



Δ.Π.Μ.Σ. «Τεχνο-οικονομικά Συστήματα»

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**«3D Reconstruction - Αναπαράσταση τρισδιάστατων
μοντέλων μέσω αλγορίθμων γεωοπτικοποίησης και ψηφιακής
επεξεργασίας εικόνας από βίντεο υψηλής ανάλυσης»**

Τζήμα Κλεοπάτρα

Επιβλέπουσα

Θεοδώρα Βαρβαρίγου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2020

Περίληψη

Η γεωπληροφορική εξελίσσεται ραγδαία και επιδέχεται σημαντικές αλλαγές, οι οποίες οδηγούνται από τις νέες επιστημονικές απαιτήσεις και την εξέλιξη των μέσων χωρικής απεικόνισης των δεδομένων. Η Γεωγραφική Οπτικοποίηση (Geovisualization), συνδυάζοντας μεθόδους της χαρτογραφίας και της επιστημονικής οπτικοποίησης, οδήγησε σε νέες προσεγγίσεις για την οπτικοποίηση δομών και δεδομένων μέσα στον γεωγραφικό χώρο, ικανές να αποφέρουν τα βέλτιστα επιθυμητά αποτελέσματα με το μικρότερο δυνατό κόστος σε χρόνο και υλοποίηση.

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα εστιάσει στη μελέτη και ανάλυση των σύγχρονων τάσεων σχετικά με τη γεωοπτικοποίηση (geovisualization) συνδυάζοντας τη γεωπληροφορική με προηγμένες μεθόδους επεξεργασίας εικόνας/βίντεο και όρασης υπολογιστών (computer vision) για την ρεαλιστική αναπαράσταση και οπτικοποίηση δομών και δεδομένων μέσα στον γεωγραφικό χώρο. Ιδιαίτερη έμφαση και εκτενέστερη ανάλυση θα πραγματοποιηθεί αναφορικά με την τρισδιάστατη μοντελοποίηση και αναπαράσταση χωρικών δομών μέσω σύγχρονων τεχνικών. Στο πλαίσιο αυτό θα δημιουργηθούν και θα παρουσιαστούν τρισδιάστατα μοντέλα κατασκευών/κτιρίων μέσω αλγορίθμων γεωοπτικοποίησης και ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας (image - based modeling) από βίντεο υψηλής ανάλυσης και πολλαπλών φωτογραφιών (frames) που βρίσκονται ήδη αναρτημένα στο διαδίκτυο, με σκοπό την αναπαράσταση της πραγματικότητας με υψηλή ακρίβεια και λεπτομέρεια. Τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που θα προκύψουν από την εν λόγω εργασία κρίνονται σημαντικά καθώς η αξιοποίηση του οπτικοακουστικού υλικού (βίντεο) που υπάρχει ευρέως διαθέσιμο σήμερα για την τρισδιάστατη αναπαράσταση της πραγματικότητας αποτελεί ένα καινοτόμο και χρήσιμο εργαλείο για διάφορους επαγγελματικούς κλάδους όπως είναι η αγορά ακινήτων (real estate), ο πολεοδομικός και χωροταξικός σχεδιασμός, ο πολιτισμός και τουρισμός καθώς και η αρχιτεκτονική.

Λέξεις κλειδιά: γεωπληροφορική, γεωοπτικοποίηση, τρισδιάστατη γεωοπτικοποίηση, ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, 3D μοντελοποίηση

Abstract

Geoinformatics is evolving rapidly driven by new scientific requirements and the evolution of spatial data visualization tools. Geovisualization has led to new approaches to visualizing structures and geodata combining methods of cartography and scientific visualization and delivering the best desired results in a cost-effective way.

This master thesis will focus on the study and analysis of modern trends in geovisualization combining geoinformatics with advanced image/video processing and computer vision techniques for the realistic representation and visualization of geospatial objects. Emphasis and more extensive analysis will be made on 3D modeling and representation of spatial structures through modern techniques. In this context, 3D building models will be created and presented through geo-visualization and image-based modeling algorithms from high-resolution videos that are already available on the Internet, in order to represent reality with high precision and detail. The results and conclusions resulting from this project are crucial as the utilization of the widely available today online videos for 3D representation of reality is an innovative and useful tool for various business sectors such as the real estate, urban and spatial planning, culture and architecture.

Keywords: geoinformatics, geo-visualization, 3D geo-visualization, digital image processing, 3D modeling

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος με τίτλο «3D Reconstruction - Αναπαράσταση τρισδιάστατων μοντέλων μέσω αλγορίθμων γεωοπτικοποίησης και ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας από βίντεο υψηλής ανάλυσης» αποτελεί διπλωματική εργασία που εκπονήθηκε στα πλαίσια ολοκλήρωσης των μεταπτυχιακών μου σπουδών στο Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΔΠΜΣ) Τεχνο-οικονομικά Συστήματα του Εθνικό Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν στην υλοποίησή της. Θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτριά μου κα. Θεοδώρα Βαρβαρίγου και τον κ. Βρεττό Μούλο για την σημαντική καθοδήγηση που μου προσέφεραν προκειμένου να επιτευχθεί ένα πολύ καλό αποτέλεσμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου καθώς και τους φίλους μου, για την συνεχή υποστήριξη τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	3
Abstract	4
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1. ΓΕΩΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ	13
1.1. Ιστορική Αναδρομή	15
1.2. Οπτική Αλληλεπίδραση και οι Διαστάσεις της.....	17
1.3. Εφαρμογές Γεωοπτικοποίησης.....	19
1.4. Σύγκριση 2D και 3D Γεωοπτικοποίησης	26
1.5. Τρισδιάστατη Γεωοπτικοποίηση	27
1.5.1. 3D μοντελοποίηση.....	29
1.5.2. Τεχνικές 3D μοντελοποίησης	31
1.5.3. Εφαρμογές τρισδιάστατης γεωοπτικοποίησης	34
1.5.4. 3D γεωοπτικοποίηση στους διάφορους κλάδους της αγοράς	41
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	51
2.1. Αλγόριθμοι Όρασης Υπολογιστών σε Φωτογραμμετρικές Εφαρμογές 51	
2.2. Θεωρητικές Έννοιες.....	53
2.3. Αλγόριθμος: Structure-from-Motion (SFM)	55
2.4. Διάγραμμα Ροής SFM.....	57
2.4.1. Απόκτηση εικόνων και εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων	57
2.4.2. Τρισδιάστατη αναπαράσταση.....	61
2.4.3. Μετα-επεξεργασία και γεωαναφορά.....	63
3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΓΕΩ-ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΤΙΡΙΑΚΩΝ ΔΟΜΩΝ	65

3.1. Δεδομένα Εισόδου	65
3.2. Στάδια Επεξεργασίας	67
3.2.1. Επιλογή λογισμικού	67
3.2.2. Εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων και αντιστοίχιση εικόνων ...	68
3.2.3. Δημιουργία αραιού νέφους σημείων	68
3.2.4. Δημιουργία πυκνού νέφους σημείων	69
3.2.5. Δημιουργία υφής και τελική επεξεργασία	72
3.3. Αποτελέσματα: Επίπεδο Κτιρίου	72
3.4. Αποτελέσματα: Επίπεδο Συγκροτήματος Κτιρίων	78
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ	81
4.1. Συμπεράσματα	81
4.2. Προοπτικές Εξέλιξης	82
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Γεωμορφολογικός χάρτης παγετώνων	15
Εικόνα 1.2: Αεροφωτογραφία με τη θέση του σημείου A που εμφανίζεται στις Εικόνες 1.1 και 1.3	16
Εικόνα 1.3: Πλάγια αεροφωτογραφία.....	16
Εικόνα 1.4: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους σε 2.5D.....	18
Εικόνα 1.5: Οι τέσσερις λειτουργίες της γεωοπτικοποίησης.....	19
Εικόνα 1.6: Σχέδιο διεπαφής χρήστη	24
Εικόνα 1.7: Επιλεγμένος δρόμος στην περιοχή μελέτης όπου τα βάθη ροής φτάνουν το 1 μέτρο μετά από 1 ώρα και 50 λεπτά από την έναρξη του γεγονότος	26
Εικόνα 1.8: Απεικόνιση του φαινομένου διείσδυσης της αγοράς σε μια περιοχή με α) παραδοσιακή προσέγγιση και β) προσέγγιση τρισδιάστατης γεωοπτικοποίησης	28
Εικόνα 1.9: Διαδικασία μοντελοποίησης εικονικής πόλης	32
Εικόνα 1.10: Παράδειγμα κανονιστικής μοντελοποίησης πρόσοψης κτιρίου .	34
Εικόνα 1.11: Οπτικοποίηση της χωρικοποίησης του οφέλους και του κόστους σχετικά με τις επιλογές των ηθοποιών, ώστε αυτοί να καθοδηγούνται για το πότε μια απόφασή τους θα επηρεάσει θετικά ή αρνητικά μια κατάσταση	36
Εικόνα 1.12: Πυκνότητα του σήματος WI-FI του διαδικτύου σε τρεις διαστάσεις	36
Εικόνα 1.13: Ροές πληροφορίας σε παγκόσμια κλίμακα.....	36
<i>Εικόνα 1.14: Εξαγώμενο 3D μοντέλο από α) το SketchUp, β) το CityEngine, γ) το Photomodeler και δ) το Agisoft Photoscan</i>	<i>38</i>
<i>Εικόνα 1.15: α) Αεροφωτογραφία της περιοχής μελέτης και β) Ογκομετρική ανάλυση των υπερδομημένων (overbuilt-κόκκινο χρώμα) και υποδομημένων (underbuilt-πράσινο χρώμα) τμημάτων στην ίδια περιοχή.....</i>	<i>39</i>

Εικόνα 1.16: Ερμηνεία του ύψους του 3D μοντέλου	39
Εικόνα 1.17: Ανίχνευση μεταβολών σε 2D στην περιοχή μελέτης μεταξύ των ετών α) 2003 και β) 2011	40
Εικόνα 1.18: Τμήμα της περιοχής μελέτης σε 3D α) πριν την κατασκευή του κτιρίου και β) μετά την κατασκευή του κτιρίου με χρωματική διαβάθμιση του υψομέτρου	40
Εικόνα 1.19: Η αγορά της 3D μοντελοποίησης και χαρτογράφησης	41
Εικόνα 1.20: 3D μοντελοποίηση για το σχεδιασμό εξωτερικών χώρων κατοικίας	43
Εικόνα 1.21 3D μοντελοποίηση εκπομπών CO ²	45
Εικόνα 1.22: 3D σύστημα για την αποφυγή της μειωμένης όρασης στην οδήγηση.....	46
Εικόνα 1.23: Διαδραστικός χάρτης ρίσκου ατυχήματος	47
Εικόνα 1.24: 3D εικονικό μοντέλο του Άτλαντα	48
Εικόνα 1.25: Εικονική περιήγηση της Ακρόπολης.....	49
Εικόνα 1.26: Εικονική περιήγηση στο μουσείο της Ακρόπολης	49
Εικόνα 2.1: Κεντρική προβολή	54
Εικόνα 2.2: Επιπολική γεωμετρία δύο εικόνων	54
Εικόνα 2.3: Διαδικασία τριγωνισμού	55
Εικόνα 2.4: Μέθοδος αλγορίθμου Structure-from-Motion (SFM).....	56
Εικόνα 2.5: Μέθοδος SIFT – Εύρεση και αντιστοίχιση ομόλογων σημείων σε δύο εικόνες υπό συνθήκες αλλαγής κλίσης και φωτισμού.....	58
Εικόνα 2.6: Προσδιορίζοντας και αντιστοιχίζοντας χαρακτηριστικά σημεία σε δύο εικόνες μέσω του αλγορίθμου SIFT	59
Εικόνα 3.1: Καθεδρικός ναός της Αναλήψεως στη Ρωσία.....	67
Εικόνα 3.2: Συσχέτιση εικόνων για τη δημιουργία του σύννεφου σημείων	68

Εικόνα 3.3: Αραιό νέφος σημείων	69
Εικόνα 3.4: Πυκνό νέφος σημείων σε διάφορες εστιάσεις.....	70
Εικόνα 3.5: α) Συμπαγές, β) μόνο με ακμές και γ) χρωματισμένο πλέγμα πολυγώνων.....	71
Εικόνα 3.6: 3D Μοντελοποίηση σε επίπεδο κτιρίου - Μπροστινή όψη.....	73
Εικόνα 3.7: 3D Μοντελοποίηση σε επίπεδο κτιρίου - Οροφή.....	74
Εικόνα 3.8: 3D Μοντελοποίηση σε επίπεδο κτιρίου - Πίσω όψη.....	75
Εικόνα 3.9: 3D Μοντελοποίηση σε επίπεδο κτιρίου – Τυχαία γωνία	76
Εικόνα 3.10: Το μοντέλο στο γεωγραφικό χώρο	77
Εικόνα 3.11: Εστίαση στο γεωαναφερμένο μοντέλο	78
Εικόνα 3.12: 3D μοντελοποίηση σε επίπεδο συγκροτήματος κτιρίων – Σύνολο περιοχής	79
Εικόνα 3.13: 3D μοντελοποίηση σε επίπεδο συγκροτήματος κτιρίων – Εστιάσεις σε υποπεριοχές	80

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των 3D GIS	27
Πίνακας 1.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα εικονικών μουσείων	50
Πίνακας 2.1: Τεχνικές και εναλλακτικές λύσεις για την αναπαράσταση/μοντελοποίηση τοπογραφικών στοιχείων με υψηλή ανάλυση	52

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργασία εστιάζει στη μελέτη των σύγχρονων τάσεων σχετικά με τη γεωοπτικοποίηση (geovisualization) συνδυάζοντας τη γεωπληροφορική με προηγμένες μεθόδους επεξεργασίας εικόνας/βίντεο και όρασης υπολογιστών (computer vision) για την ρεαλιστική τρισδιάστατη αναπαράσταση και οπτικοποίηση αντικειμένων μέσα στον γεωγραφικό χώρο.

Συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται αναφορά στη γεωοπτικοποίηση, δίνονται σχετικοί ορισμοί σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και οι κατηγορίες της και πραγματοποιείται ιστορική αναδρομή σχετικά με την πορεία της τα τελευταία χρόνια και αναλύονται εφαρμογές και τεχνολογίες αιχμής. Στη συνέχεια, αναλύεται περισσότερο η τρισδιάστατη γεωοπτικοποίηση και τα χαρακτηριστικά της και παρουσιάζονται οι τεχνικές 3D μοντελοποίησης και οι κατηγορίες των τρισδιάστατων μοντέλων. Ακολούθως, μελετώνται εφαρμογές τρισδιάστατης γεωοπτικοποίησης και δίνονται συγκεκριμένα παραδείγματα αντίστοιχων πρόσφατων μελετών.

Ακολούθως, στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε. Αρχικά, περιγράφονται φωτογραμμετρικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν αλγορίθμους όρασης και επεξεργασίας εικόνας, ενώ στη συνέχεια αναλύεται ο αλγόριθμος «Structure from Motion - SFM» και το διάγραμμα ροής του που επιλέχθηκε στην παρούσα μελέτη για την αναπαράσταση της πραγματικότητας και την τρισδιάστατη μοντελοποίηση επιλεγμένων αντικειμένων.

Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την τρισδιάστατη μοντελοποίηση. Συγκεκριμένα, περιγράφονται τα αντικείμενα που επιλέχθηκαν για την αναπαράσταση, τα οποία αφορούν σε συγκεκριμένες κτιριακές δομές και καταγράφονται τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν. Ακολούθως, αναλύονται τα στάδια επεξεργασίας στο επιλεγμένο λογισμικό και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Τέλος, στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τα συμπεράσματα καθώς και οι προοπτικές εξέλιξης της παρούσας εφαρμογής και των τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν.

1. ΓΕΩΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ

Η γεωγραφική οπτικοποίηση ή γεωοπτικοποίηση χρησιμοποιείται ως όρος για την οπτικοποίηση της γεωγραφικής πληροφορίας. Ορίζεται ως η διαδικασία αξιοποίησης δεδομένων με γεωαναφορά και αποτελεί ένα πεδίο έρευνας και πρακτικής, το οποίο αναπτύσσει οπτικές μεθόδους και εργαλεία για την υποστήριξη χωρικών εφαρμογών και δεδομένων (MacEachren, et al., 2003). Βασικός στόχος της γεωοπτικοποίησης είναι η διατύπωση θεωρίας για την οπτική διερεύνηση, ανάλυση, σύνθεση και απόδοση γεωχωρικών πληροφοριών, ενσωματώνοντας μεθόδους από τα επιστημονικά πεδία της Επιστημονικής Οπτικοποίησης (Scientific Visualization), της Χαρτογραφίας, της Διερευνητικής Ανάλυσης Δεδομένων (Exploratory Data Analysis), της Ανάλυσης Εικόνας (Image Analysis) και των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) (Kraak, 2003). Η γεωοπτικοποίηση προσεγγίζει τον χρήστη, προσπαθώντας να αξιοποιήσει την πιο ισχυρή αναλυτική του αίσθηση, αυτήν της ανθρώπινης οπτικής αντίληψης (MacEachren, et al., 1999). Σύμφωνα με τις πιο σύγχρονες τάσεις, η γεωοπτικοποίηση εστιάζει στον σχεδιασμό δυναμικών χαρτών και γεωγραφικών τεχνικών με σκοπό την υποστήριξη της οπτικής ανάλυσης (visual analysis) σύνθετων στη δομή, μεγάλων σε όγκο και ετερογενών αρχείων. Οι χάρτες αυτοί επιδιώκονται να λειτουργούν ως ευέλικτα ενδιάμεσα χωρικά περιβάλλοντα επικοινωνίας χρήστη και πληροφορίας, συμβάλλοντας στην δυναμική διερεύνηση της πληροφορίας, τη διαμόρφωση ερευνητικών ερωτημάτων (Kraak 2003), την αποκάλυψη χωρικών συναφειών ή ασυνεχειών, τη λήψη αποφάσεων. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η γεωοπτικοποίηση δεν αντιμετωπίζεται απλά ως ένα σύνολο μεθοδολογιών αναπαράστασης της χωρικής πληροφορίας, αλλά ως μια εγγενής ανθρώπινη δραστηριότητα (Edsall, 2005) μέσα από την οποία δημιουργείται γνώση (MacEachren, et al., 1999).

Η γεωοπτικοποίηση αφορά στο μεγαλύτερο μέρος των περισσότερων συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) και αντικείμενό της είναι η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο μέθοδοι και εργαλεία χρησιμοποιούνται προκειμένου να διευκολύνουν στη λήψη αποφάσεων. Τεχνικές γεωοπτικοποίησης μπορούν να εφαρμοστούν σε δορυφορικές εικόνες, σε

ψηφιακά μοντέλα εδάφους (ΨΜΕ) καθώς και σε διάφορα θεματικά επίπεδα γεωπληροφοριακών συστημάτων, ώστε να διευκολύνεται η ερμηνεία φαινομένων, η διερεύνηση προτύπων και η μελέτη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της εκάστοτε εξεταζόμενης περιοχής. Με δεδομένη την ταχεία διάδοση των τηλεπισκοπικών δεδομένων και των ψηφιακών μοντέλων εδάφους υψηλής ανάλυσης, δίνεται μεγάλη βαρύτητα σε τεχνικές γεωοπτικοποίησης δορυφορικών εικόνων και μορφολογίας εδάφους, όπου η ανθρώπινη βούληση και παρατήρηση παίζει σημαντικό ρόλο στη μελέτη των γεωμορφολογικών διεργασιών και τη χαρτοσύνθεση. Η οπτική αλληλεπίδραση με χωρικά δεδομένα αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την εξερεύνηση και κατανόηση της γεωμορφολογίας και χαρακτηρίζεται από μια ποικιλία μεθόδων μεταξύ των οποίων είναι η επικάλυψη (overlay), η μετατόπιση (panning), η μεγέθυνση (zooming) καθώς και οι δισδιάστατες (2D) και τρισδιάστατες (3D) χρωροχρονικές αναλύσεις (Smith, et al., 2013).

Η «γεωοπτικοποίηση» ορίζεται ως μια διαδικασία προσέλκυσης δεδομένων για την αντιμετώπιση επιστημονικών και κοινωνικών αναγκών και ένα ερευνητικό πεδίο στο οποίο αναπτύσσονται οπτικές μέθοδοι και εργαλεία για να υποστηρίξουν ένα ευρύ φάσμα γεωγραφικών εφαρμογών και δεδομένων (MacEachren, et al., 2004). Με βάση τον παραπάνω ορισμό η έννοια της γεωοπτικοποίησης περιλαμβάνει τέσσερις βασικές λειτουργίες:

1. **Μελέτη και εξερεύνηση (explore)** των δεδομένων με στόχο την εύρεση προτύπων και επιπρόσθετης πληροφορίας
2. **Ανάλυση (analyze)** των προτύπων και των σχέσεων μεταξύ των δεδομένων
3. **Σύνθεση/επισκόπηση (synthesize)** της διαδικασίας που ακολουθήθηκε και κατανόηση της πληροφορίας που προέκυψε
4. **Παρουσίαση (present)** των αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια, επισημαίνεται ότι ο όρος «γεωοπτικοποίηση» (geovisualization) έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως και αδιακρίτως και έχει γίνει συνώνυμος με τον όρο «χαρτογράφηση» (Kraak, 2008). Ως εκ τούτου, υπάρχει μια κατηγορία ερευνητών που τάσσεται υπέρ της χρήσης του όρου «geovisual analytics» (Thomas & Cook, 2005; Andrienko, et al., 2007).

1.1. Ιστορική Αναδρομή

Κατά το παρελθόν έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές συζητήσεις σχετικά με την ορολογία που περιβάλλει την έννοια της γεωγραφικής οπτικοποίησης. Παρ' όλα αυτά, είναι κοινώς αποδεκτό ότι η γεωοπτικοποίηση, στην απλούστερη μορφή της, είναι μια σύνθεση της κλασικής χαρτογραφίας με τις επίκαιρες ψηφιακές αναλυτικές τεχνικές και κυρίως τα GIS.

Ιστορικά, οι χάρτες συνήθως χρησιμοποιούνταν για να βοηθήσουν στην ερμηνεία και την κατανόηση των διαφόρων γεγονότων και φαινομένων, αφού μέσω αυτών η πληροφορία συσχετιζόταν με συγκεκριμένη τοποθεσία στο χώρο, δημιουργώντας χωρικά πρότυπα. Η οπτική ερμηνεία των δεδομένων και των διαφόρων εννοιολογικών ιδεών αποτελούσε διαχρονικά βασικός παράγοντας της ανθρώπινης κατανόησης (Kraak & Ormeling, 2010). Στις επόμενες εικόνες εμφανίζονται μερικά παραδείγματα κοινών μεθόδων γεωγραφικής οπτικοποίησης. Συγκεκριμένα, η Εικόνα 1.1 αναδεικνύει τη χρησιμότητα της δημιουργίας χαρτών για τη διερεύνηση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής, τα οποία είναι δύσκολο να αποδοθούν χρησιμοποιώντας κάθετες (Εικόνα 1.2) και πλάγιες (Εικόνα 1.3) αεροφωτογραφίες.



Εικόνα 1.1: Γεωμορφολογικός χάρτης παγετώνων

Πηγή: Γεωμορφολογικός χάρτης παγετώνων
Πηγή: Google Maps



Εικόνα 1.2: Αεροφωτογραφία με τη θέση του σημείου A που εμφανίζεται στις Εικόνες 1.1 και 1.3

Πηγή: Rose & Smith, 2008



Εικόνα 1.3: Πλάγια αεροφωτογραφία
Πηγή: Rose & Smith, 2008

Παράλληλα με τους χάρτες, χρησιμοποιούνται συστηματικά και άλλες εναλλακτικές μέθοδοι για την απεικόνιση χωρικών δεδομένων (Kraak & Ormeling, 2010) όπως σκίτσα πεδίου, εννοιολογικά διαγράμματα, κάθετες και πλάγιες αεροφωτογραφίες (Εικόνες 1.2 και 1.3), δορυφορικές εικόνες, ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEMs) και επαυξημένη πραγματικότητα (Reitmayr, et al., 2005).

