.2902/1725-0463.2018.13.art7>
- Rosman, A.N.; Samsudin, N.A.; Ismail, A.; Aripin, M.S.; Khalid, S.K.A. Augmented reality application for location finder guidance. *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 2019, 13, 1237–1242. <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v13.i3.pp1237-1242>
- Rosser, J., Morley, J., & Smith, G. (2015). Modelling of building interiors with mobile phone sensor data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(2), 1013–1032. <https://doi.org/10.3390/IJGI4020989>
- Roßmann, J., Hoppen, M., & Bücken, A. (2013). Semantic world modelling and data management in a 4D forest simulation and information system. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, XL-2/W2, 65–72. <https://doi.org/10.5194/ISPRSARCHIVES-XL-2-W2-65-2013>
- Rotterdam Analyses City Lidar Data with New Technique | GIM International. (2015). <https://www.gim-international.com/content/>
- Rusu, R. B. (2010). Semantic 3D Object Maps for Everyday Manipulation in Human Living Environments. *KI - Kunstliche Intelligenz*, 24(4), 345–348. <https://doi.org/10.1007/s13218-010-0059-6>
- Sakamoto, H.; Ishida, T. Proposal of a zoo navigation AR application using markerless image processing. In *Proceedings of the International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing*, Fukuoka, Japan, 28–30 October 2021. http://doi.org/10.1007/978-3-030-02607-3_33
- Sam Amirebrahimi Abbas Rajabifard, P. M., & Ngo, T. (2016). A framework for a microscale flood damage assessment and visualization for a building using BIM–GIS integration. *International Journal of Digital Earth*, 9(4), 363–386. <https://doi.org/10.1080/17538947.2015.1034201>
- Saran, S., Wate, P., Srivastav, S. K., & Krishna Murthy, Y. V. N. (2015). CityGML at semantic level for urban energy conservation strategies. *Annals of GIS*, 21(1), 27–41. <https://doi.org/10.1080/19475683.2014.992370>
- Sathish Kumar, D., Arya, D. S., & Vojinovic, Z. (2013). Modeling of urban growth dynamics and its impact on surface runoff characteristics. *Computers, Environment and Urban Systems*, 41, 124–135. <https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2013.05.004>
- Savova, D. AR Sandbox in Educational Programs For Disaster. In *Proceedings of the 6th International Conference on Cartography and GIS*, Albena, Bulgaria, 13–17 June 2016.
- Schaap, J., Zlatanova, S., & van Oosterom, P. J. M. (2011). Towards a 3D geo-data model to support pedestrian routing in multimodal public transport travel advices. *Urban and Regional Data Management: UDMS Annual 2011*, 63–78. <https://doi.org/10.1201/B11647-8>
- Schall, G., Zollmann, S., & Reitmayr, G. (2013). Smart Vidente: Advances in mobile augmented reality for interactive visualization of underground infrastructure. *Personal and Ubiquitous Computing*, 17(7), 1533–1549. <https://doi.org/10.1007/S00779-012-0599-X/METRICS>

- Schneiderbauer, S., & Ehrlich, D. (2005). Population density estimations for disaster management: Case study rural zimbabwe. *Geo-Information for Disaster Management*, 901–921. https://doi.org/10.1007/3-540-27468-5_64
- Senanayake, S. M. A. H., Gunawardana, P. A. M., Perera, B. A. K. S., & Rajaratnam, D. (2023). Examining the potential use of augmented reality in construction cost management tools and techniques. *Journal of Engineering, Design and Technology*. <https://doi.org/10.1108/JEDT-10-2022-0512>
- Sharkawi, K. H., & Rahman, A. A. (2014). Towards an Efficient City Inventory Management System for Urban Authorities in Developing Countries – The Case of 3D Change Detection. *EJISDC: The Electronic Journal on Information Systems in Developing Countries*, ISSN-e 1681-4835, No. 60, 2014 (Ejemplar Dedicado a: The Electronic Journal of Information Systems in Developing Countries), 60, 2. <https://dialnet.unirioja.es>
- Shen, J., Zhou, J., Zhou, J., Herman, L., & Reznik, T. (2020). Constructing the CityGML ADE for the Multi-Source Data Integration of Urban Flooding. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2020, Vol. 9, Page 359, 9(6), 359. <https://doi.org/10.3390/IJGI9060359>
- Shi, W., Yang, B., & Li, Q. (2003a). An object-oriented data model for complex objects in three-dimensional geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(5), 411–430. <https://doi.org/10.1080/1365881031000086974>
- Shi, W., Yang, B., & Li, Q. (2003b). An object-oriented data model for complex objects in three-dimensional geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(5), 411–430. <https://doi.org/10.1080/1365881031000086974>
- Shiravi, S., Zhong, M., Beykaei, S. A., Hunt, J. D., & Abraham, J. E. (2015). An assessment of the utility of LiDAR data in extracting base-year floorspace and a comparison with the census-based approach. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 42(4), 708–729. <https://doi.org/10.1068/B130144P>
- Simons, B., Boisvert, E., Brodaric, B., Cox, S., Duffy, T. R., Johnson, B. R., Laxton, J. L., & Richard, S. (2006). GeoSciML: Enabling the Exchange of Geological Map Data. *ASEG Extended Abstracts*, 2006(1), 1–4. <https://doi.org/10.1071/ASEG2006AB162>
- Slingsby, A., & Raper, J. (2008). Navigable Space in 3D City Models for Pedestrians. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 49–64. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72135-2_3/COVER
- Specht, M.; Ternier, S.; Greller, W. Mobile augmented reality for learning: A case study. *J. Res. Cent. Educ. Technol.* 2011, 7, 117–127.
- STANDARDS FOR SHADOW STUDIES - City of Mississauga. (2014). <https://www.yumpu.com/en>
- Stylianidis, E., Valari, E., Pagani, A., Carrillo, I., Kounoudes, A., Michail, K., & Smagas, K. (2020). Augmented Reality Geovisualisation for Underground Utilities. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(2), 173–185. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00108-x>
- Stylianidis, E.; Valari, E.; Pagani, A.; Carrillo, I.; Kounoudes, A.; Michail, K.; Smagas, K. Augmented Reality Geovisualisation for Underground Utilities. *Pfg-J. Photogramm. Remote Sens. Geoinf. Sci.* 2020, 88, 173–185. <http://doi.org/10.1007/s41064-020-00108-x>

- Sugihara, K., & Shen, Z. (2016). Automatic generation of 3D house models with solar photovoltaic generation for smart city. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICBDSC.2016.7460391>
- Sun, M., & Chen, J. (2006). Ontology method for 3D GIS modeling. *Proc.SPIE*, 6420, 64200D. <https://doi.org/10.1117/12.712671>
- Suveg, I., & Vosselman, G. (2004). Reconstruction of 3D building models from aerial images and maps. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(3–4), 202–224. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2003.09.006>
- Tabrizi, A., & Sanguinetti, P. (2013). Case Study. *International Journal of 3-D Information Modeling*, 2(4), 25–37. <https://www.academia.edu/101390349>
- Tack, F., Buyuksalih, G., & Goossens, R. (2012). 3D building reconstruction based on given ground plan information and surface models extracted from spaceborne imagery. *ISPRS J PHOTOGRAMM*, 67. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.10.003>
- Tan, P. (2014). Image-Based Modeling. *Computer Vision*, 390–392. https://doi.org/10.1007/978-0-387-31439-6_11
- Tan, Y., Liang, Y., & Zhu, J. (2023). CityGML in the Integration of BIM and the GIS: Challenges and Opportunities. *Buildings* 2023, Vol. 13, Page 1758, 13(7), 1758. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13071758>
- Tang, K., & Xu, J. (2012). Research on application of airport simulation system based on 3D GIS. *Applied Mechanics and Materials*, 198–199, 717–720. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.198-199.717>
- Tao, W. (2013). Interdisciplinary urban GIS for smart cities: Advancements and opportunities. *Geo-Spatial Information Science*, 16(1), 25–34. <https://doi.org/10.1080/10095020.2013.774108>
- Tashakkori, H., Rajabifard, A., & Kalantari, M. (2015). A new 3D indoor/outdoor spatial model for indoor emergency response facilitation. *Building and Environment*, 89, 170–182. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.02.036>
- Teramoto, Y., Sato, A., Maruyama, K., & Tomita, H. (2012). Map representation for ubiquitous network robot services. *Proceedings of the 4th ACM SIGSPATIAL International Workshop on Indoor Spatial Awareness, ISA 2012*, 29–32. <https://doi.org/10.1145/2442616.2442623>
- Thill, J. C., Dao, T. H. D., & Zhou, Y. (2011). Traveling in the three-dimensional city: Applications in route planning, accessibility assessment, location analysis and beyond. *Journal of Transport Geography*, 19(3), 405–421. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEQ.2010.11.007>
- Tikhonova, K. V., Solovyova, Y. S., Geydor, V. S., & Tikhonov, D. A. (2021). Technology of three-dimensional laser scanning of real estate objects (3D modeling) in cadastral activities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 937(4), 042071. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/4/042071>
- Tolmer, C. E., Castaing, C., Diab, Y., & Morand, D. (2013). CityGML and IFC: Going further than LOD. *Proceedings of the DigitalHeritage 2013 - Federating the 19th Int'l VSMM, 10th Eurographics GCH, and 2nd UNESCO Memory of the World Conferences, Plus Special Sessions FromCAA, Arqueologica 2.0 κ.ά.*, 1, 645–648. <https://doi.org/10.1109/DIGITALHERITAGE.2013.6743808>

- Toth, C., & Józków, G. (2016). Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 22–36.
<https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2015.10.004>
- Trapp, M., Semmo, A., Pokorski, R., Herrmann, C. D., Döllner, J., Eichhorn, M., & Heinzemann, M. (2010). Communication of digital cultural heritage in public spaces by the example of roman cologne. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 6436 LNCS, 262–276.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-16873-4_20/COVER
- Tsiliakou, E., Labropoulos, T., & Dimopoulou, E. (2014). Procedural Modeling in 3D GIS Environment. *International Journal of 3-D Information Modeling*, 3(3), 17–34.
<https://doi.org/10.4018/IJ3DIM.2014070102>
- Turkan, Y., Radkowski, R., Karabulut-Ilgu, A., Behzadan, A. H., & Chen, A. (2017). Mobile augmented reality for teaching structural analysis. *Advanced Engineering Informatics*, 34, 90–100. <https://doi.org/10.1016/J.AEI.2017.09.005>
- Tutschku, K. (1998). Demand-based radio network planning of cellular mobile communication systems. *Proceedings - IEEE INFOCOM*, 3, 1054–1061.
<https://doi.org/10.1109/INFCOM.1998.662915>
- Tyler Mitchell. (2005). *Web_Mapping_Illustrated*. O'Reilly Series.
<https://www.oreilly.com/library>
- Uddin, W., Hudson, W. R., & Haas, R. (2013). Public Infrastructure Asset Management. In *Public Infrastructure Asset Management*, Second Edition. McGraw-Hill Education.
<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071820110>
- Unwin, D. (1981). Introductory spatial analysis. *Introductory Spatial Analysis.*, 12(6), 819.
[https://doi.org/10.1016/0098-3004\(86\)90032-4](https://doi.org/10.1016/0098-3004(86)90032-4)
- Upadhyay, G., Kämpf, J. H., & Scartezzini, J.-L. (2014). Ground temperature modelling: The case study of Rue des Maraichers in Geneva. *Proceedings of the EuroGraphics 2014 on Urban Data Modelling and Visualisation*, 1–6.
<https://doi.org/https://doi.org/10.2312/udmv.20141072>
- Ural, S., Hussain, E., & Shan, J. (2011). Building population mapping with aerial imagery and GIS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(6), 841–852. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2011.06.004>
- Valls, F., garcia-almirall, P., Redondo, E., & Fonseca, D. (2014). From Raw Data to Meaningful Information: A Representational Approach to Cadastral Databases in Relation to Urban Planning. *Future Internet*, 6, 612–639. <https://doi.org/10.3390/fi6040612>
- Van den Brink, L., Stoter, J., & Zlatanova, S. (2012). Modeling an Application Domain Extension of Citygml in Uml. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-4/, 11–14.
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxviii-4-c26-11-2012>
- Van den Brink, L., Stoter, J., & Zlatanova, S. (2013). Establishing a national standard for 3D topographic data compliant to CityGML. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(1), 92–113. <https://doi.org/10.1080/13658816.2012.667105>

- Van den Brink, L., Stoter, J., & Zlatanova, S. (2013). UML-based approach to developing a citygml application domain extension. *Transactions in GIS*, 17(6), 920–942. <https://doi.org/10.1111/tgis.12026>
- Van den Brink, L., Van Eekelen, H., & Reuvers, M. (2013). Basisregistratie Grootchalige Topografie: Gegevenscatalogus IMGeo 2.1.1. 0–105. <https://www.geonovum.nl>
- Vandysheva, N., Sapelnikov, S., Van Oosterom, P. J. M., De Vries, M. E., Spiering, B., Wouters, R., Hoogeveen, A., & Penkov, V. (2012). The 3D cadastre prototype and pilot in the Russian Federation. *Proceedings FIG Working Week 2012, Territory, Environment and Cultural Heritage*, Rome, Italy, May 6-10, 2012. <https://repository.tudelft.nl>
- VanHorn, J. E., & Mosurjohn, N. A. (2010). Urban 3D GIS Modeling of Terrorism Sniper Hazards. *Social Science Computer Review*, 28(4), 482–496. <https://doi.org/10.1177/0894439309360836>
- Varduhn, V., Mundani, R. P., & Rank, E. (2015). Multi-resolution models: Recent progress in coupling 3D geometry to environmental numerical simulation. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, PartF3*, 55–69. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12181-9_4
- Verdie, Y., Lafarge, F., & Alliez, P. (2015). LOD generation for urban scenes. *ACM Transactions on Graphics*, 34(3). <https://doi.org/10.1145/2732527>
- Voorstel van het college inzake beleid dakopbouwen Gemeente Den Haag. (2011). <https://denhaag.raadsinformatie.nl>
- Wang, C., Chen, G., Liu, Y., & Horne, M. (2008). Virtual-reality based integrated traffic simulation for urban planning. *Proceedings - International Conference on Computer Science and Software Engineering, CSSE 2008*, 2, 1137–1140. <https://doi.org/10.1109/CSSE.2008.1074>
- Wate, P., & Saran, S. (2015). Implementation of CityGML energy application domain extension (ADE) for integration of urban solar potential indicators using object-oriented modelling approach. <http://Dx.Doi.Org/10.1080>
- Weinhaus, F. M., & Devarajan, V. (1997a). Texture mapping 3D models of real-world scenes. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 29(4), 325–365. <https://doi.org/10.1145/267580.267583>
- Weinhaus, F. M., & Devarajan, V. (1997b). Texture Mapping 3D Models of Real-World Scenes. *ACM Comput. Surv.*, 29(4), 325–365. <https://doi.org/10.1145/267580.267583>
- Wendel, J., Santana Núñez, J. M., & Simons, A. (2017). Semantic 3D city data as virtual and augmented reality: Urban energy modelling. *GIM International*, 31, 30–33. <https://www.researchgate.net/publication/323250686>
- Wesselingh, S. (2007). Visualization of a TEN (Tetrahedral Irregular Network) in a web client. <https://www.semanticscholar.org>
- Wexler, M., & Van Boxtel, J. J. A. (2005). Depth perception by the active observer. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(9), 431–438. <https://doi.org/10.1016/J.TICS.2005.06.018>
- Willenborg, B. (2015). Simulation of explosions in urban space and result analysis based on CityGML City models and a cloud based 3D Web client.