Ιστορικά, η γεωγραφική οπτικοποίηση ήταν μια αναλογική τεχνική που γινόταν στο χαρτί (paper-based). Σήμερα, αντίθετα, περιλαμβάνει συλλογές από μεγάλου όγκου ψηφιακά αρχεία (big data), λεπτομερείς αναλύσεις και ψηφιακή (computer-based) οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Η σύγχρονη χαρτογράφηση είναι, λοιπόν, μέθοδος εξαρτημένη από τον υπολογιστή και βασίζεται σε ψηφιακά δεδομένα, βάσεις αποθήκευσης δεδομένων μεγάλου όγκου και διαδικασίες ανάλυσης και οπτικοποίησης που πραγματοποιούνται μέσω των GIS.

Ειδικότερα, η εμφάνιση και ευρεία χρήση των GIS συνέβαλλε στην άνθηση της γεωγραφίας και της επιστήμης της γεωγραφικής πληροφορίας, καθώς μέσω αυτών παρέχονται δυνατότητες διαχείρισης, αποθήκευσης, ανάλυσης και απεικόνισης χωρικών δεδομένων. Με τις τελευταίες αναβαθμίσεις, ο χώρος μπορεί πλέον να συσχετιστεί με τον χρόνο, δίνοντας τη δυνατότητα διεξαγωγής χωροχρονικών αναλύσεων και διαχείρισης χρονικών δεδομένων. Μέσω των συστημάτων αυτών μπορούν να συνδυαστούν δεδομένα από διάφορες πηγές, όπως δεδομένα γεωδαιτικών σταθμών (Total station data), δεδομένα από συστήματα εντοπισμού θέσης (GPS), δεδομένα δορυφορικών εικόνων και

ιστορικά δεδομένα. Τα παραπάνω μπορούν να αποδώσουν μια ολοκληρωμένη και σαφή προσέγγιση της πραγματικότητας και να οδηγήσουν σε λεπτομερείς διαδικασίες ανάλυσης και ερμηνείας διαφόρων φαινομένων.

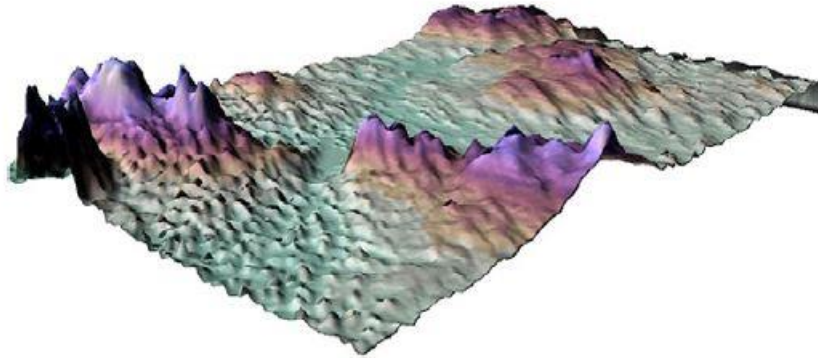
1.2. Οπτική Αλληλεπίδραση και οι Διαστάσεις της

Ένας απλός τρόπος για την αλληλεπίδραση με τα δεδομένα είναι μέσω δραστηριοτήτων όπως είναι η μεγέθυνση, η περιήγηση, η περιστροφή και η επεξεργασία. Παρόλο που οι συγκεκριμένες τεχνικές έχουν αρχίσει να φαίνονται ασήμαντες λόγω της ευκολίας με την οποία ο χρήστης τις εκτελεί, η στοιχειώδη οπτική εξερεύνηση, που είναι μία ουσιαστική διαδικασία, στηρίζεται σε σημαντικό βαθμό σε αυτές. Τα περισσότερα εμπορικά λογισμικά επεξεργασίας εικόνας και GIS υποστηρίζουν τις βασικές διαδραστικές απεικονίσεις, συνήθως ενισχύοντας τις με μη χωρικά στατιστικά παράγωγα. Για παράδειγμα, τα ιστογράμματα των ψηφιακών μοντέλων εδάφους μπορούν να επισημάνουν αντικείμενα που προκύπτουν από τη μετατροπή των ισοϋψών καμπύλων (Wise, 2000).

Τα κινούμενα σχέδια (animations) παρέχουν μία ισχυρή εναλλακτική για την οπτικοποίηση δεδομένων, απεικονίζοντας αλλαγές χαρακτηριστικών σε διανυσματικά και ψηφιδωτά δεδομένα. Επιπλέον, τα χρονικά δεδομένα μπορούν να αναπαρασταθούν αρκετά αποτελεσματικά με κινούμενα σχέδια όπου κάθε καρέ αντιπροσωπεύει ένα σταθερό μέρος του χρόνου. Το κάθε καρέ μπορεί να αναπτυχθεί με σταθερό ρυθμό, ή να επεξεργαστεί χειρωνακτικά με τη χρήση ενός ρυθμιστή (slider) χρόνου. Για παράδειγμα, έχοντας διάφορα μοντέλα του χώρου (από δορυφορικές εικόνες, εναέριες λήψεις κτλ.), το ψηφιακό μοντέλο εδάφους μπορεί να προσομοιωθεί σε κάθε χρονικό στάδιο. Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να συμβάλλει στην εφαρμογή ποσοτικής ανάλυσης και πιο συγκεκριμένα σε εφαρμογές ανίχνευσης μεταβολών σε διαχρονικά δεδομένα ή σε χρονοσειρές (Chen, et al., 2004).

Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους, ωστόσο, αποτελούν μία ειδική περίπτωση καθώς αποτελούν μία δισδιάστατη συστοιχία που αναπαριστά την άνω επιφάνεια ενός τρισδιάστατου όγκου, αλλά δεν είναι τρισδιάστατα καθώς δεν καθορίζουν επακριβώς έναν όγκο. Επίσης, δεν είναι δισδιάστατα, με την έννοια του επίπεδου χάρτη και για αυτό πολλές φορές αναφέρονται και ως 2.5D

δεδομένα. Μια μεγάλη ποικιλία λογισμικών GIS επιτρέπουν την πλοήγηση σε τρισδιάστατη προοπτική, εξετάζοντας κάθετα και οριζόντια την επιφάνεια του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Στην Εικόνα 1.4 εμφανίζεται ένα παράδειγμα ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε τρισδιάστατο σύστημα απεικόνισης, το οποίο επιτρέπει στο χρήστη να έχει προοπτική όψη του εδάφους, αξιοποιώντας αεροφωτογραφίες ή δορυφορικές εικόνες.



Εικόνα 1.4: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους σε 2.5D

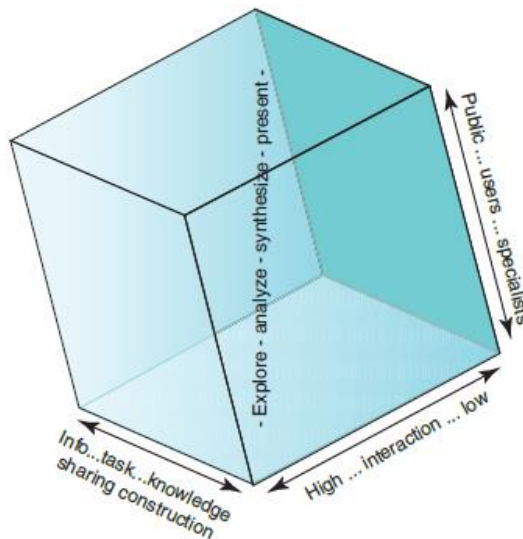
Πηγή: Smith, et al., 2013

Τα σύγχρονα λογισμικά τρισδιάστατης οπτικοποίησης μπορούν να αναπαραστήσουν λεπτομερώς έναν τρισδιάστατο όγκο χρησιμοποιώντας αληθή τρισδιάστατη απεικόνιση και προσφέροντας δυνατότητες χωρικής ανάλυσης. Η οπτικοποίηση τέτοιων δεδομένων μπορεί να ενισχυθεί συνήθως μέσα από την εφαρμογή στερεοσκοπικών διαδικασιών. Μία ποικιλία τέτοιων συστημάτων έχουν πλέον αναπτυχθεί και αξιοποιούν είτε πολωμένες τεχνικές είτε τεχνικές κλείστρου (shutter-based). Στα πολωμένα συστήματα μία οθόνη μπορεί να εμφανίσει πολωμένες εικόνες που έχουν διεμπλακεί στην οθόνη μέσω της χρήσης πολωμένων γυαλιών, όπου το ανθρώπινο οπτικό σύστημα συγκεντρώνει το αποτέλεσμα της οθόνης σε μία τρισδιάστατη εικόνα. Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα κλείστρου (shutter-based) χρησιμοποιούν γυαλιά που ελέγχονται ενεργά από τον κεντρικό υπολογιστή, ο οποίος συγχρονίζει μέσω του κλείστρου την απεικόνιση της δεξιάς και αριστερής στερεοσκοπικής εικόνας, αξιοποιώντας έτσι την πλήρη ανάλυση της οθόνης, σε αντίθεση με την πολωμένη τεχνική που αξιοποιεί τη μισή ανάλυση. Η ενσωμάτωση και χρήση τέτοιου είδους τεχνολογιών συμβάλλει στην ολοκλήρωση της αλληλεπίδρασης

με την επιφάνεια του εδάφους, των κατασκευών πάνω σε αυτήν καθώς και με την πληροφορία του υπεδάφους.

1.3. Εφαρμογές Γεωοπτικοποίησης

Οι βασικές λειτουργίες της γεωοπτικοποίησης που αναφέρθηκαν νωρίτερα (MacEachren, et al., 2004) απεικονίζονται στην Εικόνα 1.5, όπου οι άξονες του κύβου δείχνουν την εργασία που εκτελείται, τον χρήστη που την εκτελεί και τον βαθμό αλληλεπίδρασης με τα δεδομένα που οπτικοποιούνται. Στο πλαίσιο αυτό, οι τέσσερις λειτουργίες που προτείνονται κινούνται διαδοχικά από την υψηλή διαδραστική εξερεύνηση των στοιχείων από ειδικούς, με σκοπό τη δημιουργία βασικής εμποπτικής γνώσης, στην παρουσίαση σύνθετης πληροφορίας στο κοινό, αλληλοεπιδρώντας μερικώς με τα δεδομένα (MacEachren, et al., 2004). Η δημιουργία γνώσης (“knowledge construction”), στην αρχή των αξόνων, απαιτεί έναν ειδικό με υψηλό βαθμό αλληλεπίδρασης με τα δεδομένα. Στη συνέχεια, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη εφαρμογής (“task”) που θα καθιστά εφικτή την απλή ανταλλαγή πληροφοριών (“information sharing”) για το κοινό και τους φορείς λήψης των αποφάσεων, που βρίσκονται στο αντίθετο άκρο του άξονα.



Εικόνα 1.5: Οι τέσσερις λειτουργίες της γεωοπτικοποίησης

Πηγή: MacEachren, et al., 2004

Εφαρμογές γεωοπτικοποίησης συναντώνται σε πολλούς τομείς. Κάποιες απαιτούν μεγάλη αλληλεπίδραση με τα δεδομένα, εμπειρία και εξειδικευμένη

γνώση και άλλες αποσκοπούν στην απλή μετάδοση πληροφορίας και την επικοινωνία μεταξύ χρηστών και ειδικών. Το σίγουρο είναι πως υπάρχει μια συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για οπτική αναπαράσταση των διαφόρων φαινομένων που συμβαίνουν στον γεωγραφικό χώρο με τρόπο κατανοητό που ταυτόχρονα να επιτρέπει τη διαδραστικότητα και την εξερεύνηση των δεδομένων (exploratory data analysis). Ενδιαφέρουσες τεχνικές και μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην γεωοπτικοποίηση και αποτελούν αντικείμενο έρευνας είναι (Ragia & Fiume, 2009):

- 1. 3D Geovisualization.** Υπάρχει η ανάγκη για την ανάπτυξη βελτιωμένων μοντέλων για να αναπαρασταθούν δεδομένα τριών διαστάσεων. Παραδοσιακά, οι χωρικές πληροφορίες παραμετροποιούνταν σε δύο διαστάσεις, αλλά πλέον υπάρχει μεγάλος όγκος δεδομένων που είναι τρισδιάστατα. Ο χειρισμός τέτοιων στοιχείων διαδραστικά και ρεαλιστικά απαιτεί υψηλές επιδόσεις τόσο σε επίπεδο hardware όσο και σε επίπεδο software. Παράλληλα, υπάρχει ανάγκη για την ανάπτυξη ισχυρών εργαλείων γεωοπτικοποίησης που θα είναι σε θέση να διαχειριστούν αποδοτικά τρισδιάστατα δεδομένα και μοντέλα και να επιτρέπουν την διεξαγωγή διαδικασιών χωρικής ανάλυσης. Για παράδειγμα, η απεικόνιση των τοπολογικών σχέσεων στον τρισδιάστατο χώρο για γεωλογικούς σκοπούς δεν υποστηρίζεται μέχρι στιγμής και απαιτεί περαιτέρω έρευνα.
- 2. Distributed Geovisualization.** Με την ταχεία διάδοση των δεδομένων μέσω του διαδικτύου και την ελεύθερη (ή μη) διάθεση μεγάλου όγκου δεδομένων από δορυφόρους, αεροφωτογραφίες και συστήματα αισθητήρων, μπορούν να αναπτυχθούν πολλές και ποικίλες εφαρμογές που σχετίζονται με διάφορους τομείς όπως η γεωλογία, ο αστικός σχεδιασμός, η υγεία, τα δημογραφικά χαρακτηριστικά κ.α.. Τα δεδομένα αυτά, συχνά, αποθηκεύονται και διαχειρίζονται τοπικά και οι χρήστες μπορεί να έχουν πρόσβαση μόνο σε κάποια από αυτά. Η δυνατότητα ταυτόχρονης διερεύνησης δεδομένων από διαφορετικές πηγές μπορεί να βοηθήσει στην απόκτηση σημαντικών, επιπρόσθετων πληροφοριών και σε μια πιο ολοκληρωμένη μελέτη του εκάστοτε εξεταζόμενου φαινομένου. Παρ' όλα αυτά δεν υπάρχουν εργαλεία ικανά για αυτόματη

εξαγωγή και οπτικοποίηση δεδομένων, τα οποία βρίσκονται αποθηκευμένα σε διαφορετικές βάσεις δεδομένων. Ο όρος “distributed” χρησιμοποιείται για την αναφορά στη χρήση στοιχείων, τα οποία μπορεί να βρίσκονται κατανεμημένα και κατηγοριοποιημένα σε διάφορους φορείς, εφαρμογές και servers.

3. Συνδυασμός Γεωοπτικοποίησης και Γεωυπολογιστικής (Geocomputation). Η συνεχώς αυξανόμενη υπολογιστική ισχύ δίνει νέες δυνατότητες και διαστάσεις στην γεωοπτικοποίηση. Οι αναπαραστάσεις φυσικών μοντέλων μέσω του υπολογιστή και κατάλληλων εργαλείων, αν και εξακολουθεί να αποτελεί χρονοβόρα διαδικασία, δίνει τη δυνατότητα διαδραστικής οπτικοποίησης των εκάστοτε εξεταζόμενων φαινομένων. Μέθοδοι αναπαράστασης και απεικόνισης που αρχικά αποτελούσαν off-line, στατικές διαδικασίες, είναι πλέον on-line και επιτρέπουν την εφαρμογή δυναμικών τεχνικών διερεύνησης των δεδομένων. Για παράδειγμα, η ανάλυση ενός συγκεκριμένου φαινομένου όπως είναι οι δασικές φωτιές ή οι κατολισθήσεις μπορεί να συνδεθεί με την διαδραστική προσομοίωση (simulation), ώστε να καταστεί εφικτή η διερεύνηση των βαθύτερων αιτιών του ή η πρόβλεψη για μελλοντική επανεμφάνιση. Συνεπώς, η ύπαρξη κατάλληλων και σύγχρονων εργαλείων διαδραστικής οπτικοποίησης που θα επιτρέπουν την λεπτομερή διερεύνηση και ανάλυση των δεδομένων έχει μεγάλη σημασία. Συνεχώς απαιτούνται όλο και πιο δυναμικές μέθοδοι που θα μπορούν να ανακαλύπτουν σύνθετες σχέσεις, πρότυπα και κρυφά χαρακτηριστικά των δεδομένων με διαδραστικό τρόπο.

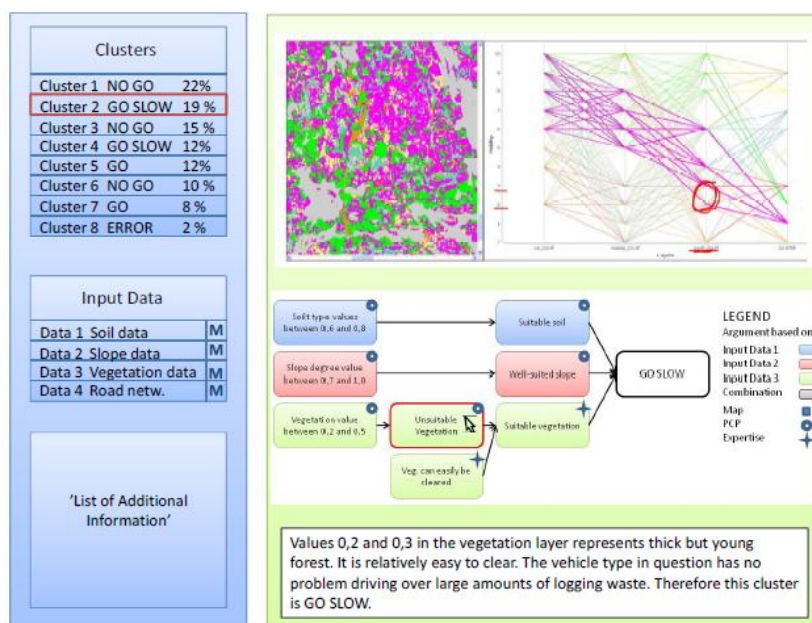
Η γεωοπτικοποίηση συνδυάζεται, συχνά, και με άλλες τεχνολογίες με στόχο την βέλτιστη απεικόνιση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων, την κατανόηση της διαδικασίας ανάλυσης που ακολουθήθηκε και την διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων, τα οποία επιθυμείται να παρουσιαστούν με εύληπτο τρόπο, με στόχο την βελτίωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων και δημιουργίας υποθέσεων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ορισμένα παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών που παρουσιάστηκαν τα τελευταία χρόνια στην επιστημονική κοινότητα και αποτυπώνονται οι σύγχρονες τάσεις.

Οι Gahegan, et al. (2001) προτείνουν τον συνδυασμό των τριών τεχνολογιών: geovisualization, knowledge discovery in databases (KDD και geocomputation. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται και διαχειρίζεται με τον καλύτερο τρόπο η νέα γνώση μέσα από μεγάλες βάσεις δεδομένων. Αρχικά, η τεχνολογία γνωστή ως knowledge discovery in databases (KDD) χρησιμοποιείται για την αναγνώριση προτύπων και την εξαγωγή νέας γνώσης από μεγάλα σύνολα δεδομένων. Στη συνέχεια, η γεω-υπολογιστική (Geocomputation) έχει ευρεία χρήση στην παροχή απαντήσεων σε γνωστά ερωτήματα (και όχι τόσο στην αναγνώριση προτύπων) και μπορεί να αποκτήσει χωρική διάσταση. Το πλεονέκτημα της γεω-υπολογιστικής είναι η μεγάλη εμπειρία στον τομέα της υπολογιστικής μάθησης, ο οποίος μπορεί να συνδυαστεί με ένα γεωγραφικό περιβάλλον. Παράλληλα με τα παραπάνω, γίνεται λόγος για την διερευνητική οπτική ανάλυση (exploratory visual analysis), η οποία χρησιμοποιείται για την αναγνώριση προτύπων καθώς και την μελέτη και εξήγηση της δομής αυτών, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της διεπαφής ανθρώπου και υπολογιστή. Στην περίπτωση αυτή η απεικόνιση των δεδομένων και των προτύπων τους μέσω του υπολογιστή δεν είναι το τελικό αποτέλεσμα αλλά έχει ως απώτερο στόχο την παροχή της δυνατότητας στο χρήστη να μεταβάλει τις διάφορες απεικονιζόμενες παραμέτρους, να πειραματιστεί, για κάνει υποθέσεις και τελικά να οδηγηθεί σε αποφάσεις.

Λίγο αργότερα, οι Chertov, et al. (2005) δημοσίευσαν μια μελέτη με τίτλο «Geovisualization of forest simulation modeling results: A case study of carbon sequestration and biodiversity» στην οποία συνδυάζονται τεχνικές μοντελοποίησης, συστήματα GIS και η οπτικοποίηση των δεδομένων, με σκοπό την αξιολόγηση πρακτικών για τη βέλτιστη διαχείριση των δασικών εκτάσεων. Οι συγγραφείς επιδιώκουν να χρησιμοποιήσουν συνδυασμένες τεχνολογίες χωρικής ανάλυσης ως εργαλείο για την λήψη αποφάσεων στον τομέα της δασοκομίας τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Το μοντέλο δασικού οικοσυστήματος που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται EFIMOD 2 και μέσω αυτού προσεγγίστηκαν διάφορες οικολογικές παράμετροι, με περιοχή μελέτης ένα δάσος την κεντρική ευρωπαϊκή Ρωσία. Το γεωγραφικό σύστημα για την ανάλυση και οπτικοποίηση των δεδομένων ήταν το CommonGIS. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν έγιναν για τέσσερις διαφορετικές

πρακτικές διαχείρισης και σε αυτές τέθηκαν ορισμένες γνωστές παράμετροι, όπως ο τύπος του εδάφους και η δασική σύνθεση κλπ. Μετά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, οι συγγραφείς πραγματοποίησαν διερευνητική ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης (exploratory data analysis) και χρησιμοποίησαν επιλεγμένα κριτήρια και δείκτες για την σύγκριση των διαφορετικών πρακτικών διαχείρισης. Τα συμπεράσματα αυτών ανέδειξαν την ορθότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου και για το λόγο αυτό κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ολοκληρωμένη μοντελοποίηση και οπτικοποίηση ενός φαινομένου μπορεί να αποδειχθεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων σχεδιασμού του χώρου και την δημιουργία υποθετικών σεναρίων.

Πιο πρόσφατα, οι Hall & Ahonen-Rainio (2012) μελέτησαν μεθόδους οπτικοποίησης γνώσης (knowledge visualization) και δεδομένων εισόδου με σκοπό την εξαγωγή βελτιωμένων αποτελεσμάτων τα οποία να χαρακτηρίζονται από διαφάνεια, σε μία μελέτη περίπτωσης. Συγκεκριμένα, διεξήχθη μια ελεγχόμενη από το χρήστη χωρική ανάλυση της κινητικότητας σε εθνικό επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη διάφορα δεδομένα του εδάφους, του περιβάλλοντος και των εκάστοτε χρήσεων γης. Η περιοχή μελέτης διαχωρίζεται σε επιμέρους υποπεριοχές, οι οποίες εμφανίζουν όμοια χαρακτηριστικά και στη συνέχεια ο χρήστης κατηγοριοποιεί τα τμήματα αυτά σε ζώνες επιπέδου κίνησης με την περιγραφή: “GO”, “GO SLOW” ή “NO GO”, με τη βοήθεια ενός χάρτη και την παράλληλη παρατήρηση κατάλληλων διαγραμμάτων (parallel coordinate plot, PCP). Συνεπώς, με τον τρόπο αυτό η ανάλυση αποτελεί μια διαδραστική διαδικασία, στην οποία η γνώση και η εμπειρία του αναλυτή είναι σημαντικός παράγοντας επιτυχίας. Η επιφάνεια διεπαφής του χρήστη παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.6 για ένα συγκεκριμένο παράδειγμα. Στην περίπτωση αυτή μελετάται η περιοχή 2, μέσω του χάρτη, του διαγράμματος ροής και του PCP και τελικά χαρακτηρίζεται ως “GO SLOW”. Τελικά, επισημαίνεται πως η (γεω)οπτικοποίηση της γνώσης με τέτοιους τρόπους φαίνεται πως βοηθάει στην καλύτερη διαχείρισή της κατά τη διαδικασία χωρικής ανάλυσης και ειδικά σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν δεδομένα μεγάλου όγκου.