- Willis, A. R., Ganesh, P., Volle, K., Zhang, J., & Brink, K. (2021). Volumetric procedural models for shape representation. *Graphics and Visual Computing*, 4, 200018. <https://doi.org/10.1016/J.GVC.2021.200018>
- Wróżyński, R., Sojka, M., & Pyszny, K. (2016). The application of GIS and 3D graphic software to visual impact assessment of wind turbines. *Renewable Energy*, 96, 625–635. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.016>
- Wu, H., He, Z., & Gong, J. (2010). A virtual globe-based 3D visualization and interactive framework for public participation in urban planning processes. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(4), 291–298. <https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2009.12.001>
- Xiao, C., & Lifeng, Z. (2014). Implementation of mobile augmented reality based on Vuforia and Rawajali. *Proceedings of the IEEE International Conference on Software Engineering and Service Sciences, ICSESS*, 912–915. <https://doi.org/10.1109/ICSESS.2014.6933713>
- Yao, Z. (2019). Domain Extendable 3D City Models – Management , Visualization , and Interaction. <https://doi.org/10.3390/su13168782>
- Yao, Z., & Kolbe, T. H. (2017). Dynamically Extending Spatial Databases to support CityGML Application Domain Extensions using Graph Transformations. 37. <https://www.semanticscholar.org>
- Yao, Z., Nagel, C., Kunde, F., Hudra, G., Willkomm, P., Donaubaue, A., Adolphi, T., & Kolbe, T. H. (2018). 3DCityDB - a 3D geodatabase solution for the management, analysis, and visualization of semantic 3D city models based on CityGML. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0046-7>
- Ying, M., Jiang, J., & Fulin, B. (2002). 3D-CITY MODEL SUPPORTING FOR CCTV MONITORING SYSTEM. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:489019>
- Youn, D.; Seo, S.; Kim, J.-Y. Design and development methodologies of Kkongalmon, a location-based augmented reality game using mobile geographic information. *EURASIP J. Image Video Process.* 2019, 2019, 1. <http://doi.org/10.1186/s13640-018-0395-2>
- Younis, A., Abuzgaia, N., Mesleh, R., & Haas, H. (2017). Quadrature Spatial Modulation for 5G Outdoor Millimeter-Wave Communications: Capacity Analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(5), 2882–2890. <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2670545>
- Yousef, A. (2015). The Use of GIS for 3D Urban Models Reconstruction Based on Aerial Lidar Data. <https://www.researchgate.net>
- Yu, S. M., Han, S. S., & Chai, C. H. (2007). Modeling the value of view in high-rise apartments: A 3D GIS approach. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34(1), 139–153. <https://doi.org/10.1068/B32116>
- Yun, M.; Qimeng, N.; Fang, W.; Ying, L.; Haiyang, J. Application of augmented reality technology in industrial design. In *Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Luoyang, China, 17–19 May 2019.
- Zafari, F.; Gkelias, A.; Leung, K.K. A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2019, 21, 2568–2599. <http://doi.org/10.1109/COMST.2019.2911558>

- Zhan, T., Yin, K., Xiong, J., He, Z., & Wu, S. T. (2020). Augmented Reality and Virtual Reality Displays: Perspectives and Challenges. *IScience*, 23(8), 101397. <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2020.101397>
- Zhang, J., Lawrence, M., & Pottinger, R. (2010). Deriving Construction Features from an IFC Model. *Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering*, 1. <https://www.researchgate.net/publication/252493312>
- Zhang, L., Wang, Y., Shi, H., & Zhang, L. (2012). Modeling and analyzing 3D complex building interiors for effective evacuation simulations. *Fire Safety Journal*, 53, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2012.06.008>
- Zhang, X., Zhu, Q., & Wang, J. (2004). 3D City Models Based Spatial Analysis to Urban Design. *Geographic Information Sciences*, 10(1), 82–86. <https://doi.org/10.1080/10824000409480658>
- Zhang, X.; Han, Y.; Hao, D.; Lv, Z. ARPPS: Augmented reality pipeline prospect system. In *Proceedings of the International Conference on Neural Information Processing*, New Delhi, India, 22–26 November 2022. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-26561-2_76
- Zhao, Q., Zhou, L., & Lv, G. (2023). A 3D modeling method for buildings based on LiDAR point cloud and DLG. *Computers, Environment and Urban Systems*, 102, 101974. <https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2023.101974>
- Zheng, M., Guo, Y.-R., Ai, X.-Q., Qin, T., Wang, Q. J., & Xu, J. M. (2010). Coupling GIS with CFD modeling to simulate urban pollutant dispersion. *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, 1785–1788. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14886724>
- Zhou, B.; Gu, Z.; Ma, W.; Liu, X. Integrated BLE and PDR Indoor Localization for Geo-Visualization Mobile Augmented Reality. In *Proceedings of the 2020 16th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, Shenzhen, China, 13–15 December 2020. <http://doi.org/10.1109/ICARCV50220.2020.9305324>
- Zlatanova, S. (2000a). 3D GIS for urban development. *ITC Dissertation Series (Netherlands)*, 222. <https://doi.org/10.3/JQUERY-UI.JS>
- Zlatanova, S. (2000b). 3D GIS for urban development. *ITC Dissertation Series (Netherlands)*, 222. <https://doi.org/10.3/JQUERY-UI.JS>
- Zlatanova, S. (2000c). 3D GIS for urban development. <https://research.utwente.nl/en/publications/3d-gis-for-urban-development>
- Zlatanova, S. (2002). *Advances in 3D GIS*. <https://www.researchgate.net/publication/229053801>
- Zlatanova, S., & Beetz, J. (2012). 3D spatial information infrastructure: The case of Port Rotterdam. 03010. <https://doi.org/10.1051/3U3D/201203010>
- Zlatanova, S., & Tempfli, K. (2000). Modelling for 3D GIS: Spatial Analysis and Visualization Through the Web. *Proceedings of the XIXth ISPRS Congress, XXXIII*, 1257–1264. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:8abb0017>
- Zlatanova, S., Rahman, A. A., & Pilouk, M. (2002). Trends in 3D GIS Development. In *Journal of Geospatial Engineering (Vol. 4, Issue 2)*. <http://www.integrapph.com>

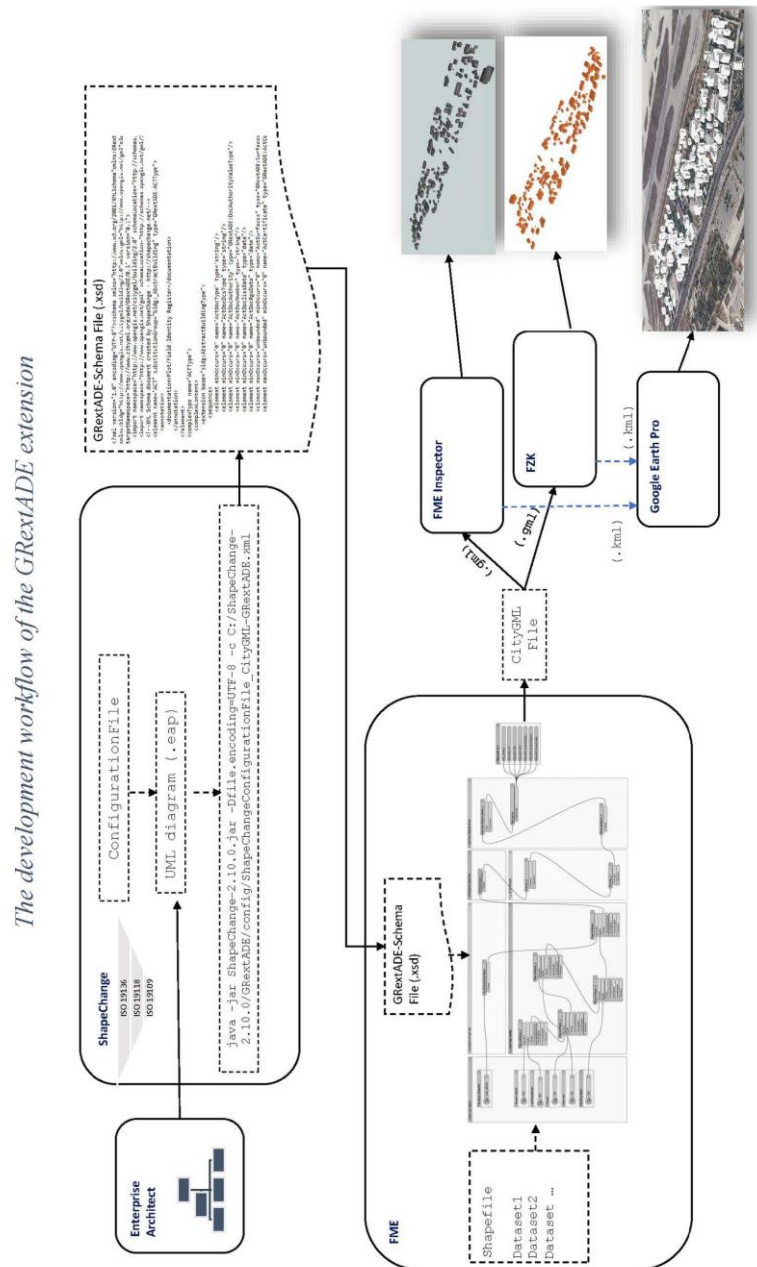
Zucker, G., Judex, F., Blöchle, M., Köstl, M., Widl, E., Hauer, S., Bres, A., & Zeilinger, J. (2016). A new method for optimizing operation of large neighborhoods of buildings using thermal simulation. *Energy and Buildings*, 125, 153–160.

<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.04.081>

Zünd, F. *Augmented Reality Storytelling*; ETH Zurich: Zürich, Switzerland, 2016.

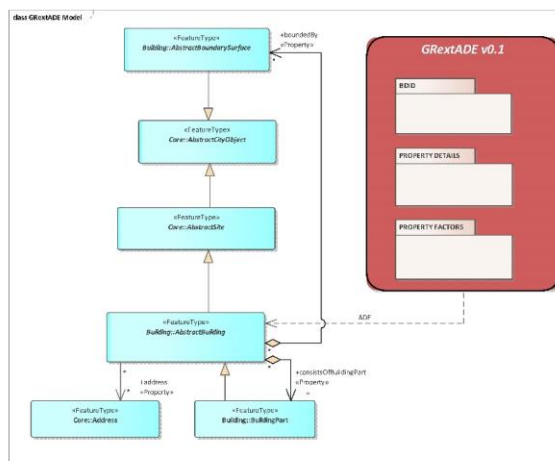
<http://doi.org/10.3929/ethz-a-010820216>

171



Παράρτημα Β – UML διαγράμματα της επέκτασης GRextADE

Diagram: GRextADE Model



days 8-10



Diagram: PROPERTY DETAILS

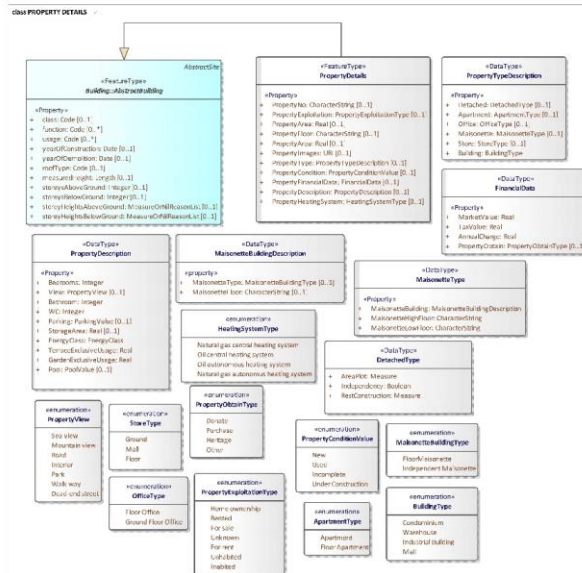
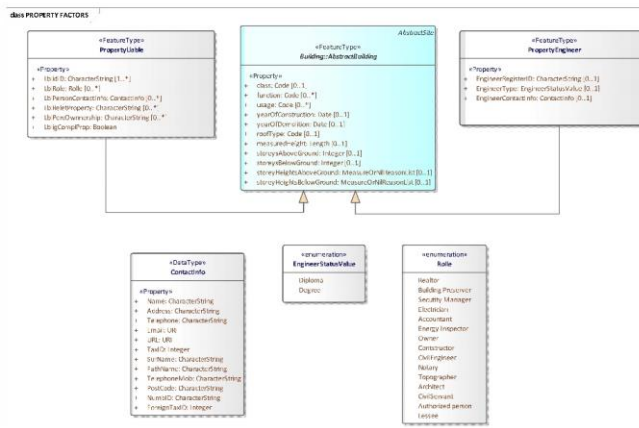


Diagram: PROPERTY FACTORS



Παράρτημα Γ –Configuration File της επέκτασης GRectADE

```
1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2
3 <ShapeChangeConfiguration xmlns:xi="http://www.w3.org/2001/XInclude"
4   xmlns="http://www.interactive-instruments.de/ShapeChange/Configuration/1.1"
5   xmlns:sc="http://www.interactive-instruments.de/ShapeChange/Configuration/1.1"
6   xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
7   xsi:schemaLocation=
8     "http://www.interactive-instruments.de/ShapeChange/Configuration/1.1
9     http://shapechange.net/resources/schema/ShapeChangeConfiguration.xsd">
10
11   <input>
12     <parameter name="inputModelType" value="EA7"/>
13     <parameter name="inputFile" value=
14       "C:/ShapeChange-2.10.0/GRectADE/CityGML-GRectADE.eap"/>
15     <parameter name="appSchemaName" value="GRectADE"/>
16     <parameter name="checkingConstraints" value="disabled"/>
17     <parameter name="representTaggedValues" value="topLevel,relationType,maxOccurs"/>
18     <xi:include href="http://shapechange.net/resources/config/StandardAliases.xml"/>
19     <stereotypeAliases>
20       <StereotypeAlias wellknown="" alias="Property"/>
21     </stereotypeAliases>
22   </input>
23
24   <log>
25     <parameter name="reportLevel" value="INFO"/>
26     <parameter name="logFile" value="C:/ShapeChange-2.10.0/GRectADE/OUTPUT/log.xml"/>
27   </log>
28
29   <targets>
30     <TargetXmlSchema class=
31       "de.interactive_instruments.ShapeChange.Target.XmlSchema.XmlSchema" mode="enabled"
32     >
33       <targetParameter name="outputDirectory" value=
34         "C:/ShapeChange-2.10.0/GRectADE/OUTPUT/XSDS" />
35       <targetParameter name="defaultEncodingRule" value="custom" />
36       <rules>
37         <EncodingRule extends="citygml-ade" name="custom">
38           <rule name="rule-xsd-all-tagged-values" />
39         </EncodingRule>
40       </rules>
41       <xi:include href="http://shapechange.net/resources/config/StandardRules.xml"/>
42       <xi:include href=
43         "http://shapechange.net/resources/config/StandardNamespaces-v31.xml"/>
44       <xi:include href=
45         "http://shapechange.net/resources/config/StandardMapEntries-v31.xml"/>
46       <xmlNamespaces>
47         <XmlNamespace nsabr="core" ns="http://www.opengis.net/citygml/2.0" location=
48           "http://schemas.opengis.net/citygml/2.0/cityGMLBase.xsd"/>
49         <XmlNamespace nsabr="app" ns="http://www.opengis.net/citygml/appearance/2.0"
50           location="http://schemas.opengis.net/citygml/appearance/2.0/appearance.xsd"/>
51         <XmlNamespace nsabr="brid" ns="http://www.opengis.net/citygml/bridge/2.0"
52           location="http://schemas.opengis.net/citygml/bridge/2.0/bridge.xsd"/>
53         <XmlNamespace nsabr="bldg" ns="http://www.opengis.net/citygml/building/2.0"
54           location="http://schemas.opengis.net/citygml/building/2.0/building.xsd"/>
55         <XmlNamespace nsabr="frn" ns=
56           "http://www.opengis.net/citygml/cityfurniture/2.0" location=
57           "http://schemas.opengis.net/citygml/cityfurniture/2.0/cityFurniture.xsd"/>
58         <XmlNamespace nsabr="grp" ns=
59           "http://www.opengis.net/citygml/cityobjectgroup/2.0" location=
60           "http://schemas.opengis.net/citygml/cityobjectgroup/2.0/cityObjectGroup.xsd"/>
61         <XmlNamespace nsabr="gen" ns="http://www.opengis.net/citygml/generics/2.0"
62           location="http://schemas.opengis.net/citygml/generics/2.0/generics.xsd"/>
63         <XmlNamespace nsabr="luse" ns="http://www.opengis.net/citygml/landuse/2.0"
64           location="http://schemas.opengis.net/citygml/landuse/2.0/landUse.xsd"/>
65         <XmlNamespace nsabr="dem" ns="http://www.opengis.net/citygml/relief/2.0"
66           location="http://schemas.opengis.net/citygml/relief/2.0/relief.xsd"/>
67         <XmlNamespace nsabr="tran" ns=
68           "http://www.opengis.net/citygml/transportation/2.0" location=
69           "http://schemas.opengis.net/citygml/transportation/2.0/transportation.xsd"/>
70         <XmlNamespace nsabr="tun" ns="http://www.opengis.net/citygml/tunnel/2.0"
71           location="http://schemas.opengis.net/citygml/tunnel/2.0/tunnel.xsd"/>
72       </xmlNamespaces>
73     </TargetXmlSchema>
74   </targets>
75 </ShapeChangeConfiguration>
```

```

50 <XmlNamespace nsabr="veg" ns="http://www.opengis.net/citygml/vegetation/2.0"
location="http://schemas.opengis.net/citygml/vegetation/2.0/vegetation.xsd"/>
51 <XmlNamespace nsabr="wtr" ns="http://www.opengis.net/citygml/waterbody/2.0"
location="http://schemas.opengis.net/citygml/waterbody/2.0/waterBody.xsd"/>
52 </xmlNamespaces>
53 <xsdMapEntries>
54 <XsdMapEntry type="AbstractBoundarySurface" xsdEncodingRules="iso19136_2007"
xmlElement="bldg:BoundarySurface" xmlType="bldg:AbstractBoundarySurfaceType"
xmlPropertyType="bldg:BoundarySurfacePropertyType"/>
55 <XsdMapEntry type="AbstractSite" xsdEncodingRules="iso19136_2007" xmlElement=
"core:Site" xmlType="core:AbstractSiteType"/>
56 <XsdMapEntry type="AbstractCityObject" xsdEncodingRules="iso19136_2007"
xmlElement="core:CityObject" xmlType="core:AbstractCityObjectType"/>
57 <XsdMapEntry type="AbstractBuilding" xsdEncodingRules="iso19136_2007"
xmlElement="bldg:AbstractBuilding" xmlType="bldg:AbstractBuildingType"/>
58 <XsdMapEntry type="URI" xsdEncodingRules="iso19136_2007" xmlPropertyType=
"anyURI" xmlType="anyURI" xmlTypeType="simple" xmlTypeContent="simple"/>
59 <XsdMapEntry type="QuantityExtent" xsdEncodingRules="iso19136_2007" xmlType=
"gml:QuantityExtentType" xmlPropertyType="gml:QuantityExtentType" xmlTypeType=
"complex" xmlTypeContent="simple"/>
60 <XsdMapEntry type="Code" xsdEncodingRules="iso19136_2007" xmlType=
"gml:CodeType" xmlPropertyType="gml:CodeType" xmlTypeType="complex"
xmlTypeContent="simple"/>
61 <XsdMapEntry type="DoubleBetween0and1" xsdEncodingRules="iso19136_2007"
xmlType="core:doubleBetween0and1" xmlPropertyType="core:doubleBetween0and1"
xmlTypeType="complex" xmlTypeContent="simple"/>
62 </xsdMapEntries>
63 </TargetXmlSchema>
64 </targets>
65 </ShapeChangeConfiguration>