Εικόνα 1.6: Σχέδιο διεπαφής χρήστη

Πηγή: Hall & Ahonen-Rainio, 2012

Τα τελευταία χρόνια η γεωοπτικοποίηση συνδυάζεται με τον τομέα της γεωοπτικής αναλυτικής (geovisual analytics) και μάλιστα, συχνά, θεωρούνται παρεμφερείς έννοιες. Με την γεωοπτική αναλυτική, η γεωοπτικοποίηση (geovisualization) συναντά την οπτικοποίηση πληροφοριών (information visualization), την επιστημονική οπτικοποίηση (scientific visualization) και τεχνικές ανάλυσης δεδομένων (analysis of data) και υπολογιστικών μετασχηματισμών (computational transformation), με στόχο (Donolo, 2014):

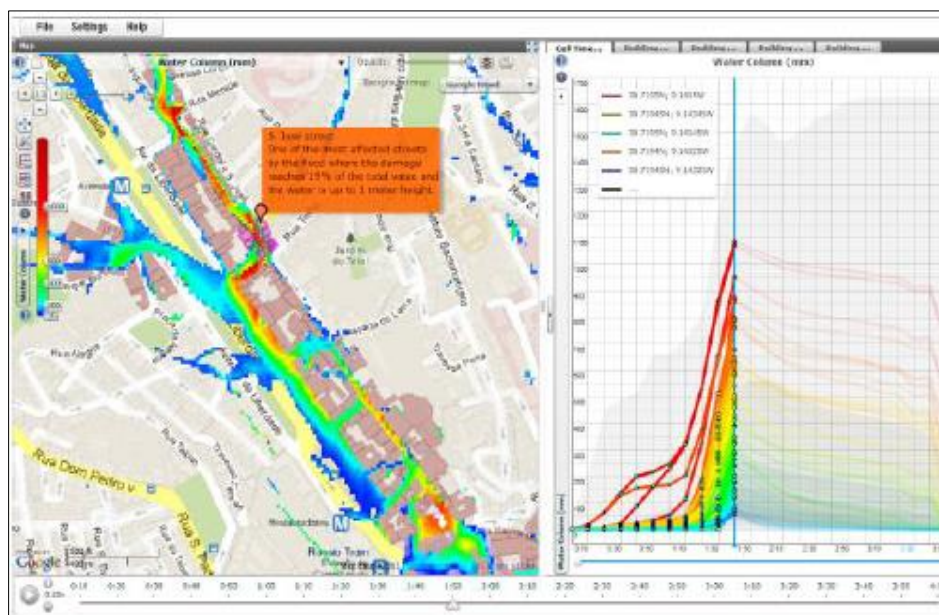
- την παροχή αναλυτικών συλλογιστικών τεχνικών που επιτρέπουν στους χρήστες να αποκτήσουν βαθιά γνώση του υπό μελέτη φαινομένου και βοηθούν στην αξιολόγηση, τον σχεδιασμό και την λήψη αποφάσεων,
- την οπτική αναπαράσταση και την χρήση τεχνικών αλληλεπίδρασης, που εκμεταλλεύονται τις δυνατότητες του ανθρώπινου ματιού και επιτρέπουν στο χρήστη να δει, να εξερευνήσει και να κατανοήσει μεγάλες ποσότητες πληροφορίας με μια ματιά.

Ένα από τα πολλά παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών αποτελεί η μελέτη των Ho & Jern (2013) με τίτλο «Geovisual Analytics and Storytelling Applied to a Flood Scenario». Η συγκεκριμένη δημοσίευση αφορά στην ανάπτυξη ενός συστήματος για την ανάλυση δεδομένων πλημμύρας, μέσω της προσομοίωσης πραγματικού πλημμυρικού γεγονότος. Τα δεδομένα του συστήματος αφορούν

σε βάθη ροής (σε μορφή κανάβου) ενός πλημμυρικού γεγονότος που συνέβη στην πόλη του Lisbon και είχε χρονική διάρκεια τέσσερις ώρες. Επιπρόσθετα, εμφανίζεται το επίπεδο των κτιριακών υποδομών της περιοχής μελέτης, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του ποσοστού της ζημιάς ανάλογα με το μέσο πλημμυρικό βάθος του εκάστοτε κτιρίου. Το σύστημα παρέχει συνδεδεμένα παράθυρα (multiple coordinated linked views) για την καλύτερη οπτικοποίηση και κατανόηση όλων αυτών των στοιχείων. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη η επισκόπηση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων από διάφορες προοπτικές. Τα διασυνδεδεμένα αυτά παράθυρα περιέχουν:

- τον χάρτη της περιοχής με τα θεματικά επίπεδα,
- ένα time slider που βοηθά το χρήστη να κινηθεί μπρος και πίσω στη διάσταση του χρόνου, εξερευνώντας τα δεδομένα κάθε χρονική στιγμή,
- ένα χρονικό γράφημα για την ανάλυση χρονοσειρών δεδομένων που αφορούν σε επιλεγμένα κελιά του κανάβου, όπως τα πλημμυρικά βάθη για μια επιλεγμένη περιοχή ενδιαφέροντος
- ένα χρονικό γράφημα για την ανάλυση χρονοσειρών δεδομένων που αφορούν σε επιλεγμένα κτίρια, όπως το μέσο πλημμυρικό βάθος και το ποσοστό ζημιάς που χαρακτηρίζουν το εκάστοτε κτίριο
- άλλα εργαλεία όπως: bar chart, scatter plot, data table για την ανάλυση των δεδομένων των πινάκων (attribute values) του επιπέδου των κτιρίων.

Το παραπάνω σύστημα αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την οπτική αναπαράσταση, μελέτη και ανάλυση ενός φαινομένου (π.χ. πλημμυρικού), βοηθώντας τον χρήστη να κατανοήσει και να διαχειριστεί πολλά και διαφορετικά δεδομένα, τόσο στο επίπεδο του χώρου όσο και στο επίπεδο του χρόνου.



Εικόνα 1.7: Επιλεγμένος δρόμος στην περιοχή μελέτης όπου τα βάθη ροής φτάνουν το 1 μέτρο μετά από 1 ώρα και 50 λεπτά από την έναρξη του γεγονότος

Πηγή: Ho & Jern, 2013

1.4. Σύγκριση 2D και 3D Γεωοπτικοποίησης

Η βιβλιογραφία περιγράφει τα οφέλη των 3D GIS συγκριτικά με τα 2D. Ο Maarel (2005) σημείωσε ότι δεν μπορεί κάθε πολίτης να διαβάσει και να ερμηνεύει ένα χάρτη ως χαρτογράφος και επισήμανε ότι 3D εφαρμογές έχουν αποδειχθεί πολύ αποδοτικές στο να παρέχουν πληροφορίες με μια καθαρή και κατανοητή χωρική μορφή επικοινωνίας. Ο Carson (1998) υποστήριξε ότι τα συμβατικά δισδιάστατα χαρτογραφικά αποτελέσματα των παραδοσιακών GIS διαχειρίζονται ικανοποιητικά λειτουργικά δεδομένα, αλλά δεν αντιπροσωπεύουν κατάλληλα οπτικά δεδομένα. Μια μεγάλη διαφορά μεταξύ των 2D και των 3D GIS είναι η ποσότητα των δεδομένων που διαχειρίζονται και επεξεργάζονται. Παράλληλα, υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση στις «διαστάσεις» του συστήματος, καθώς ένα 3D GIS διαχωρίζεται από ένα κανονικό GIS με δύο τρόπους: μέσω των διαστάσεων των χωρικών δεδομένων που μπορεί να διαχειριστεί και μέσω της οπτικής διάστασης των χωρικών δεδομένων, όπου στην πρώτη περίπτωση οπτικά 3D μοντέλα παρέχουν πρόσθετη διάσταση που βοηθά στον καθορισμό μιας πιο ρεαλιστικής προσέγγισης του χώρου και των διαφόρων φαινομένων (Abdalla, 2004). Με βάση τον Maarel (2005), το 3D GIS έχει μια μοναδική ικανότητα να προσφέρει

μια first-person προοπτική, η οποία είναι συχνά πιο αποτελεσματική από έναν δισδιάστατο χάρτη. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1.1) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα πλεονεκτήματα καθώς και τα μειονεκτήματα του 3D GIS, που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Επιτρέπουν την ταυτοποίηση και μελέτη προτύπων και τάσεων που χαρακτηρίζουν τα χωρικά δεδομένα με γρήγορες και αποτελεσματικές μεθόδους.	Η χωρική δομή των δεδομένων είναι πολύπλοκη.
Αναπαριστούν εξαιρετικά τα οπτικά δεδομένα και παράλληλα είναι σε θέση να διαχειριστούν και λειτουργικά δεδομένα.	Απαιτείται μεγάλος όγκος δεδομένων.
Μπορούν να εκτελέσουν ογκομετρικούς υπολογισμούς για διάφορες εφαρμογές.	Είναι δύσκολη η υλοποίησή τους στο διαδίκτυο.
Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη υλοποίηση περιβαλλοντικών μοντέλων, στα οποία απαιτείται η διαχείριση τρισδιάστατων καθώς και χρονικών δεδομένων.	Μειωμένη διαλειτουργικότητα μεταξύ των συστημάτων.
Παρέχουν ένα ρεαλιστικό περιβάλλον που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από διαφορετικά κοινά.	Συνεπάγονται βαρύ σύστημα επεξεργασίας που οδηγεί σε μεγάλους χρόνους απόδοσης.
Είναι ικανά να αναπαραστήσουν κατάλληλα περίπλοκα γεωγραφικά φαινόμενα.	Η μοντελοποίηση της λειτουργικότητας είναι κατά κύριο λόγο γραφικά προσανατολισμένη (graphics-oriented).

Πίνακας 1.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των 3D GIS

1.5. Τρισδιάστατη Γεωοπτικοποίηση

Η τρισδιάστατη οπτικοποίηση (3D visualization) σχετίζεται με την αναπαράσταση τρισδιάστατων αντικειμένων και επιφανειών. Για αρκετά χρόνια η τρίτη διάσταση χρησιμοποιήθηκε από πολλά συστήματα οπτικοποίησης, χωρίς όμως να παρατηρείται διάκριση του πότε και του πώς μπορούσε να χρησιμοποιηθεί πιο αποτελεσματικά (Dykes, et al., 2005).

Η τρισδιάστατη οπτικοποίηση κρίνεται αναγκαία σε πολλές εφαρμογές για διάφορους λόγους (Mach & Petschek, 2007). Αρχικά, ο παρατηρητής μπορεί να παρατηρήσει το μοντέλο από διαφορετικές οπτικές γωνίες και να δει ένα αντικείμενο ή μια περιοχή τρισδιάστατα. Αυτό συνδέεται με τη φυσική ικανότητα

του ανθρώπου να βλέπει τρισδιάστατα με αποτέλεσμα την καλύτερη κατανόηση της πολυπλοκότητας των επιφανειών και της γεωμετρίας τους. Παράλληλα, μέσω της τρισδιάστατης οπτικοποίησης καθίσταται δυνατή η αλληλεπίδραση του παρατηρητή με τις τρεις διαστάσεις, ενώ ταυτόχρονα οι προβληματικές περιοχές πολύπλοκων κατασκευών μπορούν να αναπαρασταθούν ευκολότερα τρισδιάστατα. Επιπρόσθετα, η τρισδιάστατη οπτικοποίηση επιτρέπει την κατανόηση και περιγραφή της διαδικασίας ανάλυσης των δεδομένων, ενώ οι έννοιες και οι ιδέες στη διαδικασία του σχεδιασμού μπορούν να αποδοθούν ευκολότερα, συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους χαρτογράφησης (Εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.8: Απεικόνιση του φαινομένου διείσδυσης της αγοράς σε μια περιοχή με α) παραδοσιακή προσέγγιση και β) προσέγγιση τρισδιάστατης γεωοπτικοποίησης

Πηγή: Donolo, 2014

Οι αληθείς τρισδιάστατες τεχνικές χρησιμοποιούνται προκειμένου να απεικονίσουν φαινόμενα με χωρική έκταση, όπως το αστικό περιβάλλον. Αλληλεπιδράσεις διαφορετικών φαινομένων, κίνηση φαινομένων στο χώρο (π.χ. στη γεωλογία, κλιματολογία, αρχιτεκτονική του χώρου κλπ.) αποτελούν δημοφιλείς απεικονίσεις. Πεδία εφαρμογών στα οποία εφαρμόζονται αληθείς τρισδιάστατες τεχνικές στη γεωοπτικοποίηση περιλαμβάνουν (Dykes, et al., 2005):

- **Μηχανισμούς σχεδιασμού.** π.χ. κλιματολογικός σχεδιασμός
- **Αναλύσεις.** π.χ. περιβαλλοντικές αναλύσεις που βασίζονται σε αντικειμενοστραφή δεδομένα
- **Εκπαίδευση.** π.χ. η χρήση αναγλύφων για την εκπαίδευση στη γεωλογία και στη χαρτογραφία στο Πανεπιστήμιο της Βόρειας Ντακότας (North Dakota State University, 2002)

- **Πηγές πληροφοριών.** π.χ. η «SRTM mission» αναπαράσταση των τρισδιάστατων δεδομένων με πολλαπλές στερεοσκοπικές τεχνικές (NASA, 2003)
- **Χάρτες ως τέχνη.** π.χ. η δουλειά του Ambroziak (Ambroziak & Ambroziak, 1999)

1.5.1. 3D μοντελοποίηση

Η 3D μοντελοποίηση είναι η διαδικασία ανάπτυξης μιας μαθηματικής αναπαράστασης για μια τρισδιάστατη επιφάνεια ενός αντικειμένου, μέσω εξειδικευμένου λογισμικού. Το τελικό προϊόν ονομάζεται 3D μοντέλο και μπορεί να δημιουργηθεί είτε αυτόματα, είτε χειροκίνητα. Πρόσφατα, νέες τάσεις και τεχνολογίες στην 3D μοντελοποίηση έχουν αρχίσει να αναδύονται, όπως η μοντελοποίηση της κίνησης ενός 3D αντικειμένου.

Σήμερα, τα 3D μοντέλα χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία ποικιλία τομέων. Η ιατρική βιομηχανία, η βιομηχανία του κινηματογράφου χρησιμοποιεί, η βιομηχανία των (βιντεο)παιχνιδιών, οι αρχιτέκτονες, οι γεωλόγοι και πολλοί άλλοι δημιουργούν και χρησιμοποιούν 3D μοντέλα σε διάφορες εφαρμογές. Σχεδόν όλα τα 3D μοντέλα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες (Abdul-Rahman & Pilouk, 2007):

- **Στερεά - Συμπαγή (Solid):** τα μοντέλα αυτά καθορίζουν τον όγκο του αντικειμένου που αντιπροσωπεύουν. Είναι πιο ρεαλιστικά, αλλά πιο δύσκολο να δημιουργηθούν. Τα στερεά μοντέλα χρησιμοποιούνται κυρίως σε προσομοιώσεις της ιατρικής και των μηχανικών, δημιουργούνται σε CAD περιβάλλοντα και προορίζονται για εξειδικευμένες εφαρμογές γραφικών.
- **Οριοθετημένα (Shell/boundary):** τα μοντέλα αυτά αντιπροσωπεύουν την επιφάνεια ενός αντικειμένου (π.χ. το όριό του) και όχι τον όγκο του. Είναι πιο εύκολο να δημιουργηθούν και να χρησιμοποιηθούν, αλλά δεν έχουν τις ιδιότητες των στερεών. Σχεδόν όλα τα εικονικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται σε παιχνίδια και ταινίες είναι μοντέλα αυτής της κατηγορίας.

3D γεωμετρικά μοντέλα

Τα γεωμετρικά μοντέλα είναι ευρέως διαθέσιμα και χρησιμοποιούνται συχνά, αφού είναι από τα πιο απλά και γρήγορα 3D μοντέλα, τα οποία διατηρούν τις συντεταγμένες μαζί με τα αντικείμενα. Απαιτούν από τα υφιστάμενα Συστήματα Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων (ΣΔΒΔ) να είναι συμβατά με τη διαχείριση χωρικών δεδομένων και συνήθως δημιουργούν μεγάλο όγκο δεδομένων. Έχει πραγματοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός πειραμάτων από ερευνητές για να διερευνήσουν δυνατότητες αποθήκευσης χωρικών ερωτημάτων και απεικόνισης χαρακτηριστικών με τις τρισδιάστατες συντεταγμένες τους. Τα γνωστά ΣΔΒΔ μπορούν να διατηρούν 3D δεδομένα με ένα σχετικά τυποποιημένο τρόπο, ενώ τα δεδομένα μπορούν να είναι προσπελάσιμα και να απεικονίζονται με έναν μεγάλο αριθμό από εφαρμογές περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, η Oracle Spatial έχει εφαρμόσει τον πρώτο 3D τύπο δεδομένων (πολύεδρο) και στη συνέχεια ακολούθησαν και άλλα ΣΔΒΔ.

3D τοπολογικά μοντέλα

Τα 3D τοπολογικά μοντέλα αποτελούν ένα από τα σύγχρονα ερευνητικά θέματα. Πολλές είναι οι έρευνες που έχουν γίνει για το θέμα αυτό, αλλά παρ' όλα αυτά δεν υπάρχει ακόμα διαθέσιμη εφαρμογή που να υποστηρίζει 3D τοπολογία. Τα μοντέλα αυτά χρειάζονται αναγνωριστικές ιδιότητες για όλα τα στοιχεία από τα οποία αποτελούνται, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον ορισμό των χαρακτηριστικών και των σχέσεων που δημιουργούνται μεταξύ τους στις τρεις διαστάσεις. Τα τοπολογικά μοντέλα είναι χρήσιμα, γιατί διατηρούν τις σχέσεις μεταξύ των δεδομένων, αποφεύγουν τον πλεονασμό στην αποθήκευση των δεδομένων και δημιουργούν τις κατάλληλες προϋποθέσεις για σύνθετες χωρικές αναλύσεις. Η πολυπλοκότητά τους, όμως, είναι πιο μεγάλη από τα 3D γεωμετρικά μοντέλα.

3D σημασιολογικά μοντέλα

Με σκοπό την μοντελοποίηση 3D αντικειμένων απαιτείται, εκτός από τη γεωμετρία και την τοπολογία τους, η σημασιολογία. Για παράδειγμα, κατά τη 3D μοντελοποίηση ενός αστικού τοπίου χρησιμοποιούνται σημασιολογικά μοντέλα. Συνήθως, τα κτίρια και τα αντικείμενα του (υπερ)εδάφους είναι τα πιο

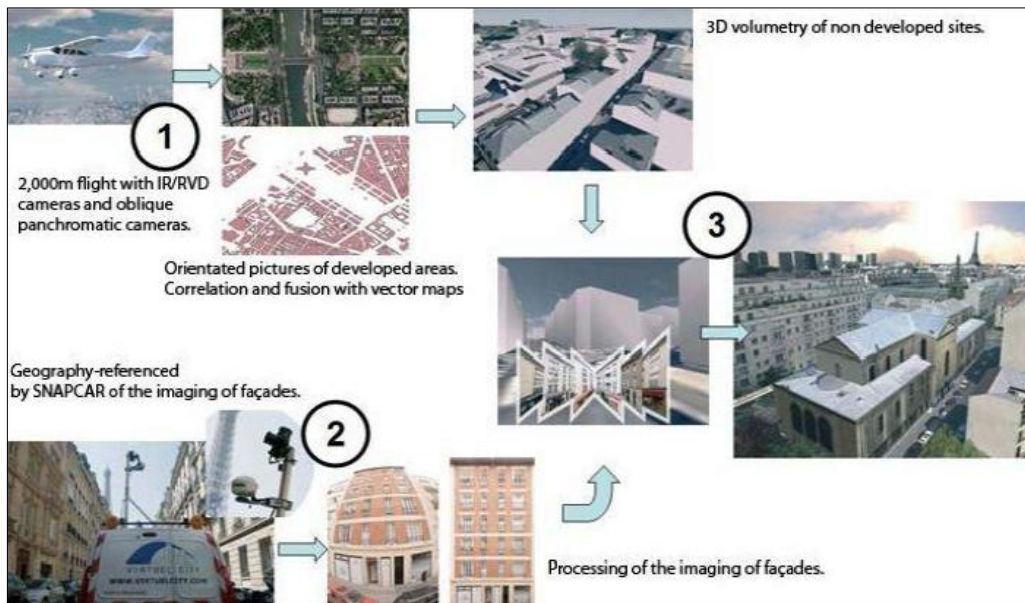
σημαντικά χαρακτηριστικά για την απεικόνιση ενός 3D μοντέλου πόλης. Το πρότυπο CityGML χρησιμοποιείται ευρέως με στόχο την τρισδιάστατη αναπαράσταση τέτοιων επιφανειακών αντικειμένων. Συγκεκριμένα, το CityGML αποτελεί 3D πρότυπο, το οποίο δίνει τη δυνατότητα διαχείρισης της γεωμετρίας, της τοπολογίας και της σημασιολογίας των εικονικών 3D μοντέλων πόλεων.

1.5.2. Τεχνικές 3D μοντελοποίησης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται κάποιες από τις σημαντικότερες τεχνικές 3D μοντελοποίησης, όπως τεχνικές με χρήση φωτογραμμετρίας, μοντελοποίηση βάσει εικόνων και κανονιστική μοντελοποίηση. Κάθε τεχνική επεξεργάζεται εικόνες, δημιουργεί γεωμετρία στις τρεις διαστάσεις και χρησιμοποιείται ανάλογα με το σκοπό κάθε μελέτης και το απαιτούμενο τελικό 3D μοντέλο.

- **Χρήση της φωτογραμμετρίας στη 3D μοντελοποίηση**

Η αναπαράσταση 3D αντικειμένων όπως εικονικών πόλεων (virtual cities) με τη χρήση αεροφωτογραφιών είναι μια κοινή μέθοδος που προσφέρει γρήγορα και ικανοποιητικά αποτελέσματα, με τη βοήθεια της φωτογραμμετρίας. Η στερεοφωτογραμμετρία απαιτεί επικαλυπτόμενα ζεύγη αεροφωτογραφιών που έχουν ληφθεί ταυτόχρονα για τη δημιουργία ενός στερεοζεύγους εικόνων, το οποίο επιτρέπει στον χρήστη να εντοπίσει τα περιγράμματα των κτηρίων αλλά και το υψόμετρο τους. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η δημιουργία 3D μοντέλων με μεγάλη ακρίβεια και καθίσταται δυνατή η μέτρηση όλων των 3D χαρακτηριστικών του και ιδιαίτερα των δυσπρόσιτων σημείων. Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μεγάλη πρόοδος στη 3D μοντελοποίηση ιστορικών μνημείων και ιδιαίτερα στις δομικές λεπτομέρειες και στις υφές τους. Στην Εικόνα 1.9 εμφανίζεται ένα παράδειγμα διαδικασίας 3D μοντελοποίησης μιας εικονικής πόλης.



Εικόνα 1.9: Διαδικασία μοντελοποίησης εικονικής πόλης

Πηγή: Döllner, et al., 2006

Η βασική γεωμετρία των αντικειμένων των αεροφωτογραφιών ομαδοποιείται για να σχηματίσει απεικονίσεις αστικών αντικειμένων (π.χ. κτήρια, γη, δρόμους ή δέντρα κτλ.). Η διαδικασία διευκολύνεται με αυτόματα σημεία (automatic point) ή εξαγωγή αντικειμένων (object extraction), ή σε μικρότερο βαθμό, με την χρησιμοποίηση ανοιχτών βιβλιοθηκών (Remondino, et al., 2008). Συνεπώς, οι φωτογραμμετρικές τεχνικές περιλαμβάνουν την εξαγωγή τόσο γεωμετρικής όσο και σημασιολογικής πληροφορίας από εικόνες.