```

Παράρτημα Δ – XML κώδικας της επέκτασης GRextADE

```
1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?><schema xmlns="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
2   xmlns:GRextADE="http://www.citygml.org/ade/GRextADE/0.1" xmlns:bldg=
3   "http://www.opengis.net/citygml/building/2.0" xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml"
4   elementFormDefault="qualified" targetNamespace=
5   "http://www.citygml.org/ade/GRextADE/0.1" version="0.1">
6   <import namespace="http://www.opengis.net/citygml/building/2.0" schemaLocation=
7     "http://schemas.opengis.net/citygml/building/2.0/building.xsd"/>
8   <import namespace="http://www.opengis.net/gml" schemaLocation=
9     "http://schemas.opengis.net/gml/3.1.1/base/gml.xsd"/>
10  <!--XML Schema document created by ShapeChange - http://shapechange.net/-->
11  <element name="ACT" substitutionGroup="bldg:_AbstractBuilding" type=
12    "GRextADE:ACTType">
13    <annotation>
14      <documentation>Plot/Field Identity Register</documentation>
15    </annotation>
16  </element>
17  <complexType name="ACTType">
18    <complexContent>
19      <extension base="bldg:AbstractBuildingType">
20        <sequence>
21          <element minOccurs="0" name="ActDocType" type="string"/>
22          <element minOccurs="0" name="ActDocDcsType" type="string"/>
23          <element minOccurs="0" name="ActDocAuthority" type=
24            "GRextADE:DocAuthorityValueType"/>
25          <element minOccurs="0" name="ActDocNumber" type="string"/>
26          <element minOccurs="0" name="ActDocIssDate" type="date"/>
27          <element minOccurs="0" name="ActDocRgsDate" type="date"/>
28          <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name="ActSurfaces" type=
29            "GRextADE:SurfacesValuePropertyType"/>
30          <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name="ActCertificate" type=
31            "GRextADE:ActCertificateListPropertyType"/>
32        </sequence>
33      </extension>
34    </complexContent>
35  </complexType>
36  <complexType name="ACTPropertyType">
37    <sequence minOccurs="0">
38      <element ref="GRextADE:ACT"/>
39    </sequence>
40    <attributeGroup ref="gml:AssociationAttributeGroup"/>
41  </complexType>
42  <element name="ActCertificateList" substitutionGroup="gml:_Object" type=
43    "GRextADE:ActCertificateListType">
44    <annotation>
45      <documentation>Plot/Field Identity Register</documentation>
46    </annotation>
47  </element>
48  <complexType name="ActCertificateListType">
49    <sequence>
50      <element minOccurs="0" name="DocType" type="GRextADE:NetworksTypeValueType"/>
51      <element minOccurs="0" name="DocDcsType" type="string"/>
52      <element minOccurs="0" name="DocRgsDate" type="date"/>
53      <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name="DocCopy" type="anyURI"/>
54    </sequence>
55  </complexType>
56  <complexType name="ActCertificateListPropertyType">
57    <sequence>
58      <element ref="GRextADE:ActCertificateList"/>
59    </sequence>
60  </complexType>
61  <simpleType name="ApartmentTypeType">
62    <restriction base="string">
63      <enumeration value="Apartment"/>
64      <enumeration value="Floor Apartment"/>
65    </restriction>
66  </simpleType>
67  <element name="BIR" substitutionGroup="bldg:_AbstractBuilding" type=
68    "GRextADE:BIRType">
69    <annotation>
70      <documentation>Building Identity Register</documentation>
71    </annotation>
```

```

60 </element>
61 <complexType name="BIRType">
62   <complexContent>
63     <extension base="bldg:AbstractBuildingType">
64       <sequence>
65         <element minOccurs="0" name="PrNumb" type="string"/>
66         <element minOccurs="0" name="PrIsNumb" type="string"/>
67         <element minOccurs="0" name="DescriptionOfProperty" type=
68           "GRestADE:DescriptionOfPropertyValue"/>
69         <element minOccurs="0" name="PropertyTablePercentages" type="string"/>
70         <element minOccurs="0" name="ParkingNumber" type="integer"/>
71         <element minOccurs="0" name="PropertyElementsComposition" type="string"/>
72         <element minOccurs="0" name="ReasonRegistrationOwnership" type="string"/>
73         <element minOccurs="0" name="PropertyTechnicalDescription" type="string"/>
74         <element minOccurs="0" name="EnergyStatusCertificate" type=
75           "GRestADE:EnergyStatusCertificateDetailsPropertyType"/>
76         <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name="MainDocCopy" type=
77           "GRestADE:MainDocCopyListPropertyType"/>
78       </sequence>
79     </extension>
80   </complexContent>
81 </complexType>
82 <complexType name="BIRPropertyType">
83   <sequence minOccurs="0">
84     <element ref="GRestADE:BIR"/>
85   </sequence>
86   <attributeGroup ref="gml:AssociationAttributeGroup"/>
87 </complexType>
88 <simpleType name="BuildingTypeType">
89   <restriction base="string">
90     <enumeration value="Condominium"/>
91     <enumeration value="Warehouse"/>
92     <enumeration value="Industrial Building"/>
93     <enumeration value="Mall"/>
94   </restriction>
95 </simpleType>
96 <element name="ContactInfo" substitutionGroup="gml:_Object" type=
97   "GRestADE:ContactInfoType"/>
98 <complexType name="ContactInfoType">
99   <sequence>
100     <element name="Name" type="string"/>
101     <element name="Address" type="string"/>
102     <element name="Telephone" type="string"/>
103     <element name="Email" type="anyURI"/>
104     <element name="URL" type="anyURI"/>
105     <element name="TaxID" type="integer"/>
106     <element name="SurName" type="string"/>
107     <element name="FathName" type="string"/>
108     <element name="TelephoneMob" type="string"/>
109     <element name="PostCode" type="string"/>
110     <element name="NumbID" type="string"/>
111     <element name="ForeignTaxID" type="integer"/>
112   </sequence>
113 </complexType>
114 <complexType name="ContactInfoPropertyType">
115   <sequence>
116     <element ref="GRestADE:ContactInfo"/>
117   </sequence>
118 </complexType>
119 <simpleType name="DescriptionOfPropertyValue">
120   <restriction base="string">
121     <enumeration value="Indivisible property"/>
122     <enumeration value="Vertical divided property"/>
123     <enumeration value="Horizontally divided property"/>
124     <enumeration value="Shared areas"/>
125   </restriction>
126 </simpleType>
127 <element name="DetachedType" substitutionGroup="gml:_Object" type=
128   "GRestADE:DetachedTypeType"/>
129 <complexType name="DetachedTypeType">
130   <sequence>