- **3D μοντελοποίηση βάσει εικόνων (Image - based modeling, IBM)**

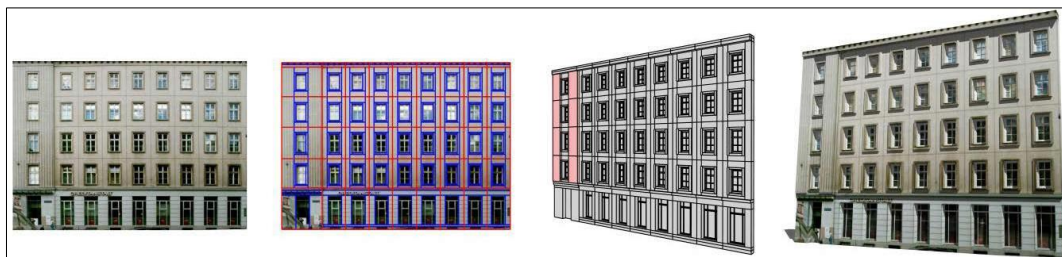
Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε τυπικές φωτογραφίες στο επίπεδο του εδάφους για την αναδόμηση των τρισδιάστατων κτηρίων. Τα τελευταία χρόνια, έχει κερδίσει αξιοσημείωτη προσοχή στον τομέα των γραφικών υπολογιστών, λόγω της δυνατότητάς της να δημιουργεί πολύ ρεαλιστικές εικόνες. Για τη δημιουργία 3D γεωμετρίας τα λογισμικά IBM απαιτούν πολλαπλές εικόνες για τη δημιουργία του πλέγματος του τρισδιάστατου κτηρίου (3D building wireframe), ενώ χρησιμοποιούν τις εικόνες για να εφαρμόσουν τις υφές του κτηρίου στο τελικό μοντέλο. Σύμφωνα με τον Wonka, et al. (2003), τα πακέτα IBM είναι μία πολλά υποσχόμενη λύση για την αστική ανοικοδόμηση. Ένα από τα σημαντικότερα οφέλη αυτής της τεχνικής είναι η ικανότητα να συλλάβει μικρές

λεπτομέρειες που σχετίζονται με τις ατέλειες της πραγματικότητας, ώστε να τις μοντελοποιήσουν και να τις αποδώσουν με υψηλή ακρίβεια.

- **Κανονιστική μοντελοποίηση**

Με τον όρο κανονιστική (ή αλλιώς παραμετρική) μοντελοποίηση (Procedural Modeling) ορίζεται ένα σύνολο από τεχνικές σε γραφικά υπολογιστών για τη δημιουργία 3D μοντέλων και υφών μέσω κανόνων. Παρά το γεγονός ότι συνήθως οι τεχνικές μοντελοποίησης απαιτούν αλγόριθμους για τη διαχείριση, επεξεργασία και αποθήκευση των δεδομένων, η κανονιστική μοντελοποίηση εστιάζει στη δημιουργία ενός μοντέλου από ένα σύνολο κανόνων και όχι στην επεξεργασία του μοντέλου με χειρωνακτικές διαδικασίες από το χρήστη. Τα λογισμικά κανονιστικής μοντελοποίησης έχουν σχεδιαστεί κυρίως για χρήση στην πολεοδομία (Wonka, et al., 2003), για προσομοιώσεις αλλά και για εκπαιδευτικούς σκοπούς, αλλά υπάρχει μια αυξημένη ζήτηση σε κινηματογραφικές ταινίες και τη βιομηχανία των παιχνιδιών, εξαιτίας του χαμηλού κόστους και της ταχείας μεθόδου για τη δημιουργία ρεαλιστικών και πολύπλοκων αστικών περιβαλλόντων. Τέτοια εκτεταμένα μοντέλα ή πακέτα δεδομένων μπορούν να δημιουργηθούν αυτόματα, μιμούμενα ένα συγκεκριμένο αρχιτεκτονικό στυλ ή περίοδο.

Η κανονιστική μοντελοποίηση είναι ένας δυναμικός τρόπος περιγραφής σύνθετων, αλλά δομημένων γεωμετριών. Μερικά σχήματα μπορεί να είναι πολύ σύνθετα στην αναπαράστασή τους, αλλά αποδεικνύεται τελικά ότι είναι πολύ πιο απλά μέσω της διαδικασίας, που δημιουργεί σταδιακά το σχήμα μέσω βασικών κανόνων και λειτουργιών. Τα κτίρια είναι ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αυτών των σύνθετων γεωμετριών, καθώς μπορούν να θεωρηθούν ως το αποτέλεσμα μιας επαναληπτικής διαδικασίας, κατά την οποία η συνολική πολυπλοκότητα του παραγόμενου σχήματος αυξάνεται, αλλά κάθε πράξη συνεχίζει να περιλαμβάνει μόνο μια απλή, βασική γεωμετρία (Εικόνα 1.10). Συνεπώς, η ισχύς της κανονιστικής μοντελοποίησης έγκειται στη σύνθεση απλών κανόνων, οι οποίοι κωδικοποιούν τις σημασιολογικές/γεωμετρικές σχέσεις και όχι στην εγγενή πολυπλοκότητα των εμπλεκόμενων στοιχείων.



Εικόνα 1.10: Παράδειγμα κανονιστικής μοντελοποίησης πρόσοψης κτιρίου

Πηγή: Müller, et al., 2007

- **Τεχνικές αυτόματης μοντελοποίησης**

Αυτόματες μοντελοποιήσεις μεγάλης κλίμακας απαιτούν μεγάλα σύνολα αεροφωτογραφιών συμπεριλαμβανομένων πλάγιων εικόνων (oblique imagery) ή LiDAR νέφη σημείων προκειμένου να ανακατασκευάσουν τη γεωμετρία. Οι επίγειες διαδικασίες με laser scanning εξελίσσονται συνεχώς, προκειμένου να βελτιώσουν τη δημιουργία γεωμετρίας των κτιρίων, ενώ οι ψηφιακές κάμερες έχουν εξελιχθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία ως προς το μέγεθος του καρέ, την ανάλυση και την επεξεργασία. Οι Dollner, et al. (2006) διευκρινίζουν ότι οι εικονικές πόλεις που έχουν προκύψει με ημιαυτόματες τεχνικές ή αυτόματες είναι χρήσιμες, αν η σκοπιμότητα της χρήσης τους προβλέπεται μακροπρόθεσμα.

Η ποσότητα και ποιότητα των δεδομένων σε περιπτώσεις αυτόματης μοντελοποίησης είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που καθορίζει το τελικό αποτέλεσμα. Ένα παράδειγμα πρόσφατων εξελίξεων σε πλήρες αυτοματισμό αποτελεί το λογισμικό Ultracam που εφαρμόζει Πολυακτινική Φωτογραμμετρία (Multi-Ray Photogrammetry) (Wiechert, et al., 2011) και βασίζεται σε μεγάλο πλήθος επικαλυπτόμενων εικόνων με στόχο την «πυκνή συνταύτιση εικόνων» των τρισδιάστατων αντικειμένων (π.χ. κτιρίων) και του ανάγλυφου.

1.5.3. Εφαρμογές τρισδιάστατης γεωοπτικοποίησης

Υπάρχουν οδηγίες, πρότυπα ή τάσεις που επηρεάζουν την απόφαση για το πώς τα δεδομένα θα πρέπει να αναπαριστώνται (Bertin, 2010). Συγκεκριμένα σε 3D επίπεδο, θα πρέπει να εξεταστεί πως ο τρισδιάστατος χώρος θα απεικονίσει ή θα χαρτογραφήσει τα επιλεγμένα δεδομένα. Οι Elmqvist &

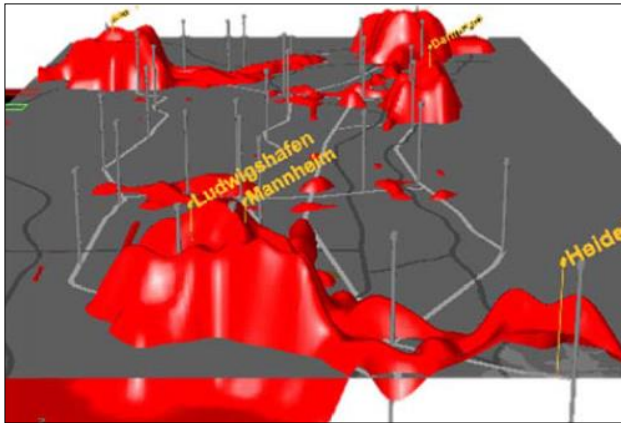
Tudoreanu (2007) διακρίνουν δύο κατηγορίες που αφορούν στη δημιουργία 3D εικονικών κόσμων:

- χρήση 3D ως καμβά για την απεικόνιση αφηρημένων εννοιών
- χρήση 3D για την αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου και των αντικειμένων του

Επιπρόσθετα, αρκετές φορές συναντάται και ο συνδυασμός των δύο παραπάνω περιπτώσεων, δηλαδή η αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου ή μέρους αυτού σε συνδυασμό με αφηρημένες / μη χωρικές πληροφορίες. Συνήθως αυτό γίνεται για να εξυπηρετήσει ανάγκες έξυπνης επικοινωνίας (smart communication) και γενικότερα ένα μεγάλο φάσμα χρήσεων που συναντάται στον κύβο της γεωοπτικοποίησης (Εικόνα 1.5).

Τρισδιάστατες αναπαραστάσεις αφηρημένων εννοιών

Σε αυτή την κατηγορία οι 3D αναπαραστάσεις εμφανίζουν αφηρημένα στοιχεία ή πληροφορίες, τα οποία ενδέχεται να συνδυάζονται με επιλεγμένα αντικείμενα του πραγματικού κόσμου (πχ. μέρη του ανθρώπινου σώματος για ιατρικές αναπαραστάσεις). Σε αυτές τις περιπτώσεις, συχνά, χρησιμοποιείται ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Τυπικά παραδείγματα των 3D αναπαραστάσεων που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι συνήθως επιστημονικές απεικονίσεις (scientific visualizations). Επίσης, σε κάποιες άλλες περιπτώσεις τα δεδομένα απεικονίζονται τρισδιάστατα με σκοπό την πραγματοποίηση χωρικών μεταφορών και την προηγμένη επικοινωνία. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται παραδείγματα τρισδιάστατης γεωοπτικοποίησης αφηρημένων εννοιών σε συνδυασμό με αντικείμενα του πραγματικού κόσμου (Εικόνες 1.11, 1.12 και 1.13).



Εικόνα 1.11: Οπτικοποίηση της χωρικοποίησης του οφέλους και του κόστους σχετικά με τις επιλογές των ηθοποιών, ώστε αυτοί να καθοδηγούνται για το πότε μια απόφασή τους θα επηρεάσει θετικά ή αρνητικά μια κατάσταση

Πηγή: Masala & Pensa, 2013



Εικόνα 1.12: Πυκνότητα του σήματος WI-FI του διαδικτύου σε τρεις διαστάσεις

Πηγή: Donolo, 2014



Εικόνα 1.13: Ροές πληροφορίας σε παγκόσμια κλίμακα

Πηγή: Donolo, 2014

Τρισδιάστατες αναπαραστάσεις του πραγματικού κόσμου

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει 3D αναπαραστάσεις του πραγματικού κόσμου, με τα περιεχόμενα αντικείμενα να έχουν ρεαλιστική ή/και αφηρημένη/γενικευμένη μορφή. Οι x, y και z συντεταγμένες χρησιμοποιούνται για να αναδείξουν τις πραγματικές διαστάσεις των αντικειμένων στον γεωγραφικό χώρο. Τα ψηφιακά μοντέλα πόλεων και οι εικονικές σφαίρες (virtual globes) όπως το Google Earth είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της κατηγορίας 3D αναπαραστάσεων. Οι τρισδιάστατες αυτές απεικονίσεις έχουν στόχο να αποδώσουν πραγματικά περιβάλλοντα και περιλαμβάνουν συνήθως ψηφιακά μοντέλα εδάφους, τα οποία για να

εμφανίζονται πιο ρεαλιστικά αποτελούνται από υψηλής ανάλυσης ορθοεικόνες. Ανάλογα με την επένδυση, τα 3D ψηφιακά μοντέλα πόλης δημιουργούνται με περισσότερο ή λιγότερο λεπτομέρεια. Μεγάλο μέρος της έρευνας ασχολείται με την αυτοματοποίηση της λεπτομερούς κατασκευής τέτοιων μοντέλων, μέσω μεθόδων φωτογραμμετρίας και τηλεπισκόπησης.

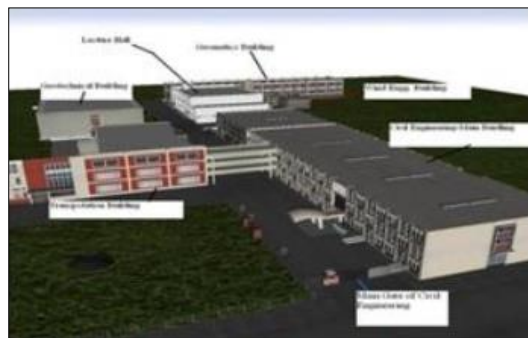
Παράδειγμα τέτοιων εφαρμογών κατασκευής λεπτομερούς 3D ψηφιακού μοντέλου πόλης αποτελεί η μελέτη των Singh, et al. (2014), οι οποίοι σύγκριναν διάφορες μεθοδολογίες για την κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων πόλεων. Με βάση το εν λόγω άρθρο, η ζήτηση 3D μοντέλων πόλεων αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς στη σημερινή εποχή για διάφορες εφαρμογές που είτε αφορούν μηχανικούς είτε όχι. Συνοπτικά, χρησιμοποιούνται τέσσερις βασικές προσεγγίσεις για την υλοποίηση τέτοιων μοντέλων. Με βάση την πρώτη προσέγγιση, οι ερευνητές μοντελοποιούν με βάση το σκίτσο (Sketch based modeling), ενώ στη δεύτερη πραγματοποιείται γραμμική μοντελοποίηση (Procedural grammar based modeling). Ακολούθως, η τρίτη προσέγγιση χρησιμοποιεί φωτογραμμετρικές μεθόδους (Close range photogrammetry based modeling) και τέλος η τέταρτη βασίζεται κυρίως σε οπτικές τεχνολογίες μέσω του υπολογιστή (modeling based on Computer Vision techniques).

Το SketchUp, το CityEngine, το Photomodeler and το Agisoft Photoscan είναι κοινά λογισμικά που αντιπροσωπεύουν τις παραπάνω τέσσερις προσεγγίσεις αντίστοιχα. Τα λογισμικά αυτά διαθέτουν διαφορετικές μεθόδους κατάλληλες για την 3D μοντελοποίηση πόλης που βασίζεται σε εικόνες. Συνεπώς, η μελέτη αυτή επικεντρώνεται στη συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων αυτών με τη χρήση των παραπάνω λογισμικών, κάτι που δεν είχε δημοσιευτεί νωρίτερα με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία (Εικόνα 1.14). Παράλληλα, στο άρθρο περιλαμβάνονται τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί που χαρακτηρίζουν τα προγράμματα αυτά, αποδεικνύοντας ότι η επιλογή του καταλληλότερου εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

α)



β)



γ)



δ)



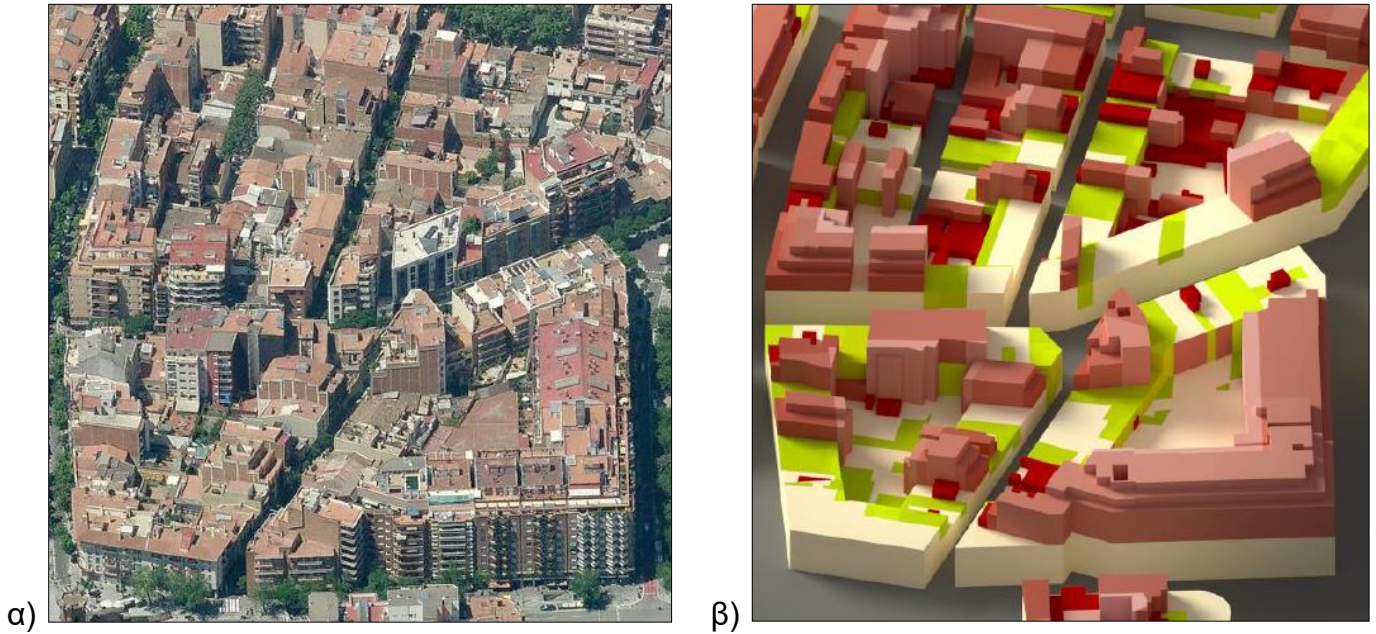
Εικόνα 1.14: Εξαγώμενο 3D μοντέλο από α) το SketchUp, β) το CityEngine, γ) το Photomodeler και δ) το Agisoft Photoscan

Πηγή: Singh, et al., 2014

Πέραν όμως της οπτικής αναπαράστασης των αντικειμένων του πραγματικού κόσμου, μέθοδοι τρισδιάστατης γεωοπτικοποίησης μπορούν να συμβάλλουν στην διαδικασία ανάλυσης, την περιγραφή της μεθοδολογικής προσέγγισης που ακολουθείται, τη βελτίωση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων και την απόδοση όλων των παραπάνω στοιχείων και μεθόδων με τρόπο κατανοητό, ώστε να ερμηνεύονται από το ευρύ κοινό και να διευκολύνουν τη λήψη αποφάσεων.

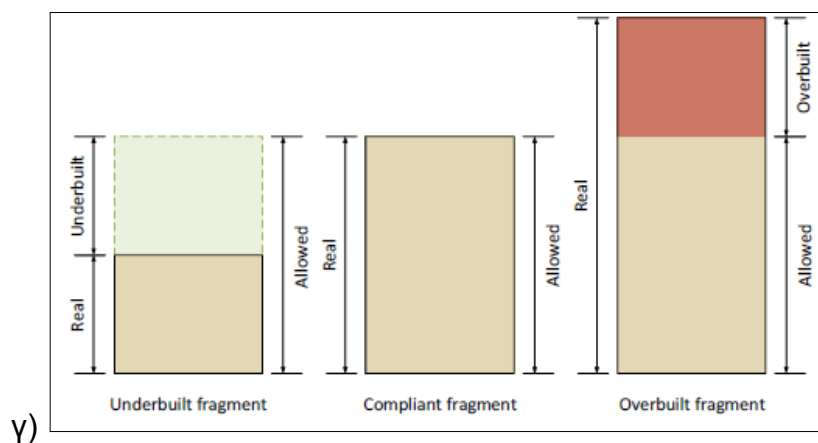
Οι Garcia-Almirall, et al. (2014) δημοσίευσαν μελέτη στην οποία παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για τη μοντελοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ της υπάρχουσας κατάστασης μιας πόλης και της μελλοντικής κατάστασης την οποία αυτή τείνει να υιοθετήσει. Η παλιά συνοικία Sant Andreu στην Βαρκελώνη αποτέλεσε την περιοχή μελέτης για την ανάπτυξη της μεθοδολογίας αυτής με στόχο την αυτόματη ποσοτικοποίηση και οπτικοποίηση των αλλαγών της πόλης, ως ένα εργαλείο στρατηγικού και αστικού σχεδιασμού. Ειδικότερα, παρουσιάζεται μέθοδος για την μέτρηση του κατά πόσο οι υφιστάμενες κτιριακές υποδομές, τόσο ως προς το εμβαδόν όσο και ως προς το ύψος,

συμφωνούν ή όχι με το πολεοδομικό σχέδιο (υφιστάμενο και προτεινόμενο). Τα αποτελέσματα της μελέτης παρουσιάζονται σε τρισδιάστατη μορφή με στόχο την καλύτερη φυσική τους ερμηνεία (Εικόνες 1.15 και 1.16). Η συγκεκριμένη μεθοδολογική προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί επίσης σε επίπεδο γειτονιάς αλλά και στο σύνολο της πόλης, σύμφωνα με τους συγγραφείς.



Εικόνα 1.15: α) Αεροφωτογραφία της περιοχής μελέτης και β) Ογκομετρική ανάλυση των υπερδομημένων (overbuilt-κόκκινο χρώμα) και υποδομημένων (underbuilt-πράσινο χρώμα) τμημάτων στην ίδια περιοχή

Πηγή: Garcia-Almirall, et al., 2014

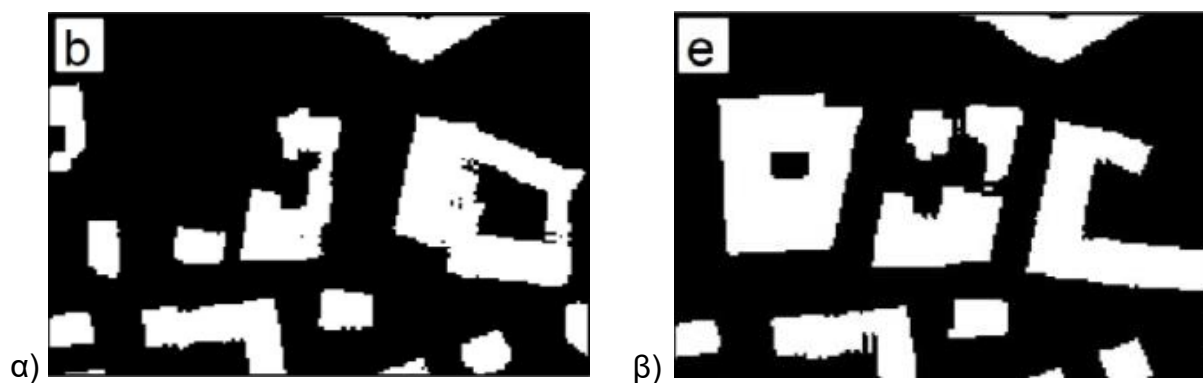


Εικόνα 1.16: Ερμηνεία του ύψους του 3D μοντέλου

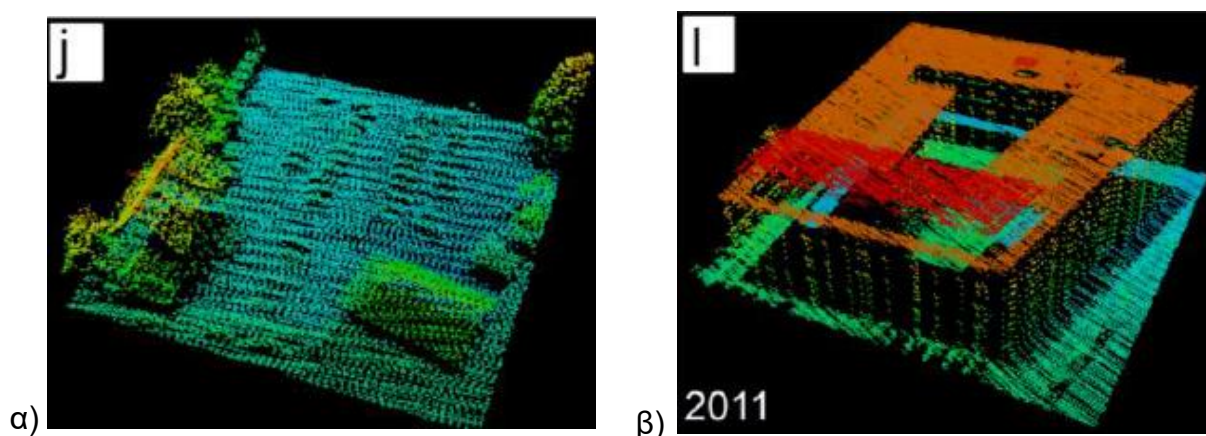
Πηγή: Garcia-Almirall, et al., 2014

Τέλος, μια άλλη πρόσφατη ενδιαφέρουσα μελέτη των Korzeniewska & Pfeifer (2014) παρουσιάζει τη δυνατότητα της ανίχνευσης μεταβολών στα κτίρια μέσω της εναέριας σάρωσης με λέιζερ (ALS) και της δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων των υποδομών. Για τη συγκεκριμένη ανάλυση, τα δεδομένα

συλλέχθηκαν για τα έτη 2003 και 2011, με σκοπό τον εντοπισμό μεταβολών σε βάθος χρόνου. Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε έχει συνολική έκταση 0.72km² και περιλαμβάνει διαφορετικές χρήσεις γης όπως: υδάτινες επιφάνειες, κτίρια, βλάστηση, γυμνό έδαφος και άλλες τεχνητές επιφάνειες, προσωρινές ή μόνιμες. Η εξόρυξη και η ταξινόμηση των αντικειμένων πραγματοποιήθηκε σε 3D επίπεδο, με σκοπό την διατήρηση όλων των πληροφοριών που προέρχονται από τα δεδομένα. Τα αποτελέσματα της μελέτης παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα και τις νέες δυνατότητες που προσδίδει στην ανίχνευση μεταβολών η ανάλυση και αναπαράσταση στις τρεις διαστάσεις (Εικόνα 1.18), οι οποίες δεν θα ήταν δυνατό να προκύψουν με τη χρήση μόνο δορυφορικών εικόνων ή αεροφωτογραφιών και την εξαγωγή αποτελεσμάτων 2D (Εικόνα 1.17).



Εικόνα 1.17: Ανίχνευση μεταβολών σε 2D στην περιοχή μελέτης μεταξύ των ετών α) 2003 και β) 2011
Πηγή: Korzeniowska & Pfeifer, 2014

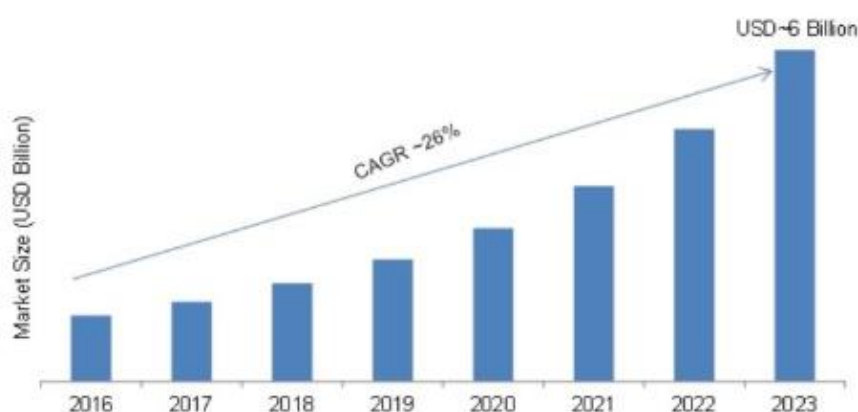


Εικόνα 1.18: Τμήμα της περιοχής μελέτης σε 3D α) πριν την κατασκευή του κτιρίου και β) μετά την κατασκευή του κτιρίου με χρωματική διαβάθμιση του υψομέτρου
Πηγή: Korzeniowska & Pfeifer, 2014

1.5.4. 3D γεωοπτικοποίηση στους διάφορους κλάδους της αγοράς

Η παγκόσμια αγορά 3D χαρτογράφησης και μοντελοποίησης αναμένεται να αυξηθεί κατά 13% στη διάρκεια των ετών 2019-2024. Αυτές οι ταχέως αναπτυσσόμενες σχεδιαστικές λύσεις χρησιμοποιούνται σε ποικίλες βιομηχανίες για προσομοίωση, οπτικοποίηση και απόδοση τοπογραφικών χαρακτηριστικών και άλλων αντικειμένων. Για παράδειγμα, πολλές μεγάλες εταιρείες του κατασκευαστικού κλάδου υιοθετούν την τεχνολογία «Building Information Modeling (BIM)», μια διαδικασία βασισμένη σε τρισδιάστατα μοντέλα, καθώς παρέχει στους επαγγελματίες της αρχιτεκτονικής, της μηχανικής και της κατασκευής τα εργαλεία για αποτελεσματικό σχεδιασμό, κατασκευή και διαχείριση κτιρίων και άλλων έργων υποδομής.

Η παγκόσμια αγορά 3D χαρτογράφησης και τρισδιάστατης μοντελοποίησης περιλαμβάνει έναν αριθμό κορυφαίων εταιρειών που δραστηριοποιούνται στο συγκεκριμένο κλάδο, όπως: η Intermap (ΗΠΑ), η Apple, Inc. (ΗΠΑ), η Cybercity 3D, Inc. (ΗΠΑ), η Trimble Inc. (ΗΠΑ), η Google (ΗΠΑ), Saab Automobile AB (Σουηδία), Topcon Corporation (Ιαπωνία), The Blender Foundation (Ολλανδία), Airbus Defense και Space SAS (Γαλλία), Mitsubishi Motors Corporation (Ιαπωνία), Autodesk Inc. (ΗΠΑ), Applied EarthWorks, Inc. (ΗΠΑ), Pixologic Inc. (ΗΠΑ) κ.α..



Εικόνα 1.19: Η αγορά της 3D μοντελοποίησης και χαρτογράφησης

Πηγή: Market Research Future, 2020

Στην 3D αναπαράσταση, η πιο δημοφιλείς τεχνολογίες που εφαρμόζονται και καταλαμβάνουν ένα σημαντικό μερίδιο αγοράς περιλαμβάνουν την 3D χαρτογράφηση της υψής, την 3D χαρτογράφηση laser, την 3D κινητή χαρτογράφηση και την χαρτογράφηση και πλοήγηση. Παράλληλα, τρισδιάστατες αναπαραστάσεις και απεικονίσεις χρησιμοποιούνται κατά κόρον στους παρακάτω τομείς της αγοράς:

- Στην αγορά ακινήτων και στην κατασκευή
- Στις μεταφορές και στην εφοδιαστική αλυσίδα
- Στην αεροπορία και στις επιστήμες του διαστήματος
- Στην άμυνα
- Στη δημόσια ασφάλεια
- Στο λιανικό εμπόριο
- Στην υγειονομική περίθαλψη
- Στα μέσα μαζικής ενημέρωσης
- Στην ψυχαγωγία κ.α.

3D Μοντελοποίηση στην Αγορά Ακινήτων

Εστιάζοντας στην ακίνητη περιουσία, αυτή αποτελείται από γη και σταθερά αντικείμενα στο χώρο. Τα τρισδιάστατα ακίνητα αντιπροσωπεύουν καλύτερα τις κτηματομεσιτικές μονάδες με σύνθετες δομές και είναι κατάλληλες για επίγειες, εναέριες και υπόγειες εγγραφές τρισδιάστατων δικαιωμάτων ακίνητης περιουσίας. Με την αυξανόμενη αστική ανάπτυξη, η εντατική χρήση της γης αυξάνεται συνεχώς. Η αξιοποίηση της γης δεν περιορίζεται πλέον στο έδαφος, αλλά εκτείνεται στον «αέρα» και στο υπέδαφος, αναδεικνύοντας την ανάγκη χρήσης 3D τεχνολογιών. Τα συμβατικά μοντέλα διαχείρισης κτηματολογίου 2D δεν μπορούν να ικανοποιήσουν αυτήν την αναπτυξιακή τάση και αρκετοί ερευνητές έχουν καταδείξει την ανάγκη εφαρμογής 3D κτηματολογίου και 3D κατοχυρωμένων δικαιωμάτων ιδιοκτησίας μέσω της έρευνας τους (Changbin, et al., 2019).

Στη μεσιτική αγορά οι 3D αναπαραστάσεις και απεικονίσεις είναι εξίσου σημαντικές και εξοικονομούν χρόνο, ενώ μειώνουν το κόστος. Η δημιουργία 3D μοντέλων της ακίνητης περιουσίας μπορεί να δώσει στον πελάτη μια ακριβή

εικόνα του αναμενόμενου αποτελέσματος, των διαστάσεων και των αντικειμένων που περιλαμβάνονται και να βελτιστοποιήσει τη διαδικασία του σχεδιασμού. Συμβατικές τεχνικές μάρκετινγκ που χρησιμοποιούν φωτογραφίες και δισδιάστατα σχέδια για την απεικόνιση της ακίνητης περιουσίας δεν προτιμώνται, καθώς συχνά οι όψεις και τα μεγέθη παρερμηνεύονται και οι ανάγκες του πελάτη δεν καλύπτονται.

Παράλληλα, τρισδιάστατα μοντέλα χρησιμοποιούνται εκτός από το σχεδιασμό και κατά το στάδιο της υλοποίησης ενός έργου κατασκευής/αναδόμησης. Για παράδειγμα, για το σχεδιασμό των εξωτερικών χώρων μιας κατοικίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρισδιάστατες απεικονίσεις για το βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Η χρήση εναέριων μέσων (drones) για την λήψη φωτογραφιών και την κατασκευή του μοντέλου του διευκολύνει τη διαδικασία της διαστασιολόγησης, της χωροθέτησης των διαφόρων αντικειμένων και της λήψης σωστών αποφάσεων. Χωρίς τη μέθοδο αυτή, η ομάδα της κατασκευαστικής εταιρείας θα πρέπει να εισέλθει στο χώρο και να μετρήσει και να καταγράψει όλες τις αποστάσεις και διαστάσεις των αντικειμένων. Σε αρκετές περιπτώσεις, μόλις ανακαλύψουν αναπόφευκτα ελλείψεις ή τις λανθασμένες τιμές, θα πρέπει να επαναλάβουν τη διαδικασία. Αυτό προκαλεί αρκετά προβλήματα στους πελάτες και αποτελεί μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία που κοστίζει. Επίσης, η εμπειρία έχει δείξει πως τα αποτελέσματα των μετρήσεων των τρισδιάστατα μοντέλα που έχουν προκύψει από εναέριες λήψεις (drones) είναι ακριβέστερα από τις χειροκίνητες μετρήσεις.



Εικόνα 1.20: 3D μοντελοποίηση για το σχεδιασμό εξωτερικών χώρων κατοικίας

Πηγή: Pix4D, 2020

3D Μοντελοποίηση στις Μεταφορές

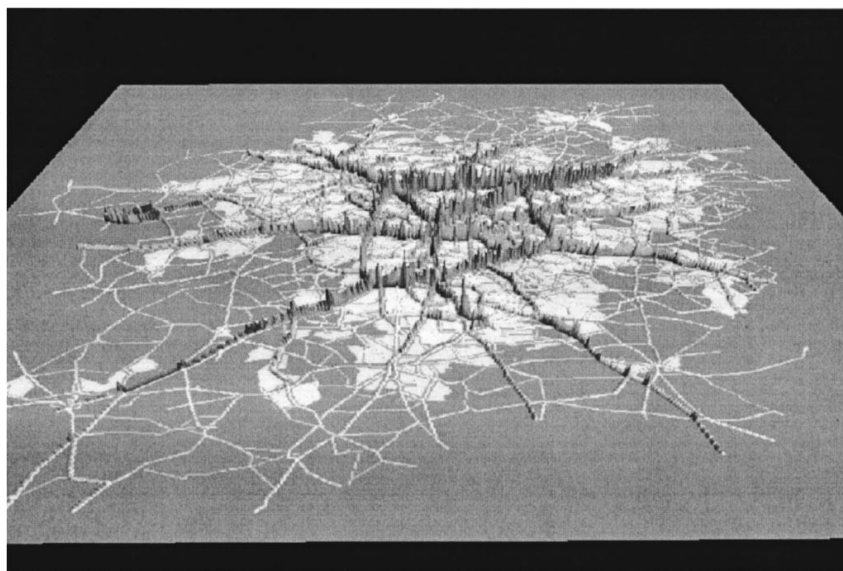
Η τρισδιάστατη ανάλυση και μοντελοποίηση είναι χρήσιμη στον τομέα των μεταφορών. Αρχικά, τα συστήματα μεταφοράς γίνονται όλο και πιο περίπλοκα και πολυδιάστατα. Οι απαιτήσεις για χωρητικότητα, αποδοτικότητα και ασφάλεια στις μεταφορές και τις μετακινήσεις είναι αυξημένες και απαιτούν αποτελεσματική διαχείριση των διαφόρων μερών που απαρτίζουν το δίκτυο όπως αυτοκινητόδρομοι, λωρίδες ειδικής χρήσης και συνδέσεις πολλαπλών μεταφορών.

Στη συμβατική πρόβλεψη της ζήτησης για τα δίκτυα μεταφορών, τα μοντέλα απαιτούν προδιαγραφές των συγκεντρωτικών μονάδων γνωστών ως ζώνες ανάλυσης μεταφορών, στις οποίες οι τοπικές οδοί εκπροσωπούνται από μεταφορικές συνδέσεις δικτύου γνωστές ως σύνδεσμοι κεντροειδούς. Προκειμένου να εκτιμηθούν καλύτερα οι προδιαγραφές των ζωνών, οι αναλυτές χρησιμοποιούν 3D τοπολογικά μοντέλα εδάφους. Τα μοντέλα αυτά προέρχονται από τηλεπισκοπικά δεδομένα και είναι ικανά να υποδείξουν φυσικούς ή ανθρωπολογικούς φραγμούς στην οδική ανάπτυξη. Οι εν λόγω ενδείξεις σε συνδυασμό με την τοπική γνώση των πιθανώς αναπτυσσόμενων περιοχών, μπορεί να αποτελέσει ένα ρεαλιστικό σύνολο εναλλακτικών λύσεων για τη μελλοντική ανάπτυξη του δικτύου μεταφορών (Easa, et al., 2002).

Η επιλογή θέσης και χάραξη ενός αυτοκινητοδρόμου αποτελεί άλλο ένα βασικό ζήτημα. Τα στοιχεία που δημιουργούν καμπύλες γραμμές και στροφές σε έναν αυτοκινητόδρομο καθορίζονται από την τοπογραφία π.χ. βουνά, ποτάμια, λίμνες και τεχνητά αντικείμενα. Η επιλογή της τελικής θέσης περιλαμβάνει τέσσερα βασικά στάδια: τη συλλογή δεδομένων για την καταγραφή της περιοχής μελέτης και της υπάρχουσας κατάστασης, τον προσδιορισμό των εναλλακτικών διαδρομών, επιλογή της βέλτιστης διαδρομής με τεχνικά και οικονομικά κριτήρια και τον λεπτομερή σχεδιασμό της επιλεγμένης διαδρομής. Όλα τα παραπάνω στάδια απαιτούν τρισδιάστατη πληροφορία και μοντελοποίηση για ένα επιτυχημένο, ρεαλιστικό αποτέλεσμα.

Η τρισδιάστατη χωρική μοντελοποίηση μπορεί να προβλέψει τις συγκεντρώσεις ρύπων σε διάφορα υψόμετρα. Έχουν υπάρξει σημαντικές μελέτες στη

μοντελοποίηση της διασποράς ρύπων από μεταφορικά μέσα. Η συγκεκριμένη περίπτωση μοντελοποίησης απαιτεί μεγάλο όγκο δεδομένων και αντιμετωπίζεται από ειδικά πακέτα λογισμικού που μπορούν να διαχειριστούν και να αξιοποιήσουν αυτή την πληροφορία και να αποδοθεί η παραγωγή και μεταβολή των εκπομπών στο χώρο και το χρόνο.



Εικόνα 1.21 3D μοντελοποίηση εκπομπών CO²

Πηγή: Easa, et al., 2002

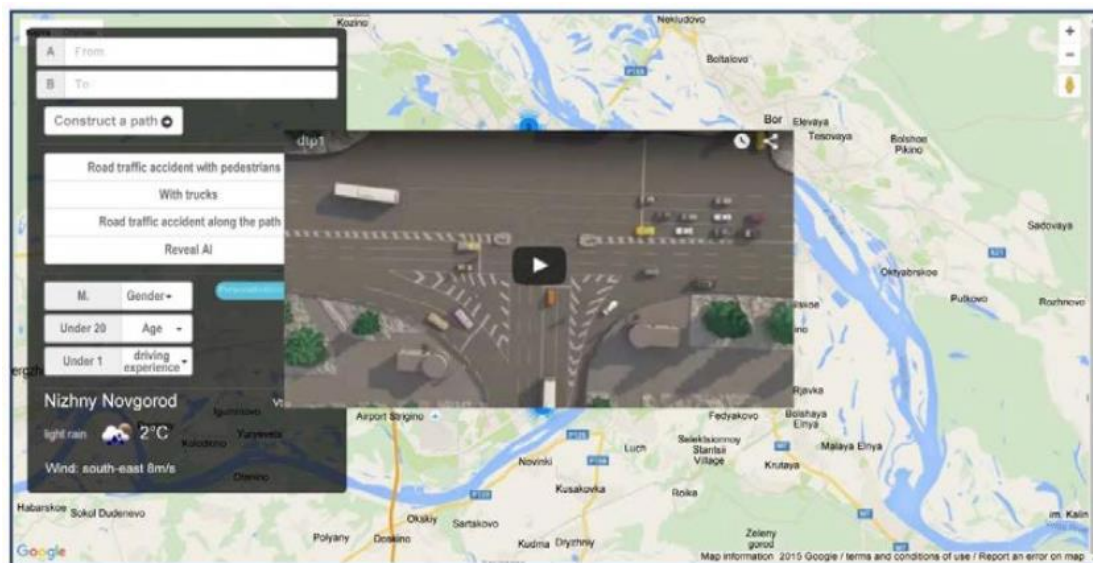
Η 3D μοντελοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί, επίσης, σε θέματα οδικής ασφάλειας, στην πρόληψη ατυχημάτων και στη βελτίωση της οδικής συμπεριφοράς. Αρχικά, 3D αναπαραστάσεις ρεαλιστικών σκηνών χρησιμοποιούνται συχνά για εκπαιδευτικούς σκοπούς, βοηθώντας τον υποψήφιο οδηγό να αντιληφθεί καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες, να αντιληφθεί ένα ακραίο γεγονός και να πάρει τις σωστές αποφάσεις. Παράλληλα, 3D μοντέλα πόλεων και ανάλυση στις τρεις διαστάσεις έχουν χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσουν σε καθημερινά προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι οδηγοί όπως αυτό της μειωμένης όρασης λόγω της θέσης του ήλιου. Στο πλαίσιο αυτό, ένα κατάλληλο σύστημα σε 3D περιβάλλον που υπολογίζει τη γωνία των ηλιακών ακτινών σε σχέση με τη θέση του οδοστρώματος και το ύψος των κτιρίων, είναι σε θέση να προτείνει στον οδηγό τη βέλτιστη διαδρομή προκειμένου να αποφύγει τέτοια φαινόμενα.



Εικόνα 1.22: 3D σύστημα για την αποφυγή της μειωμένης όρασης στην οδήγηση

Πηγή: Eliseev, et al., 2017

Τέλος, η 3D μοντελοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόληψη ατυχημάτων μέσω της δημιουργίας διαδραστικών χαρτών ρίσκου. Στους χάρτες αυτούς απεικονίζονται στις τρεις διαστάσεις επικίνδυνα σημεία επί του δικτύου που χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή καθώς και σημεία που παρουσιάζουν αυξημένη κίνηση και έχει συμβεί κάποιιο ατύχημα σε πραγματικό χρόνο, προειδοποιώντας έγκαιρα τους οδηγούς.



Εικόνα 1.23: Διαδραστικός χάρτης ρίσκου ατυχήματος

Πηγή: Eliseev, et al., 2017

3D Μοντελοποίηση στον Πολιτισμό

Η σημασία της πολιτιστικής κληρονομιάς για τον άνθρωπο είναι μεγάλη καθώς μέσω αυτής διατηρεί τη σχέση του με το παρελθόν, προσπαθεί να το ερμηνεύσει και μέσω αυτού βελτιώνει και εξελίσσεται όλο και περισσότερο στο μέλλον. Παρόλα αυτά, η πρόσβαση των ανθρώπων σε μουσεία και πολιτιστικά μνημεία είναι αρκετές φορές περιορισμένη, κυρίως λόγω γεωγραφικών και οικονομικών αιτιών. Πολλά από τα μνημεία είτε δεν είναι ανοιχτά στο κοινό, είτε είναι ανοιχτά για περιορισμένο χρονικό διάστημα, λόγω της φθοράς που έχουν υποστεί (από κακή χρήση, φυσικές καταστροφές, καιρικές συνθήκες κ.λπ.) και έτσι είναι συχνά απαραίτητη η προσέγγιση και η μελέτη τους με άλλους τρόπους.

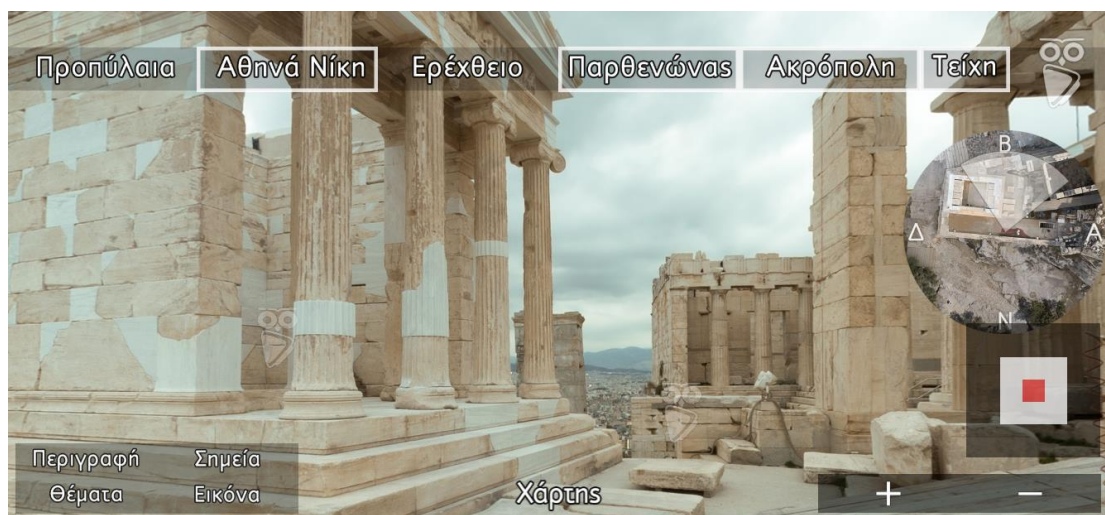
Η νέα ψηφιακή εποχή που ξεκίνησε τον 21ο αιώνα, έδωσε τη δυνατότητα σε μια άνευ προηγουμένου ανοιχτή πρόσβαση σε κάθε είδους πληροφορία, βοηθώντας τον άνθρωπο να γνωρίσει και να εξερευνήσει τοποθεσίες και αντικείμενα χωρίς να βρίσκεται ο ίδιος εκεί, αλλά μέσω του υπολογιστή του. Το πεδίο αυτό της επιστήμης ονομάζεται Εικονική Αρχαιολογία (Virtual Archaeology) και αφορά στην ανάλυση των διαδικασιών διαχείρισης και παρουσίασης αρχαιολογικών στοιχείων μέσω τεχνικών τρισδιάστατης απεικόνισης σε υπολογιστή (Stanco et al., 2017). Η τεχνολογία αυτή στοχεύει στην ψηφιακή ανακατασκευή αρχαιολογικών και μη έργων τέχνης και μνημείων

για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς καθώς και για τη διατήρηση και προστασία της πολιτισμικής κληρονομιάς.