```

```

126         <element name="AreaPlot" type="gml:MeasureType"/>
127         <element name="Independency" type="boolean"/>
128         <element name="RestConstruction" type="gml:MeasureType"/>
129     </sequence>
130 </complexType>
131 <complexType name="DetachedTypePropertyType">
132     <sequence>
133         <element ref="GRestADE:DetachedType"/>
134     </sequence>
135 </complexType>
136 <simpleType name="DocAuthorityValueType">
137     <restriction base="string">
138         <enumeration value="Notary"/>
139         <enumeration value="Urban planning"/>
140         <enumeration value="Tax office"/>
141         <enumeration value="Ministry of Finance"/>
142         <enumeration value="Police Department"/>
143         <enumeration value="Fire Department"/>
144         <enumeration value="Ministry of Spatial Planning"/>
145         <enumeration value="Ministry of Environment"/>
146         <enumeration value="Power supply company"/>
147         <enumeration value="Civil engineer"/>
148         <enumeration value="Landscape engineer"/>
149         <enumeration value="Other"/>
150         <enumeration value="Technical Chamber of Greece"/>
151     </restriction>
152 </simpleType>
153 <element name="EnergyCertificateList" substitutionGroup="gml:Object" type=
154 "GRestADE:EnergyCertificateListType">
155     <annotation>
156         <documentation>Plot/Field Identity Register</documentation>
157     </annotation>
158 </element>
159 <complexType name="EnergyCertificateListType">
160     <sequence>
161         <element minOccurs="0" name="EnrgProtocolNumber" type="string"/>
162         <element minOccurs="0" name="EnrgDateIssue" type="date"/>
163         <element name="EnrgCategory" type="string"/>
164         <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name="EnrgCopy" type="anyURI"/>
165     </sequence>
166 </complexType>
167 <complexType name="EnergyCertificateListPropertyType">
168     <sequence>
169         <element ref="GRestADE:EnergyCertificateList"/>
170     </sequence>
171 </complexType>
172 <simpleType name="EnergyClassType">
173     <restriction base="string">
174         <enumeration value="A+"/>
175         <enumeration value="A"/>
176         <enumeration value="B+"/>
177         <enumeration value="B"/>
178         <enumeration value="C"/>
179         <enumeration value="D"/>
180         <enumeration value="E"/>
181         <enumeration value="F"/>
182         <enumeration value="G"/>
183     </restriction>
184 </simpleType>
185 <element name="EnergyStatusCertificateDetails" substitutionGroup="gml:Object" type=
186 "GRestADE:EnergyStatusCertificateDetailsType">
187     <annotation>
188         <documentation>Plot/Field Identity Register</documentation>
189     </annotation>
190 </element>
191 <complexType name="EnergyStatusCertificateDetailsType">
192     <sequence>
193         <element minOccurs="0" name="EnrgProtocolNumber" type="string"/>
194         <element minOccurs="0" name="EnrgDateIssue" type="date"/>
195         <element minOccurs="0" name="EnrgCategory" type="GRestADE:EnergyClassType"/>
196         <element minOccurs="0" name="EnrgAnnualConsumption" type="integer"/>

```

```

195     <element minOccurs="0" name="EnrgAnnualCO2" type="integer"/>
196     <element minOccurs="0" name="EnrgDateCertificate" type="date"/>
197     <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name="EnrgNetworks" type=
198     "GRestADE:NetworksDetailsPropertyType"/>
199     <element name="EnergyCertificateList" type=
200     "GRestADE:EnergyCertificateListPropertyType"/>
201   </sequence>
202   <complexType name="EnergyStatusCertificateDetailsPropertyType">
203     <sequence>
204       <element ref="GRestADE:EnergyStatusCertificateDetails"/>
205     </sequence>
206   </complexType>
207   <simpleType name="EngineerStatusValueType">
208     <restriction base="string">
209       <enumeration value="Diploma"/>
210       <enumeration value="Degree"/>
211     </restriction>
212   </simpleType>
213   <simpleType name="FieldDivisionValueType">
214     <restriction base="string">
215       <enumeration value="Defined Field Horizontal Property"/>
216       <enumeration value="Defined Field Vertical Property"/>
217       <enumeration value="Undefined Plot"/>
218       <enumeration value="Vertical section Horizontal Property"/>
219       <enumeration value="Vertical section Vertical Property"/>
220       <enumeration value="Other case"/>
221     </restriction>
222   </simpleType>
223   <element name="FinancialData" substitutionGroup="gml:_Object" type=
224   "GRestADE:FinancialDataType"/>
225   <complexType name="FinancialDataType">
226     <sequence>
227       <element name="MarketValue" type="double"/>
228       <element name="TaxValue" type="double"/>
229       <element name="AnnualCharge" type="double"/>
230       <element minOccurs="0" name="PropertyObtain" type=
231       "GRestADE:PropertyObtainType"/>
232     </sequence>
233   </complexType>
234   <complexType name="FinancialDataPropertyType">
235     <sequence>
236       <element ref="GRestADE:FinancialData"/>
237     </sequence>
238   </complexType>
239   <element name="FloorTypeValue" substitutionGroup="gml:_Object" type=
240   "GRestADE:FloorTypeValueType"/>
241   <complexType name="FloorTypeValueType">
242     <sequence>
243       <element minOccurs="0" name="FloorDescription" type="string"/>
244       <element minOccurs="0" name="TypeLevel" type="GRestADE:TypeLevelValueType"/>
245       <element minOccurs="0" name="Floor" type="double"/>
246     </sequence>
247   </complexType>
248   <complexType name="FloorTypeValuePropertyType">
249     <sequence>
250       <element ref="GRestADE:FloorTypeValue"/>
251     </sequence>
252   </complexType>
253   <simpleType name="FloorValueType">
254     <restriction base="string">
255       <enumeration value="IndoorPool"/>
256       <enumeration value="OutdoorPool"/>
257       <enumeration value="OtherPoolConstructions"/>
258     </restriction>
259   </simpleType>
260   <simpleType name="HeatingSystemTypeType">
261     <restriction base="string">
262       <enumeration value="Natural gas central heating system"/>
263       <enumeration value="Oil central heating system"/>
264       <enumeration value="Oil autonomous heating system"/>

```

```

261     <enumeration value="Natural gas autonomus heating system"/>
262   </restriction>
263 </simpleType>
264 <element name="MainDocCopyList" substitutionGroup="gml:_Object" type=
  "GRestADE:MainDocCopyListType">
265   <annotation>
266     <documentation>The basic legal documents of a building</documentation>
267   </annotation>
268 </element>
269 <complexType name="MainDocCopyListType">
270   <sequence>
271     <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name="ConstructionPermit" type=
      "anyURI"/>
272     <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name="ConstructionPlans" type=
      "anyURI"/>
273     <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name="TopographicalPlan" type=
      "anyURI"/>
274     <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name="EngineerAuthorization" type=
      "anyURI"/>
275     <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name="TableOwnershipPercentages"
      type="anyURI">
276       <annotation>
277         <documentation>Table Of Ownership Percentages</documentation>
278       </annotation>
279     </element>
280     <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name="AdditionalPropertyDetails"
      type="anyURI"/>
281     <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name=
      "CertificateCompletenessOwnershipIdentity" type="anyURI">
282       <annotation>
283         <documentation>Certificate of completeness of ownership identity
284         </documentation>
285       </annotation>
286     </element>
287   </sequence>
288 </complexType>
289 <complexType name="MainDocCopyListPropertyType">
290   <sequence>
291     <element ref="GRestADE:MainDocCopyList"/>
292   </sequence>
293 </complexType>
294 <element name="MaisonetteBuildingDescription" substitutionGroup="gml:_Object" type=
  "GRestADE:MaisonetteBuildingDescriptionType"/>
295 <complexType name="MaisonetteBuildingDescriptionType">
296   <sequence>
297     <element minOccurs="0" name="MaisonetteType" type=
      "GRestADE:MaisonetteBuildingTypeType"/>
298     <element minOccurs="0" name="MaisonetteFloor" type="string"/>
299   </sequence>
300 </complexType>
301 <complexType name="MaisonetteBuildingDescriptionPropertyType">
302   <sequence>
303     <element ref="GRestADE:MaisonetteBuildingDescription"/>
304   </sequence>
305 </complexType>
306 <simpleType name="MaisonetteBuildingTypeType">
307   <restriction base="string">
308     <enumeration value="FloorMaisonette"/>
309     <enumeration value="Independent Maisonette"/>
310   </restriction>
311 </simpleType>
312 <element name="MaisonetteType" substitutionGroup="gml:_Object" type=
  "GRestADE:MaisonetteTypeType"/>
313 <complexType name="MaisonetteTypeType">
314   <sequence>
315     <element name="MaisonetteBuilding" type=
      "GRestADE:MaisonetteBuildingDescriptionPropertyType"/>
316     <element name="MaisonetteHighFloor" type="string"/>
317     <element name="MaisonetteLowFloor" type="string"/>
318   </sequence>
</complexType>