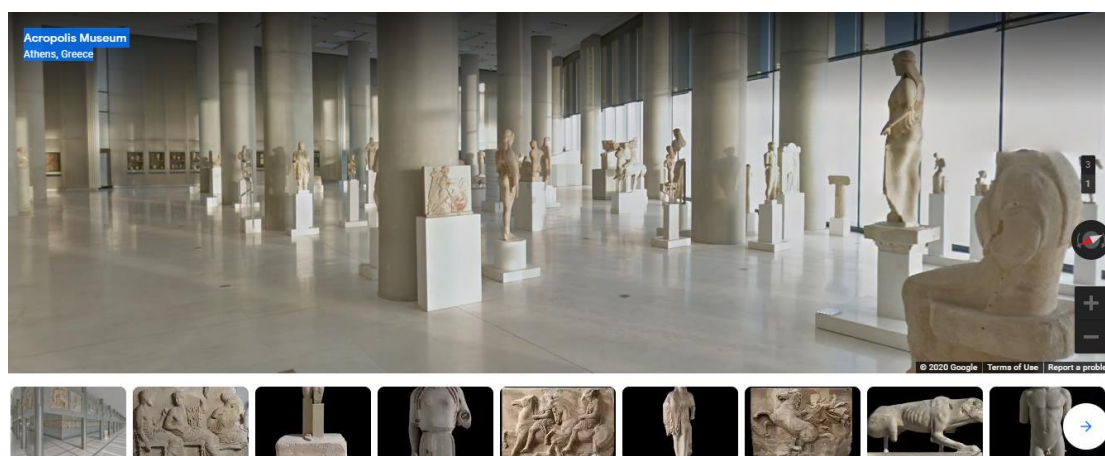
Εικόνα 1.24: 3D εικονικό μοντέλο του Άτλαντα

Στο πλαίσιο αυτό, η πιο ολοκληρωμένη εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών είναι η δημιουργία Εικονικών Μουσείων (Virtual Museums). Το εικονικό μουσείο είναι μια πολυμεσική εφαρμογή που έχει σαν στόχο να μεταφέρει την εμπειρία της επίσκεψης ενός μουσείου στην οθόνη του υπολογιστή. Αυτό καθίσταται εφικτό μέσω της εικονικής περιήγησης στον πραγματικό χώρο του μουσείου, της πολυμεσικής παρουσίασης των εκθεμάτων του και της αυτόματης ξενάγησης. Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται δύο online εφαρμογές που έχουν υλοποιηθεί και είναι διαθέσιμες για την εικονική περιήγηση στα διάφορα πολιτιστικά μνημεία και το μουσείο της Ακρόπολης.



Εικόνα 1.25: Εικονική περιήγηση της Ακρόπολης

Πηγή: Acropolis Virtual Tour, 2020



Εικόνα 1.26: Εικονική περιήγηση στο μουσείο της Ακρόπολης

Πηγή: Google Arts and Culture, 2020

Τέλος, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα των εικονικών μουσείων.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<ul style="list-style-type: none">• Υψηλή ευκρίνεια-ανάλυση• Πρόσβαση από κάθε σημείο και οποιαδήποτε χρονική στιγμή• Μηδενικό ή χαμηλό κόστος πρόσβασης	<ul style="list-style-type: none">• Απουσία ζωντανίας και παραστατικότητας• Μακριά από τον τόπο εύρεσης των αντικειμένων• Αδυναμία επίλυσης πιθανών αποριών

<ul style="list-style-type: none">• Μη απαραίτητη παρουσία ξεναγού• Συγκέντρωση όλης της πληροφορίας σε μία οθόνη, όπου εύκολα μπορεί να ο επισκέπτης να ανατρέξει σε οποιοδήποτε έκθεμα και να συγκρίνει• Ιδανικό για άτομα με κινητικά προβλήματα	<ul style="list-style-type: none">• Αδυναμία ανταλλαγής απόψεων με άλλους επισκέπτες
---	--

Πίνακας 1.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα εικονικών μουσείων

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

2.1. Αλγόριθμοι Όρασης Υπολογιστών σε Φωτογραμμετρικές Εφαρμογές

Την τελευταία δεκαετία περίπου από την εμφάνισή της, η αυτοματοποιημένη φωτογραμμετρία κοντινού εύρους (close range) έχει γίνει ισχυρή και ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο 3D τοπογραφικής μοντελοποίησης. Η δημιουργία αλγορίθμων τριγωνισμού και μοντελοποίησης εδάφους μέσω εικόνων έχουν βελτιώσει ριζικά την ποιότητα των δεδομένων που μπορούν να εξαχθούν από αλληλεπικαλυπτόμενα στερεο-ζεύγη. Ομοίως, η μείωση του κόστους και η αύξηση της ποιότητας των φακών (SLR) και των καμερών καθώς και οι μέθοδοι βαθμονόμησης τέτοιων μη μετρικών καμερών έχουν βοηθήσει στην πιο ευρεία χρήση και εφαρμογή της φωτογραμμετρικής μοντελοποίησης και ενθαρρύνουν ένα μεγάλο εύρος χρηστών να υλοποιηθούν σχετικές εφαρμογές όπως: η μελέτη της τοπογραφίας ποταμού (Brasington & Smart, 2003), τον ποσοτικό προσδιορισμό της μεταβολής της επιφάνειας των παγετώνων (Keutterling & Thomas, 2006), την παρακολούθηση της κίνησης των παγετώνων (Immerzeel, et al., 2014) περιβαλλοντικά προβλήματα - συμπεριλαμβανομένης της παρατήρησης και καταγραφής της κίνησης της λάβας (Tuffen et al., 2013) και την καθίζηση του εδάφους (Lucieer et al., 2013), παρακολούθηση της παράκτιας διάβρωσης (James and Robson, 2012) και την ποσοτικοποίηση της βιομάζας στα δάση (Dandois και Ellis, 2013).

Η ψηφιακή φωτογραμμετρία έχει επίσης εφαρμοστεί σε έναν αριθμό γεωλογικά προβλήματα, συμπεριλαμβανομένου του χαρακτηρισμού της γεωλογικής ασυνέχειας και την ανάλυση της σταθερότητας του εδάφους (Sturznegger and Stead, 2009). Εφαρμογές κοντινού εύρους (close range) περιλαμβάνουν επίσης την άμεση ποσοτικοποίηση της διάβρωσης του εδάφους και της μορφοδυναμικής μιας περιοχής-μοντέλου (Rieke-Zapp & Nearing, 2005).

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται εναλλακτικές φωτογραμμετρικές λύσεις και τεχνικές για την αναπαράσταση τοπογραφικών στοιχείων και τα βασικά χαρακτηριστικά τους ανάλογα το σκοπό χρήσης και τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τοπογραφικές μετρήσεις

στο πεδίο με διαφόρων ειδών αισθητήρες και σαρωτές (υψηλού έως και χαμηλού κόστους) για την επίτευξη της μοντελοποίησης με το τελικό αποτέλεσμα να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα δεδομένα εισόδου. Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει κυρίως αυτοματοποιημένες μεθόδους και αλγορίθμους ανάλυσης εικόνας που απαιτούν εικόνες υψηλής ανάλυσης για δεδομένα εισόδου ώστε να επιτευχθεί ρεαλιστική μοντελοποίηση σε λίγο χρόνο και με μικρό κόστος. Στη συγκεκριμένη κατηγορία και τεχνολογία εστιάζει η παρούσα εργασία, η οποία αναλύεται εκτενώς στις επόμενες ενότητες. Τέλος, η τελευταία ομάδα αφορά σε τεχνικές συσχέτισης και συνταύτισης εικόνων με ομόλογα σημεία γνωστών συντεταγμένων από που εμφανίζονται σε όλες τις εικόνες. Η μέθοδος αυτή γίνεται είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα και μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα ανάλογα με τα δεδομένα εισόδου καθώς και τον αριθμό και την κατανομή των ομόλογων σημείων που θα χρησιμοποιηθούν.

Technical aspect	Options	Main characteristics
Survey	Smartphone	Low cost, portable wireless internet access, low quality
	Consumer-grade digital sensor	Low cost, moderate quality
	High-quality digital SLR sensor	High quality, portable, moderate cost, no internet access
	Laser Scanning (TLS and ALS)	High precision, expensive, less portable
Image processing	Internet-based SfM	Free, near real time, fully automatic, lower quality
	Local software SfM	Mostly free and automatic, better quality expected
	Traditional « stereo » photogrammetry	High quality, subscription cost, expert knowledge
	SfM-MVS photogrammetry	As above, but also greater automation and reliability
Co-registration	Scaling	Fast and easy, comparison with other datasets not possible
	Tie points	Comparison with other datasets only, average precision
	Targets + GCP	Any coordinate system, high precision, not always possible
	ICP	Refinement of alignment, needs two co-registered datasets

Πίνακας 2.1: Τεχνικές και εναλλακτικές λύσεις για την αναπαράσταση/μοντελοποίηση τοπογραφικών στοιχείων με υψηλή ανάλυση

Πηγή: Micheletti, et al., 2015

2.2. Θεωρητικές Έννοιες

Για την προβολή ενός πραγματικού σημείου στο επίπεδο της εικόνας χρησιμοποιείται η Προβολή Σημειακής Οπής (Pinhole Projection) ή απλούστερα η Κεντρική Προβολή. Για τη δημιουργία του προβολικού μοντέλου, η συσχέτιση του τρισδιάστατου σημείου στο χώρο με του δισδιάστατου σημείου στην εικόνα περιλαμβάνει τρία στάδια:

- Το μετασχηματισμό που συνδέει σημεία στο σύστημα συντεταγμένων της πραγματικότητας με το σύστημα συντεταγμένων της κάμερας:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

όπου:

R: ο 3x3 πίνακας στροφής για τον προσανατολισμό της κάμερας

T: το τρισδιάστατο διάνυσμα που αντιπροσωπεύει τη μετάθεση της κάμερας

Τα παραπάνω αποτελούν τις εξωτερικές παραμέτρους της κάμερας και περιγράφουν τη θέση της.

- Το μετασχηματισμό που συνδέει σημεία στο σύστημα συντεταγμένων της κάμερας με τα δισδιάστατα σημεία στην εικόνα:

$$x = f \frac{X_c}{Z_c} \quad y = f \frac{Y_c}{Z_c}$$

όπου:

f: εστιακό μήκος

- Το μετασχηματισμό που συνδέει τα σημεία στο επίπεδο της εικόνας με τις συντεταγμένες σε pixel.

$$\tilde{u} \sim Kx$$

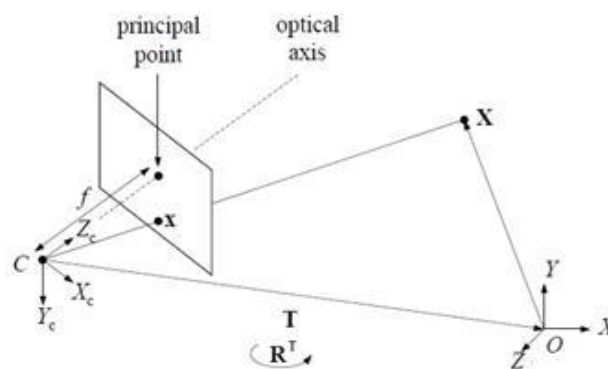
όπου:

K: ένας άνω τριγωνικός πίνακας βαθμονόμησης της κάμερας της μορφής:

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_u & s & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

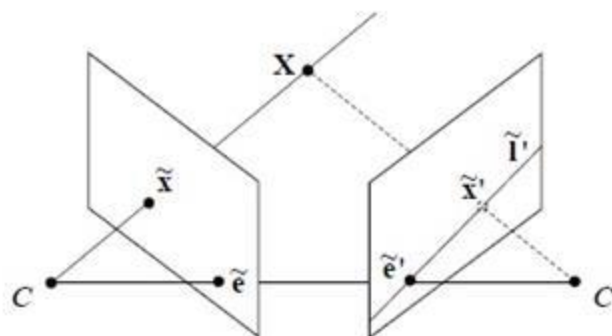
όπου: α_u και α_v είναι οι παράγοντες κλίμακας, το s είναι η λοξότητα και (u_0, v_0) το πρωτεύον σημείο.

Τα παραπάνω αποτελούν τις εσωτερικές παραμέτρους της κάμερας.



Εικόνα 2.1: Κεντρική προβολή

Δεδομένης της προβολής ενός τρισδιάστατου σημείου σε μία εικόνα, η προβολή του σε μια δεύτερη εικόνα περιορίζεται στην αντίστοιχη επιπολική ακτίνα. Η επιπολική γεωμετρία των εικόνων φαίνεται παρακάτω.



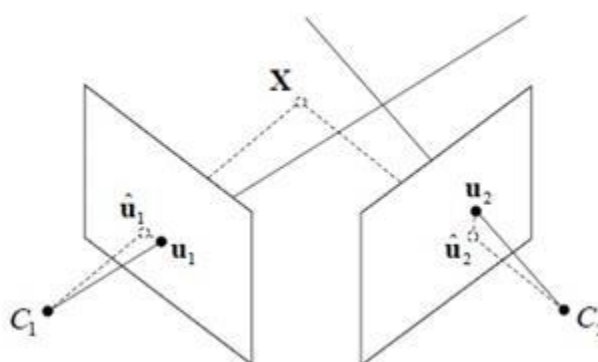
Εικόνα 2.2: Επιπολική γεωμετρία δύο εικόνων

Δεδομένης της προβολής \tilde{x} ενός 3D σημείου X στην πρώτη εικόνα του ζεύγους, η προβολή του, \tilde{x}' στη δεύτερη εικόνα θα πρέπει αναγκαστικά να βρίσκεται πάνω στην ευθεία \tilde{l}' . Η ευθεία αυτή είναι η προβολή στη δεύτερη εικόνα της

ευθείας που διέρχεται από το οπτικό κέντρο C της πρώτης εικόνας, την προβολή \tilde{x} στην πρώτη εικόνα και το τρισδιάστατο σημείο X .

Όλες οι επιπολικές ευθείες σε μια εικόνα διέρχονται από ένα κοινό σημείο, το οποίο ονομάζεται επιπολικό κέντρο και είναι η προβολή του οπτικού κέντρου στις εικόνες (e και e' αντίστοιχα). Η επιπολική γεωμετρία του ζεύγους των εικόνων εκφράζεται μέσω του Επιπολικού Πίνακα F (Fundamental matrix) και για τον υπολογισμό του είναι απαραίτητα οκτώ ζεύγη ομόλογων σημείων. Ο πίνακας αυτός εξαρτάται από τη σχετική θέση και τον προσανατολισμό του ζεύγους των εικόνων και υπολογίζεται συνήθως γραμμικά. Από αυτόν λαμβάνεται η κίνηση της κάμερας και κατά συνέπεια οι προβολικοί πίνακες.

Εφόσον είναι γνωστοί οι προβολικοί πίνακες, τα τρισδιάστατα σημεία μπορούν να υπολογιστούν από τις μετρημένες θέσεις τους σε μία ή περισσότερες εικόνες (μετρήσεις σε pixel). Η διαδικασία αυτή ονομάζεται τριγωνισμός. Ιδανικά τα σημεία θα έπρεπε να βρίσκονται πάνω στην τομή των προβαλλόμενων ακτινών, όμως οι ακτίνες συνήθως δεν τέμνονται λόγω του θορύβου που υπάρχει στις μετρήσεις. Για ένα ζεύγος εικόνων, η διαδικασία περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των διαφορών μεταξύ των μετρημένων και των αναμενόμενων θέσεων των σημείων πάνω στις εικόνες (Hartley & Sturm, 1994).

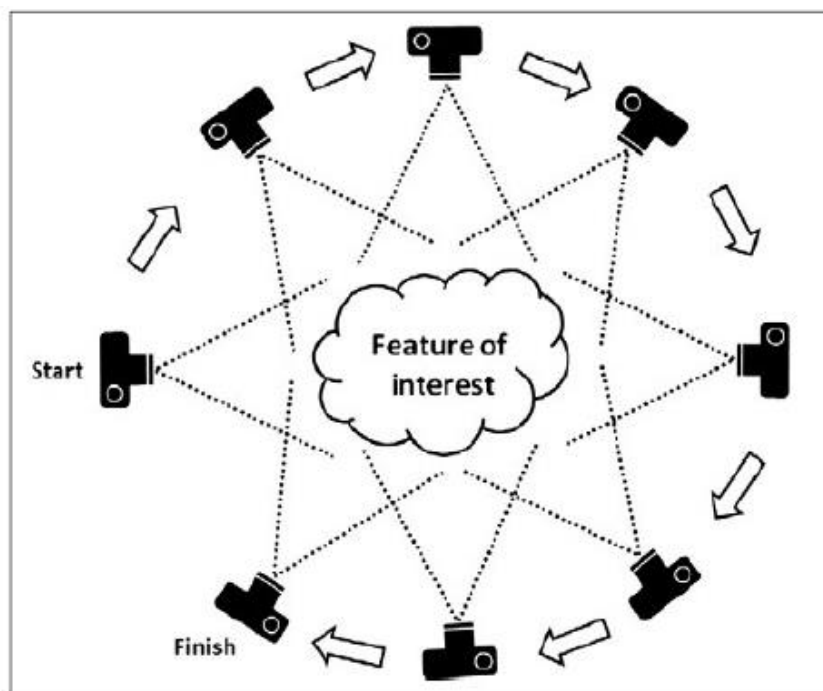


Εικόνα 2.3: Διαδικασία τριγωνισμού

2.3. Αλγόριθμος: Structure-from-Motion (SFM)

Στην παρούσα μελέτη θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση και εφαρμογή μιας αναπτυσσόμενης τεχνολογίας και χαμηλού κόστους φωτογραμμετρικής μεθόδου για την αναπαράσταση της πραγματικότητας και την τρισδιάστατη

μοντελοποίηση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε έρευνες και εφαρμογές χαμηλού προϋπολογισμού που απαιτούν υψηλή ανάλυση. Ειδικότερα, η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο αλγόριθμος «Structure-from-Motion (SFM)», ο οποίος λειτουργεί υπό τις ίδιες βασικές αρχές όπως και η στερεοσκοπική φωτογραμμετρία, δηλαδή ότι η τρισδιάστατη δομή μπορεί να επιλυθεί και να αναπαρασταθεί από μια σειρά επικαλυπτόμενων εικόνων.



Εικόνα 2.4: Μέθοδος αλγορίθμου Structure-from-Motion (SFM)

Πηγή: Westoby, et al., 2012

Ωστόσο, η μέθοδος διαφέρει θεμελιωδώς από τις συμβατικές φωτογραμμετρικές τεχνικές, από τη γεωμετρία της σκηνής, καθώς η γεωμετρία της σκηνής, οι θέσεις της κάμερας και ο προσανατολισμός επιλύονται αυτοματοποιημένα. Όλα επιλύονται ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας μία επαναληπτική διαδικασία με βάση ένα μεγάλο σύνολο χαρακτηριστικών σημείων εξαγόμενων από τις επικαλυπτόμενες εικόνες. Η ανάγκη για υψηλό βαθμό αλληλοεπικάλυψης ώστε να καλυφθεί η πλήρη γεωμετρία του αντικειμένου ή της σκηνής ενδιαφέροντος, έδωσε στη μέθοδο το σχετικό όνομα: structure derived from a moving sensor/motion.

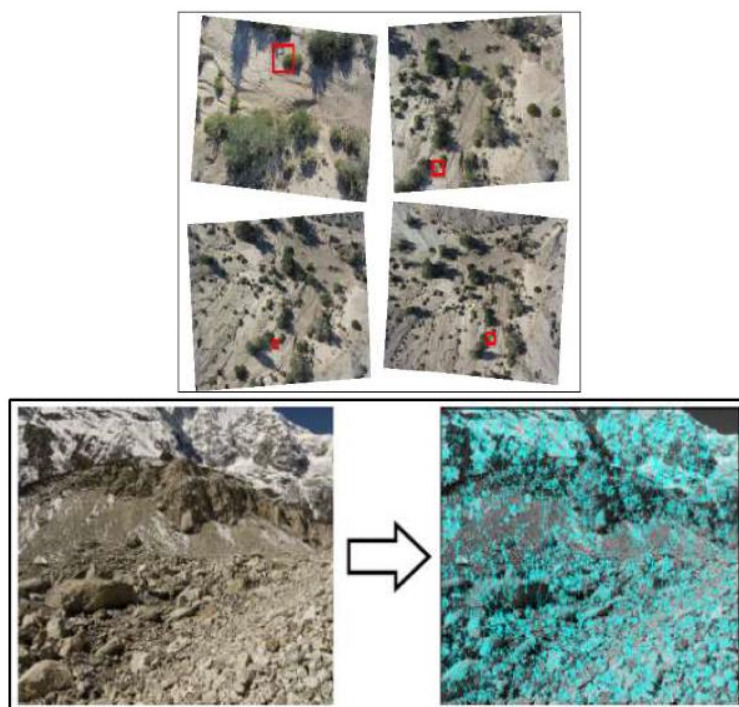
Η εν λόγω μέθοδος πρωτοεμφανίστηκε τη δεκαετία του 1990 και προέρχεται από την κοινότητα του “computer vision” και την ανάπτυξη αυτόματων αλγορίθμων αντιστοίχισης χαρακτηριστικών (feature-matching algorithms) της

προηγούμενης δεκαετίας. Μέσω αυτών των εργαλείων και του crowd sourcing είναι δυνατή η χρήση πολλαπλών φωτογραφιών που έχουν ανεβάσει χρήστες στο διαδίκτυο για την τρισδιάστατη αναπαράσταση μιας σκηνής στόχου αυτόματα. Οι δυνατότητες του SfM φαίνονται πάρα πολλές, αν και η τεχνική αυτή σπάνια είχε χρησιμοποιηθεί εντός των γεωεπιστημών μέχρι και πριν την τελευταία πενταετία και έτσι υπάρχουν λίγες ποσοτικές εκτιμήσεις της ποιότητας των προϊόντων εδάφους που προκύπτουν από την μέθοδο αυτή.

2.4. Διάγραμμα Ροής SFM

2.4.1. Απόκτηση εικόνων και εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων

Βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η μέθοδος SFM είναι ο προσδιορισμός της τρισδιάστατης θέσης των ομόλογων/χαρακτηριστικών σημείων που έχουν ληφθεί από διαφορετικές φωτογραφίες. Το αρχικό στάδιο επεξεργασίας για τη λύση του προβλήματος αυτού είναι η αναγνώριση σημείων ενδιαφέροντος στις εικόνες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την συσχέτιση των εικόνων. Για να μπορεί ένα σημείο να χρησιμοποιηθεί ως σημείο ενδιαφέροντος είναι απαραίτητο να διακρίνεται από το υπόβαθρο και από τη γειτονιά του, δηλαδή τα παραπλήσια σημεία. Τα σημεία αυτά είναι αμετάβλητα και δεν επηρεάζονται από διαφοροποιήσεις στην κλίμακα της εικόνας ή από στροφή της, ούτε από κάθε άλλη γεωμετρική ή ραδιομετρική παραμόρφωσή τους, από το θόρυβο που ενδεχομένως υπάρχει στις εικόνες, ενώ είναι μερικώς αμετάβλητα και στις αλλαγές των συνθηκών φωτισμού (Lowe, 2004).



Εικόνα 2.5: Μέθοδος SIFT – Εύρεση και αντιστοίχιση ομόλογων σημείων σε δύο εικόνες υπό συνθήκες αλλαγής κλίσης και φωτισμού

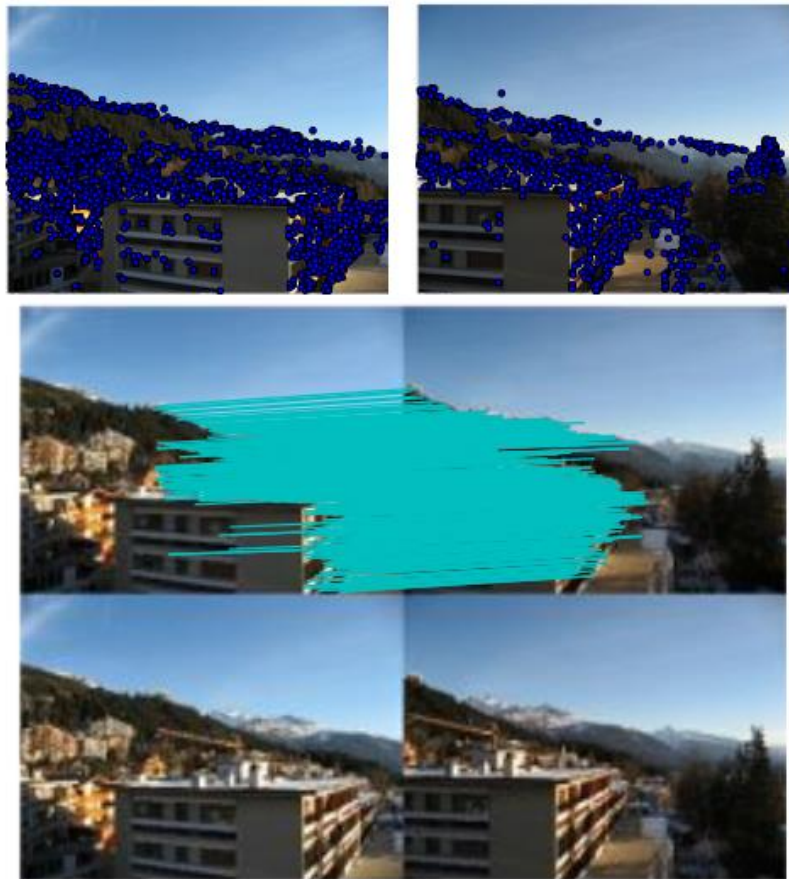
Πηγή: Micheletti, et al., 2015

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται οι αλγόριθμοι αναγνώρισης χαρακτηριστικών SIFT (Scale Invariant Feature Transform) και SURF (Speed Up Robust Features). Και οι δύο αλγόριθμοι περιλαμβάνουν ανιχνευτές που εντοπίζουν σημεία ενδιαφέροντος στις εικόνες, οι οποίοι όμως λειτουργούν με διαφορετικό τρόπο. Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι ενδεδειγμένοι για εφαρμογές όπου χρειάζεται να συσχετιστούν εικόνες και βοηθούν στη διαχείριση προβληματικών περιπτώσεων όπως είναι μη ευκρινείς περιοχές και τυφλά σημεία χωρίς πληροφορία. (Westoby, et al., 2012).

Αλγόριθμος SIFT

Ο Lowe το 1999 ανέπτυξε τον συγκεκριμένο αλγόριθμο, ο οποίος λειτουργεί εντοπίζοντας, περιγράφοντας και εξάγοντας από μια εικόνα χαρακτηριστικά σημεία, τα οποία αργότερα χρησιμοποιούνται για τη συνταύτιση των εικόνων και την αναγνώριση αντικειμένων. Η πιο κοινή διαδικασία που χρησιμοποιείται είναι ο υπολογισμός του εγγύτερου γείτονα ενός χαρακτηριστικού σημείου και αμέσως μετά ο έλεγχος για το αν ο δεύτερος εγγύτερος γείτονας είναι πιο μακριά από κάποια τιμή κατωφλίου. Αυτός ο αλγόριθμος δίνει αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας και έχει σχετικά μικρό χρόνο υπολογισμών. Η μέχρι στιγμής

εφαρμογή του δείχνει πως έχει καλύτερα αποτελέσματα σε εφαρμογές κυρίως εσωτερικού χώρου αλλά και εξωτερικού (Andreasson & Duckett, 2004).



Εικόνα 2.6: Προσδιορίζοντας και αντιστοιχίζοντας χαρακτηριστικά σημεία σε δύο εικόνες μέσω του αλγορίθμου SIFT

Πηγή: Solem, 2012

Οι θέσεις των σημείων ενδιαφέροντος στον αλγόριθμο SIFT εντοπίζονται με τη χρήση αλγορίθμων διαφοράς Gauss:

$$D(\mathbf{x}, \sigma) = [G_{k\sigma}(\mathbf{x}) - G_{\sigma}(\mathbf{x})] * I(\mathbf{x}) = [G_{k\sigma} - G_{\sigma}] * I = I_{k\sigma} - I_{\sigma}$$

όπου:

G_{σ} : Gaussian 2D kernel

I_{σ} : G_{σ} -blurred grayscale image

k : scale factor

Τα χαρακτηριστικά σημεία είναι τα μέγιστα και τα ελάχιστα του $D(x)$ για κάθε θέση και κλίμακα. Οι υποψήφιες θέσεις στην εικόνα στη συνέχεια φιλτράρονται

για την αφαίρεση ακατάλληλων σημείων με βάση διάφορα κριτήρια όπως η αντίθεση, σημεία στα άκρα της εικόνας κ.α..

Ο παραπάνω αλγόριθμος δίνει τη θέση και την κλίμακα. Για να επιτευχθεί η μεταβλητότητα της περιστροφής, επιλέγεται μια κατεύθυνση αναφοράς με βάση την κατεύθυνση και την κλίση της εικόνας γύρω από κάθε σημείο. Η κυρίαρχη κατεύθυνση χρησιμοποιείται ως αναφορά για τον καθορισμό ενός ιστογράμματος προσανατολισμού και έτσι προστίθεται η παράμετρος της στροφής στη διαδικασία συσχέτισης των εικόνων και εξαγωγής των χαρακτηριστικών σημείων.

Αλγόριθμος SURF

Οι Bay, Tuy-telaars και Van Gool το 2006 παρουσίασαν για πρώτη φορά τον συγκεκριμένο αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος που υπολογίζει κοινά χαρακτηριστικά σε ένα σύνολο εικόνων και δίνει καλύτερα και γρηγορότερα αποτελέσματα από προκάτοχούς του. Αναπαριστά την εικόνα με έναν ιδιαίτερο τρόπο, με τη λεγόμενη Αθροιστική Εικόνα (Integral Image), με αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου εύρεσης ομόλογων σημείων. Ο αλγόριθμος SURF χρησιμοποιεί τον ίδιο τρόπο αντιστοίχισης σημείων με τον SIFT περιλαμβάνοντας όμως τη Λαπλασιανή (the sign of the Laplacian), δηλαδή επιτρέπει μια γρήγορη διαφοροποίηση μεταξύ φωτεινών χαρακτηριστικών σημείων σε σκοτεινό υπόβαθρο και σκοτεινών χαρακτηριστικών σημείων σε φωτεινό υπόβαθρο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη γρηγορότερη αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών σημείων. Τα αποτελέσματα που δίνει είναι συγκρίσιμα και αρκετές φορές καλύτερα σε σχέση με αυτά του SIFT και συνήθως αρκετά γρηγορότερα (Valgren & Lilienthal, 2014).

Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, ο αριθμός των χαρακτηριστικών σημείων σε μια εικόνα και η ακρίβεια στον προσδιορισμό τους εξαρτάται κυρίως από την ανάλυση της εικόνας και την πολυπλοκότητά της. Σύνθετες εικόνες υψηλής ανάλυσης συνήθως θα επιστρέψουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Παράλληλα, η πυκνότητα, η ευκρίνεια και η ανάλυση της φωτογραφίας σε συνδυασμό με τις φυσικές υφές θα προσδιορίσουν κατά κύριο λόγο την ποιότητα των δεδομένων σύννεφου (point cloud) που θα δημιουργηθεί. Έτσι, μειώνοντας την απόσταση μεταξύ της κάμερας και του αντικειμένου ενδιαφέροντος και αυξάνοντας την

ανάλυση για το επιλεγμένο σημείο, τα αποτελέσματα θα είναι καλύτερα και πιο λεπτομερή.

Σχετικά με τον αριθμό των φωτογραφιών που απαιτούνται, με τις παραλλαγές στην πολυπλοκότητα, τον φωτισμό και τα διαφορετικά αντικείμενα που αποτυπώνονται στην εκάστοτε μελέτη είναι αδύνατο να διατυπωθεί μία ενιαία θεωρία και να προσδιορισθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός σκηνών. Η ελάχιστη απαίτηση είναι να είναι ορατά τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά/ομόλογα σημεία σε τουλάχιστον τρεις (3) φωτογραφίες για την αναπαράσταση της σκηνής. Κάτι τέτοιο όμως ενδεχομένως δεν θα έδινε τα βέλτιστα αποτελέσματα και την επιθυμητή λεπτομέρεια στο μοντέλο. Κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου SFM συνίσταται η συλλογή όσων περισσότερων φωτογραφιών είναι εφικτό, σε λογικά πλαίσια, καθώς αυτό βελτιστοποιεί τον τελικό αριθμό χαρακτηριστικών σημείων που θα επιλεγούν και δεν επιβραδύνει σημαντικά την υπολογιστική διαδικασία.

Για την εφαρμογή της μεθόδους SFM και την τρισδιάστατη μοντελοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία ποικιλία από μηχανές, από αισθητήρες υψηλής ανάλυσης μέχρι και συμβατικές μηχανές ευρείας χρήσης. Βασική απαίτηση είναι να ληφθούν καλές εικόνες που να απεικονίζουν επαρκώς το αντικείμενο ενδιαφέροντος από κάθε πλευρά. Παράλληλα, ενώ η απαίτηση κατάλληλων φωτογραφιών καλής ανάλυσης παραμένει, εικόνες υψηλής ανάλυσης (>16 megapixels) συνήθως οδηγεί στην μείωσή της κατά την επεξεργασία και την απώλεια πληροφορίας, με στόχο τη μείωση του χρόνου επεξεργασίας.

2.4.2. Τρισδιάστατη αναπαράσταση

Μετά την εύρεση και καθορισμό των ομόλογων σημείων, υπολογίζεται η θέση της κάμερας (παράμετροι προσανατολισμού) και εξάγεται ένα «αραιό» σύννεφο σημείων χαμηλής ανάλυσης. Κατά το στάδιο αυτό, τα χαρακτηριστικά σημεία αντιστοιχίζονται στις εικόνες χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα και τον αλγόριθμο τυχαίου δείγματος «Random Sample Consensus» και δημιουργούνται διανύσματα που συνδέουν τα χαρακτηριστικά αυτά σημεία μεταξύ τους στις διάφορες εικόνες. Διανύσματα που δημιουργούνται από τουλάχιστον δύο χαρακτηριστικά σημεία σε τουλάχιστον τρεις εικόνες χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του συννέφους σημείων, ενώ όσα δεν

πληρούν αυτό το κριτήριο απορρίπτονται. Με τη μέθοδο αυτή, μη στατικά αντικείμενα (π.χ. κινούμενοι άνθρωποι) αφαιρούνται πριν την τρισδιάστατη αναπαράσταση. Αυτό ισχύει και για τα μη στατικά αντικείμενα που ακούσια συλλέγονται και εμφανίζονται στις εικόνες, όπως αντικείμενα στον αισθητήρα ή στις πλατφόρμες (π.χ. άγκιστρα) και στα UAVs. Στις περιπτώσεις αυτές, παρόλο που ομόλογα σημεία θα δημιουργηθούν και για αυτά τα αντικείμενα, στη συνέχεια θα αποκλειστούν με κατάλληλο φιλτράρισμα χρησιμοποιώντας περιορισμούς ορατότητας και κανονικονικοποίησης (Furukawa and Ponce, 2007).

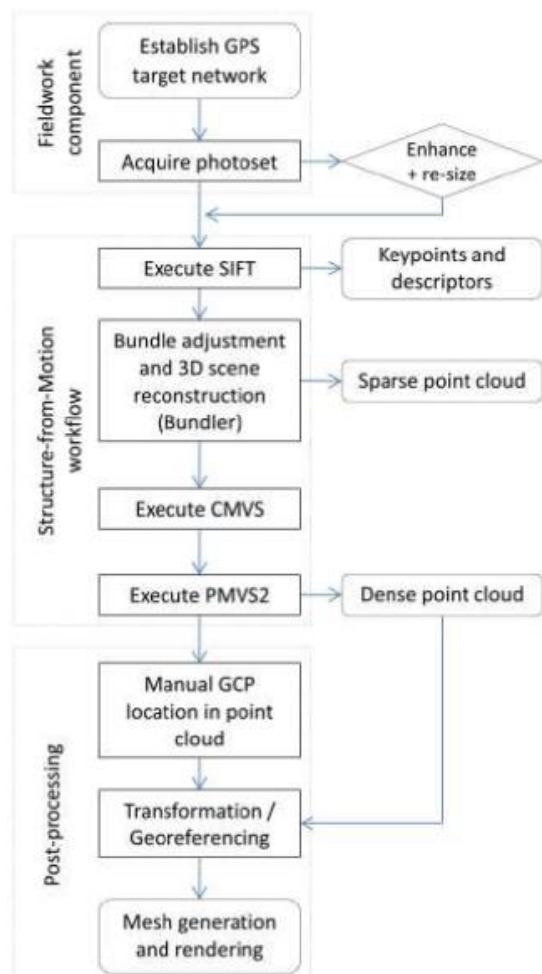
Η αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών σημείων και οι συνδέσεις/διανύσματα που έχουν δημιουργηθεί θέτουν περιορισμούς στον προσανατολισμό των θέσεων λήψης των καμερών, ο οποίος προσδιορίζεται μέσω μετασχηματισμού ομοιότητας, ενώ η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων πραγματοποιείται με τη μέθοδο της μη γραμμικής λύσης των ελαχίστων τετραγώνων. Παράλληλα, κατά το στάδιο αυτό γίνεται αυτόματη βαθμονόμηση της μηχανής. Τέλος, πραγματοποιείται τριγωνισμός για την εκτίμηση των θέσεων τρισδιάστατων σημείων και διαδοχικά ανακατασκευάζεται η γεωμετρία της σκηνής σε ένα τοπικό/αυθαίρετο σύστημα αναφοράς. Η πλήρης αυτοματοποίηση αυτής της διαδικασίας, από την εξαγωγή των χαρακτηριστικών σημείων έως την ακριβή ανακατασκευή της γεωμετρίας είναι σαφές πλεονέκτημα της μεθόδου SFM έναντι των παραδοσιακών φωτογραμμετρικών μεθόδων.

Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούνται τα αραιά νέφη σημείων που μπορεί να εμπλουτιστούν/βελτιωθούν χρησιμοποιώντας τους αλγορίθμους «Clustering View for Multi-View Stereo» (CMVS) και «Patch-based Multi-view Stereo (PMVS2)» (Furukawa & Ponce, 2007). Έχοντας ως δεδομένο τις θέσεις λήψης της κάμερας, ο αλγόριθμος «CMVS» αποσυνθέτει τις επικαλυπτόμενες εικόνες εισόδου σε κομμάτια διαχειρίσιμου μεγέθους, ενώ ο «PMVS2» χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την τρισδιάστατη ανακατασκευή των ανεξάρτητων αυτών κομματιών. Το αποτέλεσμα αυτής της πρόσθετης επεξεργασίας είναι η σημαντική αύξηση της πυκνότητας του νέφους σημείων.

2.4.3. Μετα-επεξεργασία και γεωαναφορά

Δεδομένου ότι το νέφος σημείων δημιουργείται σε ένα τοπικό/αυθαίρετο σύστημα συντεταγμένων, στη συνέχεια θα πρέπει αυτό να γεωαναφερθεί σε ένα επίσημο σύστημα συντεταγμένων και να συσχετισθεί με το γεωγραφικό χώρο. Η γεωαναφορά του μοντέλου μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας έναν μετασχηματισμό ομοιότητας 3D μέσω ενός μικρού αριθμού σημείων γνωστών συντεταγμένων (GCPs). Για τον τρισδιάστατο, επτά (7) παραμέτρων μετασχηματισμό ομοιότητας απαιτούνται τουλάχιστον τρία σημεία γνωστών συντεταγμένων που να αντιστοιχίζονται στην εικόνα και στο έδαφος. Αφού ταυτοποιηθούν τα σημεία που αναγνωρίζονται καλά στο νέφος σημείων και στο έδαφος, πραγματοποιούνται τοπογραφικές μετρήσεις (π.χ. με GPS) για τη λήψη των συντεταγμένων τους στο πεδίο. Μια άλλη προσέγγιση γεωαναφοράς είναι η άμεση γεωαναφορά του νέφους σημείων από τις θέσεις λήψης εικόνων και τις συντεταγμένες τους που συλλέγονται με ενσωματωμένο GPS που υπάρχει στην πλατφόρμα κατά την πτήση, αν χρησιμοποιείται κατάλληλο εναέριο μέσο. Ο τρόπος αυτός θα είχε ως αποτέλεσμα γεωαναφορά χαμηλής ακρίβειας με αποκλίσεις μερικών μέτρων.

Παρακάτω παρουσιάζεται συγκεντρωτικά το διάγραμμα ροής των σταδίων υλοποίησης της μεθόδου SFM έτσι όπως αυτή περιγράφηκε στις παραπάνω ενότητες.



Διάγραμμα 2.1: Διάγραμμα ροής SFM - Από τη λήψη των εικόνων στην δημιουργία του νέφους σημείων

Πηγή: Westoby, et al., 2012

3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΓΕΩ-ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΤΙΡΙΑΚΩΝ ΔΟΜΩΝ

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης πραγματοποιήθηκε τρισδιάστατη γεωοπτικοποίηση αντικειμένων ενδιαφέροντος και συγκεκριμένα κτιριακών δομών με τη χρήση πολλαπλών εικόνων από βίντεο υψηλής ανάλυσης μέσω της μεθόδου SFM. Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται και αναλύονται τα στάδια δημιουργίας του τρισδιάστατου μοντέλου από την εύρεση των δεδομένων έως την τελική φωτορεαλιστική οπτικοποίηση.

3.1. Δεδομένα Εισόδου

Βασικό στόχος της εργασίας είναι η εύρεση δεδομένων που υπάρχουν ήδη αναρτημένα στο διαδίκτυο και η αξιοποίησή τους για την τρισδιάστατη αναπαράσταση των αντικειμένων που απεικονίζουν. Με τον τρόπο αυτό, διερευνάται η χρήση της πληθώρας δεδομένων οπτικοακουστικού υλικού που υπάρχουν αναρτημένα σε διαδικτυακές πηγές για έναν διαφορετικό σκοπό όπως αυτός της 3D μοντελοποίησης, μειώνοντας ουσιαστικά το κόστος και το χρόνο δημιουργίας ενός τρισδιάστατου μοντέλου που απαιτούν τυπικές, παραδοσιακές τεχνικές. Λόγω του μεγάλου όγκου πληροφορίας που υπάρχει στο διαδίκτυο, η επιλογή κατάλληλων δεδομένων/βίντεο για ένα αντικείμενο ενδιαφέροντος απαιτεί αρκετή έρευνα και μελέτη, ώστε να προκύψει ένα ποιοτικό και λεπτομερές αποτέλεσμα.

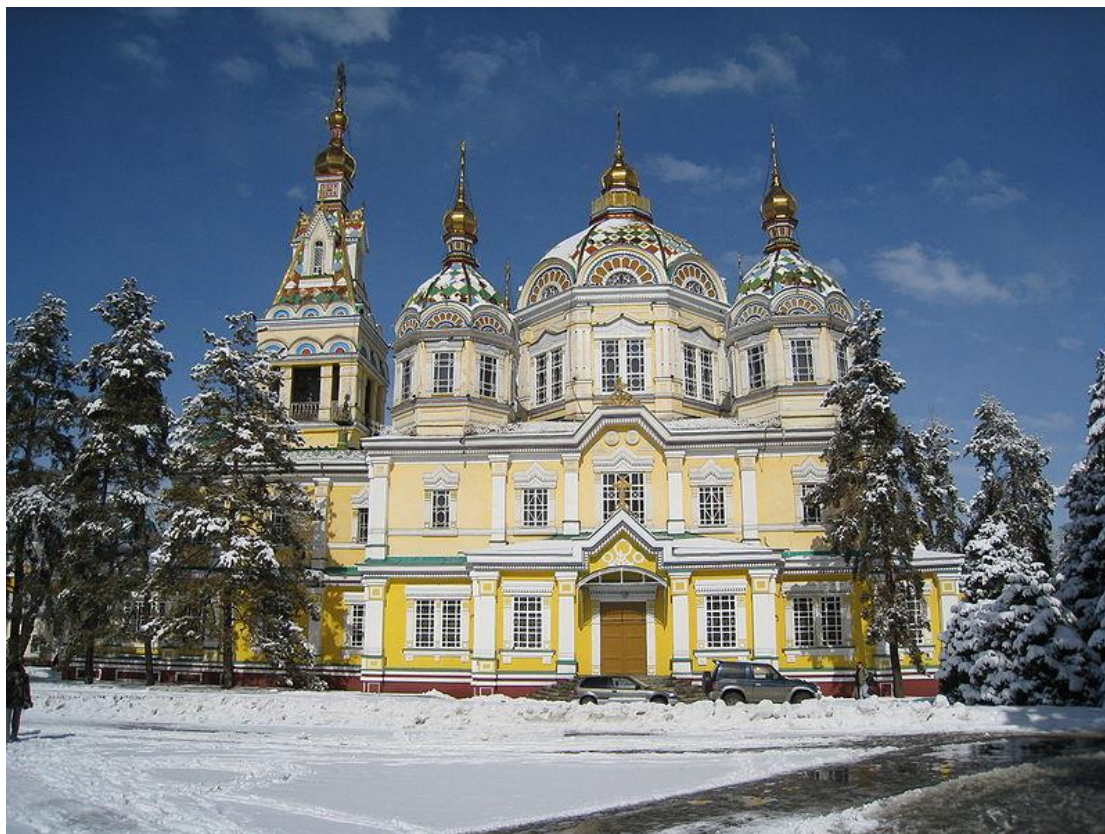
Είναι σημαντικό τα αντικείμενα των οποίων οι φωτογραφίες θα υποστούν επεξεργασία για να αποδώσουν το τρισδιάστατο μοντέλο τους, να έχουν χαρακτηριστική υφή, να μην είναι διαφανή ή γυαλιστερά και να φωτίζονται κατάλληλα. Επίσης, είναι προτιμότερο, οι φωτογραφίες που θα χρησιμοποιηθούν για επεξεργασία να έχουν ληφθεί με όσο το δυνατό υψηλότερη ανάλυση, κάτι που εξαρτάται βέβαια από την εκάστοτε φωτογραφική μηχανή, ενώ συνιστάται να επιλέγονται σταθεροί φακοί εστιακού μήκους 20-80mm και, εφόσον χρησιμοποιούνται φακοί ζουμ, να μη γίνονται αλλαγές στην εστιακή απόσταση κατά τη διάρκεια της λήψης των φωτογραφιών, για καλύτερα αποτελέσματα. Οι εικόνες πρέπει να λαμβάνονται περιμετρικά του αντικειμένου και με μεγάλη επικάλυψη, ενώ ιδιαίτερη σημασία

θα πρέπει να δοθεί στα λεγόμενα «τυφλά» σημεία, τα οποία θα πρέπει να απεικονίζονται επαρκώς έτσι ώστε να μπορέσουν να αποδοθούν. Όλα τα παραπάνω λήφθηκαν υπόψη κατά την επιλογή του αντιπροσωπευτικού βίντεο που χρησιμοποιήθηκε για την τρισδιάστατη αναπαράσταση των αντικειμένων.