```

```

319 <complexType name="MaisonetteTypePropertyType">
320 <sequence>
321 <element ref="GRestADE:MaisonetteType"/>
322 </sequence>
323 </complexType>
324 <element name="NetworksDetails" substitutionGroup="gml:Object" type=
"GRestADE:NetworksDetailsType">
325 <annotation>
326 <documentation>Plot/Field Identity Register</documentation>
327 </annotation>
328 </element>
329 <complexType name="NetworksDetailsType">
330 <sequence>
331 <element minOccurs="0" name="NetDescription" type=
"GRestADE:NetworksTypeValueType"/>
332 <element minOccurs="0" name="NetCounterNumber" type="string"/>
333 <element minOccurs="0" name="NetSupplyAccountNumber" type="string"/>
334 <element minOccurs="0" name="NetIntroDate" type="date"/>
335 </sequence>
336 </complexType>
337 <complexType name="NetworksDetailsPropertyType">
338 <sequence>
339 <element ref="GRestADE:NetworksDetails"/>
340 </sequence>
341 </complexType>
342 <simpleType name="NetworksTypeValueType">
343 <restriction base="string">
344 <enumeration value="Other"/>
345 <enumeration value="Electricity"/>
346 <enumeration value="Water supply"/>
347 <enumeration value="Natural gas"/>
348 </restriction>
349 </simpleType>
350 <simpleType name="OfficeTypeType">
351 <restriction base="string">
352 <enumeration value="Floor Office"/>
353 <enumeration value="Ground Floor Office"/>
354 </restriction>
355 </simpleType>
356 <element name="PFIR" substitutionGroup="bldg:AbstractBuilding" type=
"GRestADE:PFIRType">
357 <annotation>
358 <documentation>Plot/Field Identity Register</documentation>
359 </annotation>
360 </element>
361 <complexType name="PFIRType">
362 <complexContent>
363 <extension base="bldg:AbstractBuildingType">
364 <sequence>
365 <element minOccurs="0" name="PFNumber" type="string">
366 <annotation>
367 <documentation>Plot/Field Number</documentation>
368 </annotation>
369 </element>
370 <element minOccurs="0" name="NRCNPlot" type="string"/>
371 <element minOccurs="0" name="NRCNProperty" type="string"/>
372 <element minOccurs="0" name="PlotDescription" type="string"/>
373 <element minOccurs="0" name="FieldDescription" type="string"/>
374 <element minOccurs="0" name="RegistrationStatus" type=
"GRestADE:RegistrationStatusValueType"/>
375 <element minOccurs="0" name="Municipality" type="string"/>
376 <element minOccurs="0" name="Street" type="string"/>
377 <element minOccurs="0" name="Number" type="string"/>
378 <element minOccurs="0" name="City" type="string"/>
379 <element minOccurs="0" name="PostCode" type="string"/>
380 <element minOccurs="0" name="Settlement" type="string"/>
381 <element minOccurs="0" name="Region" type="string"/>
382 <element minOccurs="0" name="Location" type="string"/>
383 <element minOccurs="0" name="BB" type="string"/>
384 <element minOccurs="0" name="DateFirstRegistration" type="date"/>
385 <element minOccurs="0" name="Structured" type="boolean"/>

```

```

386         <element minOccurs="0" name="BuildingServiceAuthority" type="string"/>
387         <element minOccurs="0" name="LastUpdCertifiedEngineer" type="string"/>
388         <element minOccurs="0" name="GeospatialCoordinates" type="string"/>
389         <element minOccurs="0" name="GeospatialLocalityComments" type="string"/>
390         <element minOccurs="0" name="FieldArea" type="gml:MeasureType"/>
391         <element minOccurs="0" name="WithinCityPlan" type="boolean"/>
392         <element minOccurs="0" name="SpecialStatus" type=
393             "GRestADE:SpecialStatusValueType"/>
394         <element minOccurs="0" name="PlotDivision" type=
395             "GRestADE:PlotDivisionValueType"/>
396         <element minOccurs="0" name="FieldDivision" type=
397             "GRestADE:FieldDivisionValueType"/>
398         <element minOccurs="0" name="BuildingsNumb" type="integer"/>
399         <element minOccurs="0" name="PropertiesNumb" type="integer"/>
400         <element minOccurs="0" name="PublicSpaces" type="string"/>
401         <element minOccurs="0" name="Comments" type="string"/>
402         <element minOccurs="0" name="Floors" type="string"/>
403         <element minOccurs="0" name="PFImages" type="anyURI"/>
404     </sequence>
405 </extension>
406 </complexContent>
407 </complexType>
408 <complexType name="PFIRPropertyType">
409     <sequence minOccurs="0">
410         <element ref="GRestADE:PFIR"/>
411     </sequence>
412     <attributeGroup ref="gml:AssociationAttributeGroup"/>
413 </complexType>
414 <element name="ParkingValue" substitutionGroup="gml:_Object" type=
415     "GRestADE:ParkinhTypeValueType"/>
416 <complexType name="ParkingValuePropertyType">
417     <sequence>
418         <element minOccurs="0" name="ParkingType" type="GRestADE:ParkinhTypeValueType"/>
419         <element minOccurs="0" name="ParkingSpaces" type="integer"/>
420     </sequence>
421 </complexType>
422 <complexType name="ParkingValuePropertyType">
423     <sequence>
424         <element ref="GRestADE:ParkinhTypeValueType"/>
425     </sequence>
426 </complexType>
427 <simpleType name="ParkinhTypeValueType">
428     <restriction base="string">
429         <enumeration value="Underground"/>
430         <enumeration value="Covered"/>
431         <enumeration value="Outdoor"/>
432     </restriction>
433 </simpleType>
434 <simpleType name="PlotDivisionValueType">
435     <restriction base="string">
436         <enumeration value="Defined Plot_Horizontal Property"/>
437         <enumeration value="Defined plot_Vertical Property"/>
438         <enumeration value="Undefined Plot"/>
439         <enumeration value="Vertical section_Horizontal Property"/>
440         <enumeration value="Vertical section_Vertical Property"/>
441         <enumeration value="Other case"/>
442     </restriction>
443 </simpleType>
444 <element name="PoolValue" substitutionGroup="gml:_Object" type=
445     "GRestADE:PoolValuePropertyType"/>
446 <complexType name="PoolValuePropertyType">
447     <sequence>
448         <element minOccurs="0" name="OutdoorPool" type="double"/>
449         <element minOccurs="0" name="IndoorPool" type="double"/>
450         <element minOccurs="0" name="OtherPoolConstructions" type="double"/>
451     </sequence>
452 </complexType>
453 <complexType name="PoolValuePropertyType">
454     <sequence>
455         <element ref="GRestADE:PoolValue"/>
456     </sequence>

```

```

452 </complexType>
453 <simpleType name="PropertyConditionValueType">
454   <restriction base="string">
455     <enumeration value="New"/>
456     <enumeration value="Used"/>
457     <enumeration value="Incomplete"/>
458     <enumeration value="Under Construction"/>
459   </restriction>
460 </simpleType>
461 <element name="PropertyDescription" substitutionGroup="gml:_Object" type=
"GRextADE:PropertyDescriptionType"/>
462 <complexType name="PropertyDescriptionType">
463   <sequence>
464     <element name="Bedrooms" type="integer"/>
465     <element minOccurs="0" name="View" type="GRextADE:PropertyViewType"/>
466     <element name="Bathroom" type="integer"/>
467     <element name="WC" type="integer"/>
468     <element minOccurs="0" name="Parking" type="GRextADE:ParkingValuePropertyType"/>
469     <element minOccurs="0" name="StorageArea" type="double"/>
470     <element name="EnergyClass" type="GRextADE:EnergyClassType"/>
471     <element name="TerraceExclusiveUsage" type="double"/>
472     <element name="GardenExclusiveUsage" type="double"/>
473     <element minOccurs="0" name="Pool" type="GRextADE:PoolValuePropertyType"/>
474   </sequence>
475 </complexType>
476 <complexType name="PropertyDescriptionPropertyType">
477   <sequence>
478     <element ref="GRextADE:PropertyDescription"/>
479   </sequence>
480 </complexType>
481 <element name="PropertyDetails" substitutionGroup="bldg:_AbstractBuilding" type=
"GRextADE:PropertyDetailsType"/>
482 <complexType name="PropertyDetailsType">
483   <complexContent>
484     <extension base="bldg:AbstractBuildingType">
485       <sequence>
486         <element minOccurs="0" name="PropertyNo" type="string"/>
487         <element minOccurs="0" name="PropertyExploitation" type=
"GRextADE:PropertyExploitationTypeType"/>
488         <element minOccurs="0" name="PropertyArea" type="double"/>
489         <element minOccurs="0" name="PropertyFloor" type="string"/>
490         <element minOccurs="0" name="PropertyArea" type="double">
491           <annotation>
492             <documentation>The surface of the property, in square meters (sqm)</documentation>
493           </annotation>
494         </element>
495         <element minOccurs="0" name="PropertyImages" type="anyURI"/>
496         <element minOccurs="0" name="PropertyType" type=
"GRextADE:PropertyTypeDescriptionPropertyType"/>
497         <element minOccurs="0" name="PropertyCondition" type=
"GRextADE:PropertyConditionValueType"/>
498         <element minOccurs="0" name="PropertyFinancialData" type=
"GRextADE:FinancialDataPropertyType"/>
499         <element minOccurs="0" name="PropertyDescription" type=
"GRextADE:PropertyDescriptionPropertyType"/>
500         <element minOccurs="0" name="PropertyHeatingSystem" type=
"GRextADE:HeatingSystemTypeType"/>
501       </sequence>
502     </extension>
503   </complexContent>
504 </complexType>
505 <complexType name="PropertyDetailsPropertyType">
506   <sequence minOccurs="0">
507     <element ref="GRextADE:PropertyDetails"/>
508   </sequence>
509   <attributeGroup ref="gml:AssociationAttributeGroup"/>
510 </complexType>
511 <element name="PropertyEngineer" substitutionGroup="bldg:_AbstractBuilding" type=
"GRextADE:PropertyEngineerType"/>
512 <complexType name="PropertyEngineerType">

```

```

513     <complexContent>
514       <extension base="bldg:AbstractBuildingType">
515         <sequence>
516           <element minOccurs="0" name="EngineerRegisterID" type="string"/>
517           <element minOccurs="0" name="EngineerType" type=
518             "GRestADE:EngineerStatusValueType"/>
519           <element minOccurs="0" name="EngineerContactInfo" type=
520             "GRestADE:ContactInfoPropertyType"/>
521         </sequence>
522       </extension>
523     </complexContent>
524   </complexType>
525   <complexType name="PropertyEngineerPropertyType">
526     <sequence minOccurs="0">
527       <element ref="GRestADE:PropertyEngineer"/>
528     </sequence>
529     <attributeGroup ref="gml:AssociationAttributeGroup"/>
530   </complexType>
531   <simpleType name="PropertyExploitationType">
532     <annotation>
533       <documentation>The exploitation of the property</documentation>
534     </annotation>
535     <restriction base="string">
536       <enumeration value="Home ownership"/>
537       <enumeration value="Rented"/>
538       <enumeration value="For sale"/>
539       <enumeration value="Unknown"/>
540       <enumeration value="For rent"/>
541       <enumeration value="Unhabited"/>
542       <enumeration value="Inabited"/>
543     </restriction>
544   </simpleType>
545   <element name="PropertyLiabile" substitutionGroup="bldg:_AbstractBuilding" type=
546     "GRestADE:PropertyLiabileType"/>
547   <complexType name="PropertyLiabileType">
548     <complexContent>
549       <extension base="bldg:AbstractBuildingType">
550         <sequence>
551           <element maxOccurs="unbounded" name="LblidID" type="string"/>
552           <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name="LblRole" type=
553             "GRestADE:RoleType"/>
554           <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name="LblPersonContactInfo"
555             type="GRestADE:ContactInfoPropertyType"/>
556           <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name="LblReletProperty" type=
557             "string"/>
558           <element maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" name="LblPercOwnership" type=
559             "string"/>
560           <element name="LbligComplProp" type="boolean"/>
561         </sequence>
562       </extension>
563     </complexContent>
564   </complexType>
565   <complexType name="PropertyLiabilePropertyType">
566     <sequence minOccurs="0">
567       <element ref="GRestADE:PropertyLiabile"/>
568     </sequence>
569     <attributeGroup ref="gml:AssociationAttributeGroup"/>
570   </complexType>
571   <simpleType name="PropertyObtainType">
572     <restriction base="string">
573       <enumeration value="Donate"/>
574       <enumeration value="Purchase"/>
575       <enumeration value="Heritage"/>
576       <enumeration value="Other"/>
577     </restriction>
578   </simpleType>
579   <element name="PropertyTypeDescription" substitutionGroup="gml:_Object" type=
580     "GRestADE:PropertyTypeDescriptionType"/>
581   <complexType name="PropertyTypeDescriptionType">
582     <sequence>
583       <element minOccurs="0" name="Detached" type="GRestADE:DetachedTypePropertyType"

```

```

576     />
577     <element minOccurs="0" name="Apartment" type="GRestADE:ApartmentTypeType"/>
578     <element minOccurs="0" name="Office" type="GRestADE:OfficeTypeType"/>
579     <element minOccurs="0" name="Maisonette" type="
    "GRestADE:MaisonetteTypePropertyType"/>
580     <element minOccurs="0" name="Store" type="GRestADE:StoreTypeType"/>
581     <element name="Building" type="GRestADE:BuildingTypeType"/>
582   </sequence>
583 </complexType>
584 <complexType name="PropertyTypeDescriptionPropertyType">
585   <sequence>
586     <element ref="GRestADE:PropertyTypeDescription"/>
587   </sequence>
588 </complexType>
589 <simpleType name="PropertyViewType">
590   <restriction base="string">
591     <enumeration value="Sea view"/>
592     <enumeration value="Mountain view"/>
593     <enumeration value="Road"/>
594     <enumeration value="Interior"/>
595     <enumeration value="Park"/>
596     <enumeration value="Walk way"/>
597     <enumeration value="Dead-end street"/>
598   </restriction>
599 </simpleType>
600 <simpleType name="RegistrationStatusValueType">
601   <restriction base="string">
602     <enumeration value="Yes"/>
603     <enumeration value="With finalized properties"/>
604   </restriction>
605 </simpleType>
606 <simpleType name="RolleType">
607   <restriction base="string">
608     <enumeration value="Realtor"/>
609     <enumeration value="Building Preserver"/>
610     <enumeration value="Secutity Manager"/>
611     <enumeration value="Electrician"/>
612     <enumeration value="Accountant"/>
613     <enumeration value="Energy Inspector"/>
614     <enumeration value="Owner"/>
615     <enumeration value="Contstructor"/>
616     <enumeration value="CivilEngineer"/>
617     <enumeration value="Notary"/>
618     <enumeration value="Topographer"/>
619     <enumeration value="Architect"/>
620     <enumeration value="Civilservant"/>
621     <enumeration value="Authorized person"/>
622     <enumeration value="Lessee"/>
623   </restriction>
624 </simpleType>
625 <simpleType name="SpecialStatusValueType">
626   <restriction base="string">
627     <enumeration value="Traditional settlement"/>
628     <enumeration value="Area of special natural beauty"/>
629     <enumeration value="Protected area"/>
630     <enumeration value="Archaeological site"/>
631     <enumeration value="World Heritage Site"/>
632     <enumeration value="Preserved building"/>
633     <enumeration value="High-risk activity"/>
634     <enumeration value="Other case"/>
635   </restriction>
636 </simpleType>
637 <simpleType name="StoreTypeType">
638   <restriction base="string">
639     <enumeration value="Ground"/>
640     <enumeration value="Mall"/>
641     <enumeration value="Floor"/>
642   </restriction>
643 </simpleType>
644 <element name="SurfacesValue" substitutionGroup="gml:_Object" type=
    "GRestADE:SurfacesValueType"/>

```

```

644 <complexType name="SurfacesValueType">
645 <sequence>
646 <element minOccurs="0" name="FloorArea" type=
    "GRectADE:FloorTypeValuePropertyType"/>
647 <element minOccurs="0" name="MainUseArea" type="double"/>
648 <element minOccurs="0" name="CommonSpaces" type="double"/>
649 <element minOccurs="0" name="LevelType" type="double"/>
650 <element minOccurs="0" name="OtherPlaces" type="double"/>
651 <element name="SemiOpenAreas" type="double"/>
652 <element minOccurs="0" name="AuxiliaryAreas" type="double"/>
653 <element minOccurs="0" name="Parking" type="GRectADE:ParkingValuePropertyType"/>
654 <element minOccurs="0" name="Pool" type="GRectADE:PoolValuePropertyType"/>
655 </sequence>
656 </complexType>
657 <complexType name="SurfacesValuePropertyType">
658 <sequence>
659 <element ref="GRectADE:SurfacesValue"/>
660 </sequence>
661 </complexType>
662 <simpleType name="TypeLevelValueType">
663 <restriction base="string">
664 <enumeration value="Attic"/>
665 <enumeration value="Loft"/>
666 <enumeration value="Main level"/>
667 <enumeration value="Mezzanine"/>
668 </restriction>
669 </simpleType>
670 </schema>
671

```