Εστιάζοντας στα αντικείμενα που επιλέχθηκαν για τρισδιάστατη μοντελοποίηση, η διαδικασία έγινε σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις, για δύο διαφορετικές κλίμακες και επίπεδα λεπτομέρειας:

- Επίπεδο κτιρίου
- Επίπεδο συγκροτήματος κτιρίων / γειτονιάς

Για την πρώτη περίπτωση επιλέχθηκε ένα πολιτιστικό και θρησκευτικό μνημείο στη Ρωσία: ο καθεδρικός ναός της Αναλήψεως (Ascension Cathedral), επίσης γνωστός ως «Zenkon Cathedral». Είναι ένας ρωσικός ορθόδοξος καθεδρικός ναός που βρίσκεται στο πάρκο «Panfilov» στην πόλη «Almaty» του Καζακστάν. Ολοκληρώθηκε το 1907, είναι κατασκευασμένος από ξύλο, το ύψος του είναι 56 μέτρα και θεωρείται το δεύτερο ψηλότερο ξύλινο κτίριο στον κόσμο. Ως δεδομένο εισόδου για το εν λόγω κτίριο χρησιμοποιήθηκε βίντεο υψηλής ανάλυσης 4K από UAV (μοντέλο DJI Inspire) που βρίσκεται αναρτημένο στη διαδικτυακή πλατφόρμα «YouTube».



Εικόνα 3.1: Καθεδρικός ναός της Αναλήψεως στη Ρωσία

Πηγή: Wikipedia.org

Για τη δεύτερη περίπτωση απεικόνισης σε επίπεδο κτιριακού συγκροτήματος επιλέχθηκε σχετικό βίντεο, αναρτημένο και πάλι στη διαδικτυακή πλατφόρμα «YouTube», που απεικονίζει μια ένα τυχαίο κτιριακό συγκρότημα σε περιοχή της Γερμανίας. Το βίντεο είναι και αυτό πολύ υψηλής ανάλυσης (4K) και έχει ληφθεί από UAV (αγνώστου μοντέλου).

3.2. Στάδια Επεξεργασίας

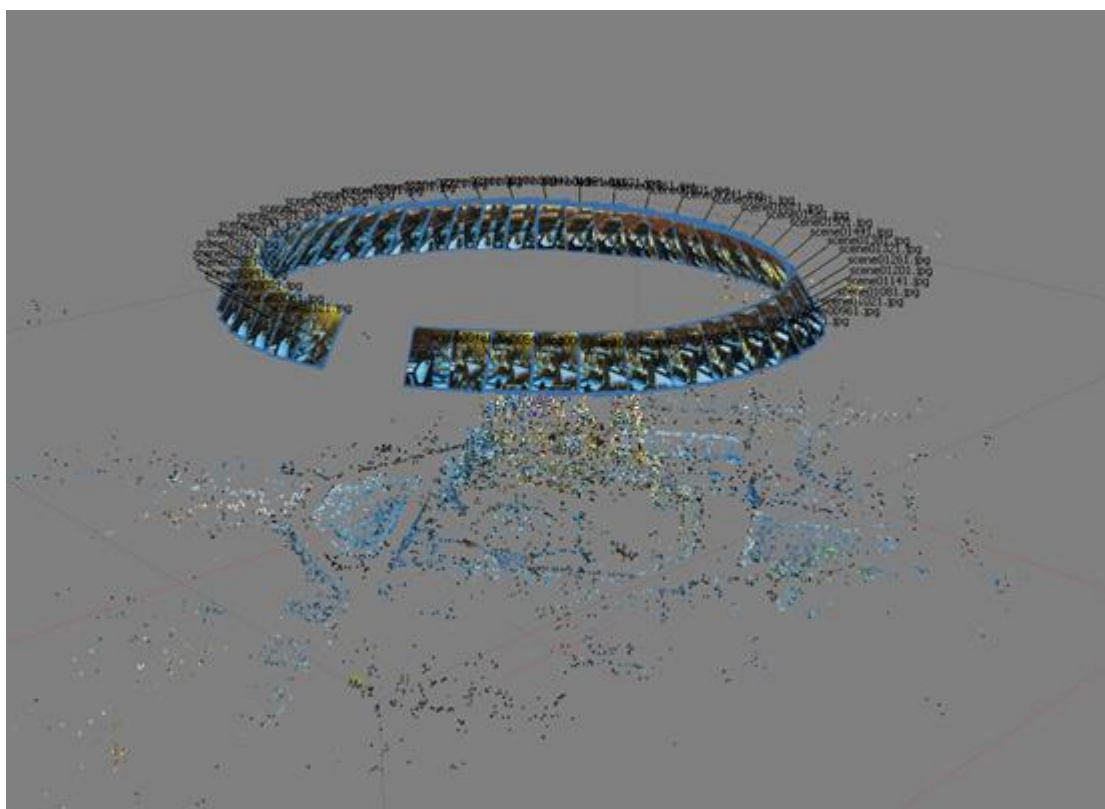
3.2.1. Επιλογή λογισμικού

Το «Agisoft PhotoScan» είναι ένα πρόγραμμα τρισδιάστατης μοντελοποίησης, με στόχο την παραγωγή 3D αντικειμένων υψηλής ποιότητας από στατικές επικαλυπτόμενες εικόνες. Βασίζεται στις πλέον πρόσφατες τεχνολογίες 3D ανακατασκευής, με χρήση πολλαπλών εικόνων ή βίντεο (από όπου δημιουργούνται εικόνες), από τις οποίες η μοντελοποίηση γίνεται αυτοματοποιημένα, και έχει ως παράγωγο ένα ανακατασκευασμένο μοντέλο με φωτογραφική υφή (texture). Το πρόγραμμα παρέχει εξαιρετική ευθυγράμμιση

των φωτογραφιών, χωρίς να απαιτούνται ειδικοί στόχοι ή συγκεκριμένες συνθήκες λήψης και χρησιμοποιείται κατά κόρον σε σχετικά έργα για επαγγελματικό σκοπό.

3.2.2. Εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων και αντιστοίχιση εικόνων

Ως πρώτο στάδιο το πρόγραμμα εντοπίζει τα κοινά σημεία στις εικόνες και τα ταυτοποιεί δημιουργώντας τα σχετικά διανύσματα/συνδέσεις μεταξύ των εικόνων, μέσω του αλγορίθμου SIFT. Παράλληλα, υπολογίζονται αυτόματα η θέση και ο προσανατολισμός της μηχανής για κάθε εικόνα.

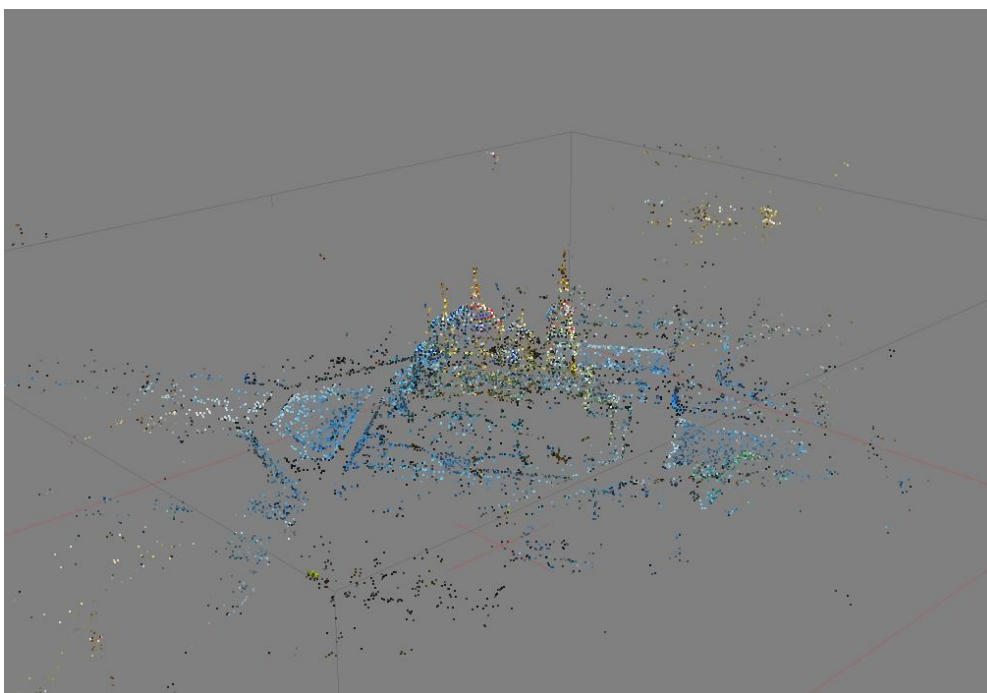


Εικόνα 3.2: Συσχέτιση εικόνων για τη δημιουργία του σύννεφου σημείων

3.2.3. Δημιουργία αραιού νέφους σημείων

Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας, η οποία ονομάζεται προσανατολισμός (alignment), είναι ένα αραιό νέφος σημείων και ένας πίνακας με τις θέσεις της κάμερας σε τοπικό/αυθαίρετο σύστημα αναφοράς. Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται χειροκίνητες διορθώσεις για την βελτίωση του νέφους σημείων και την απαλοιφή του θορύβου. Ειδικότερα, αφαιρούνται

σημεία που δεν ανήκουν στο ίδιο το αντικείμενο αλλά στο περιβάλλον του και τοποθετούνται μάρκες γύρω αυτό, έτσι ώστε, κατά τους υπολογισμούς, να εξαιρεθούν τυχόν σημεία που δεν ανήκαν σε αυτό και δεν είχαν αφαιρεθεί με την προηγούμενη διαδικασία (θόρυβος). Για το σκοπό αυτό επιλέγεται χειροκίνητα μόνο το κομμάτι της εικόνας που ενδιαφέρει για την επεξεργασία, και αποκλείονται όλα τα άλλα αντικείμενα που φαίνονται στις εικόνες, είτε αυτά είναι ορατά σε κάθε εικόνα, είτε φωτογραφήθηκαν τυχαία σε ορισμένες από αυτές.

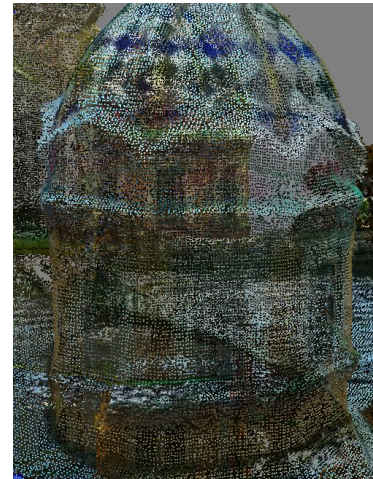
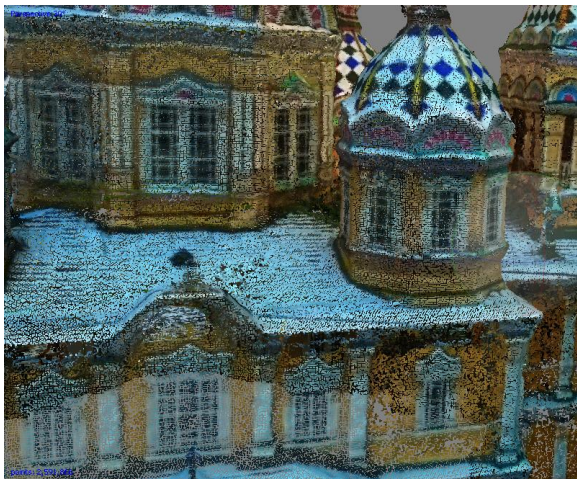
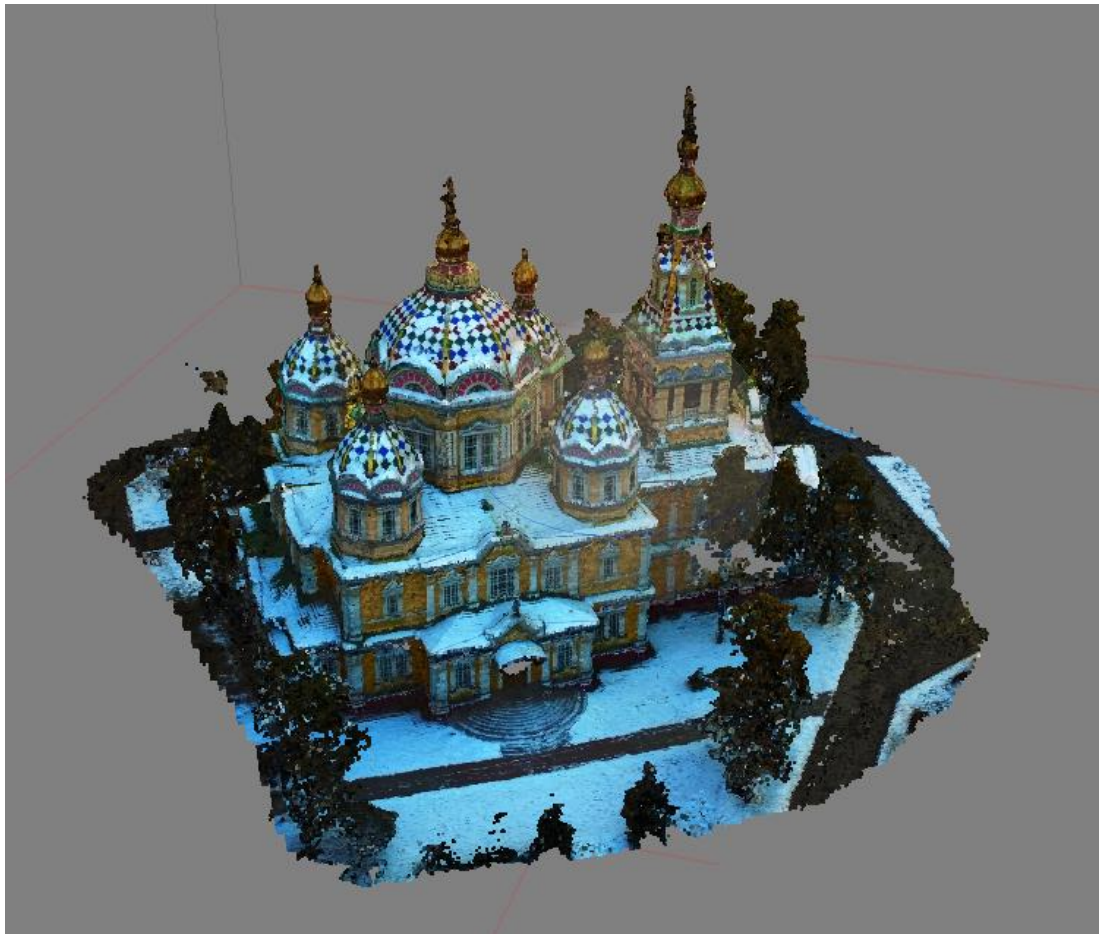


Εικόνα 3.3: Αραιό νέφος σημείων

3.2.4. Δημιουργία πυκνού νέφους σημείων

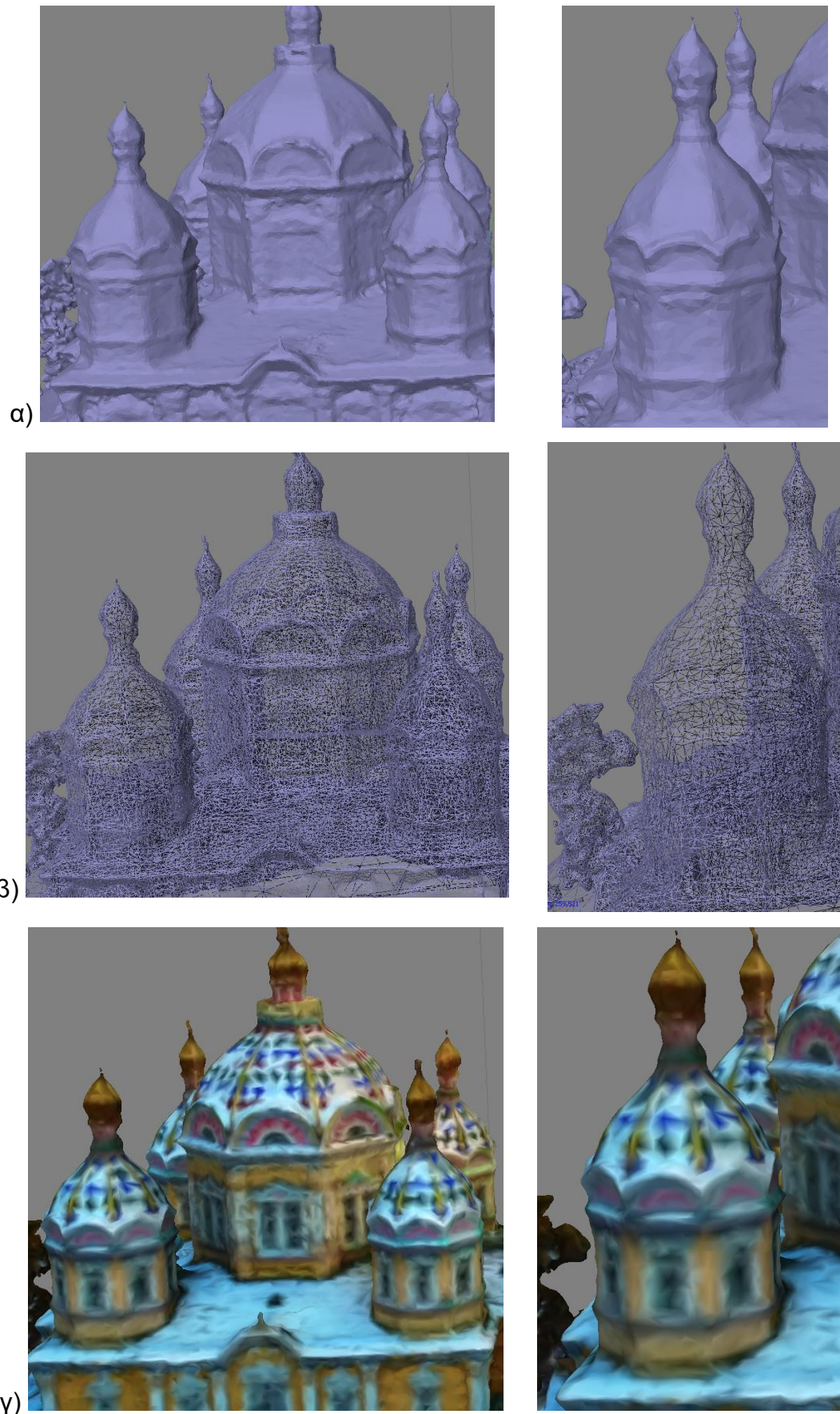
Από το αραιό νέφος σημείων και τις ίδιες τις εικόνες, προκύπτει ένα πυκνό νέφος σημείων και γίνονται οι τελικές χειροκίνητες διορθώσεις για ένα βέλτιστο αποτέλεσμα, όπως:

- Αφαίρεση περιττών σημείων και μείωση του θορύβου
- Εξομάλυνση μοντέλου
- Ταξινόμηση νέφους σημείων ανά κατηγορία



Εικόνα 3.4: Πυκνό νέφος σημείων σε διάφορες εστιάσεις

Στη συνέχεια, από το πυκνό νέφος σημείων δημιουργείται ένα πλέγμα από πολύγωνα (συνήθως τρίγωνα), τα οποία αναπαριστούν την επιφάνεια του αντικειμένου (mesh).



Εικόνα 3.5: α) Συμπαγές, β) μόνο με ακμές και γ) χρωματισμένο πλέγμα πολυγώνων

3.2.5. Δημιουργία υφής και τελική επεξεργασία

Μετά την ανακατασκευή του mesh (δηλαδή της γεωμετρίας της επιφάνειας του αντικειμένου), μπορεί να αποδοθεί η υφή του αντικειμένου (texture) στο τρισδιάστατο μοντέλο ώστε να πραγματοποιηθεί μία ρεαλιστική απεικόνιση. Για αυτή τη διαδικασία, δίνεται εντολή στο λογισμικό να υπολογίσει την ποιότητα κάθε εικόνας (βάσει της καθαρότητας, του φωτισμού και της ποιότητας κάθε μίας) και όσες είχαν ακρίβεια μικρότερη από 0.5/1 (μονάδες υπολογισμού του προγράμματος) αποκλείστηκαν.

Στη συνέχεια, μπορεί να αποδοθεί γεωαναφορά στο μοντέλο και τα εξαγόμενα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επαγγελματικό σκοπό σε κλάδους όπως: η αγορά ακινήτων (real estate), ο πολεοδομικός και χωροταξικός σχεδιασμός, η αρχιτεκτονική κ.α. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην επόμενη ενότητα.

3.3. Αποτελέσματα: Επίπεδο Κτιρίου

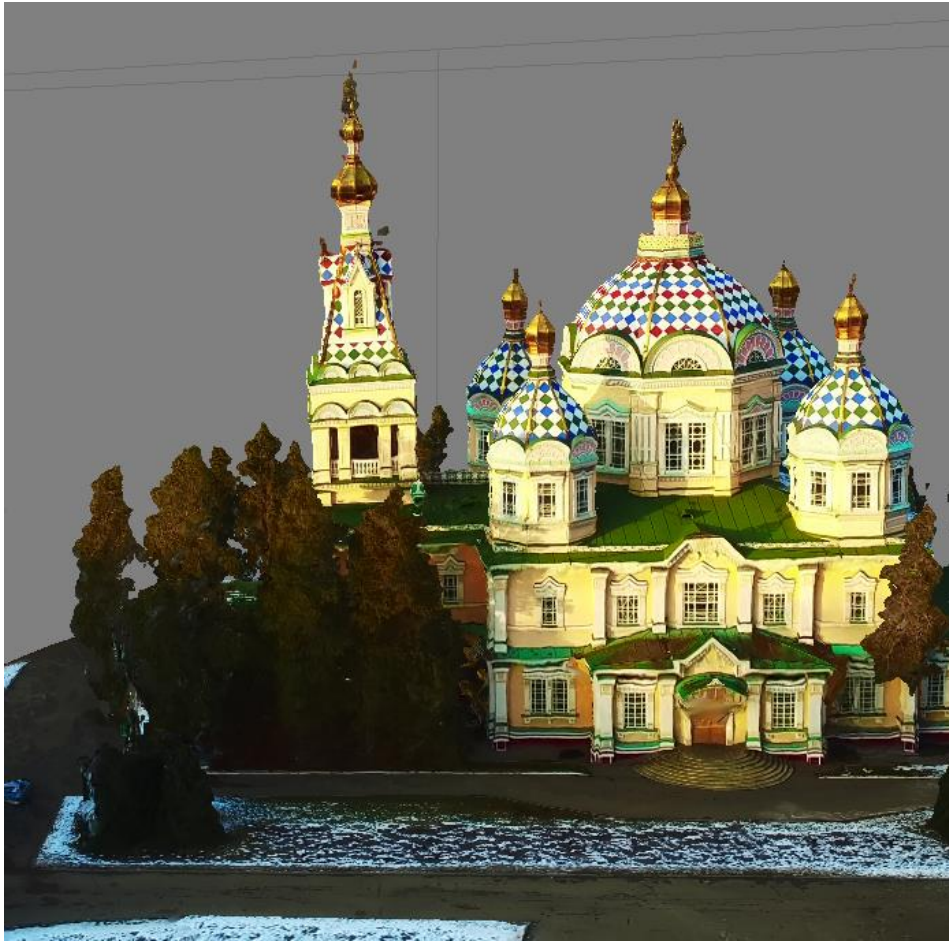
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης μοντελοποίησης του επιλεγμένου ναού στη Ρωσία. Ειδικότερα, απεικονίζονται διάφορες όψεις του κτιρίου από διαφορετικές οπτικές γωνίες ώστε να διακρίνονται οι λεπτομέρειες και τα χαρακτηριστικά του, ενώ στο τέλος εμφανίζεται το μοντέλο του ναού στο λογισμικό Google Earth, αφού προσδιορίστηκε η θέση του στο χώρο και αποδόθηκε γεωαναφορά.



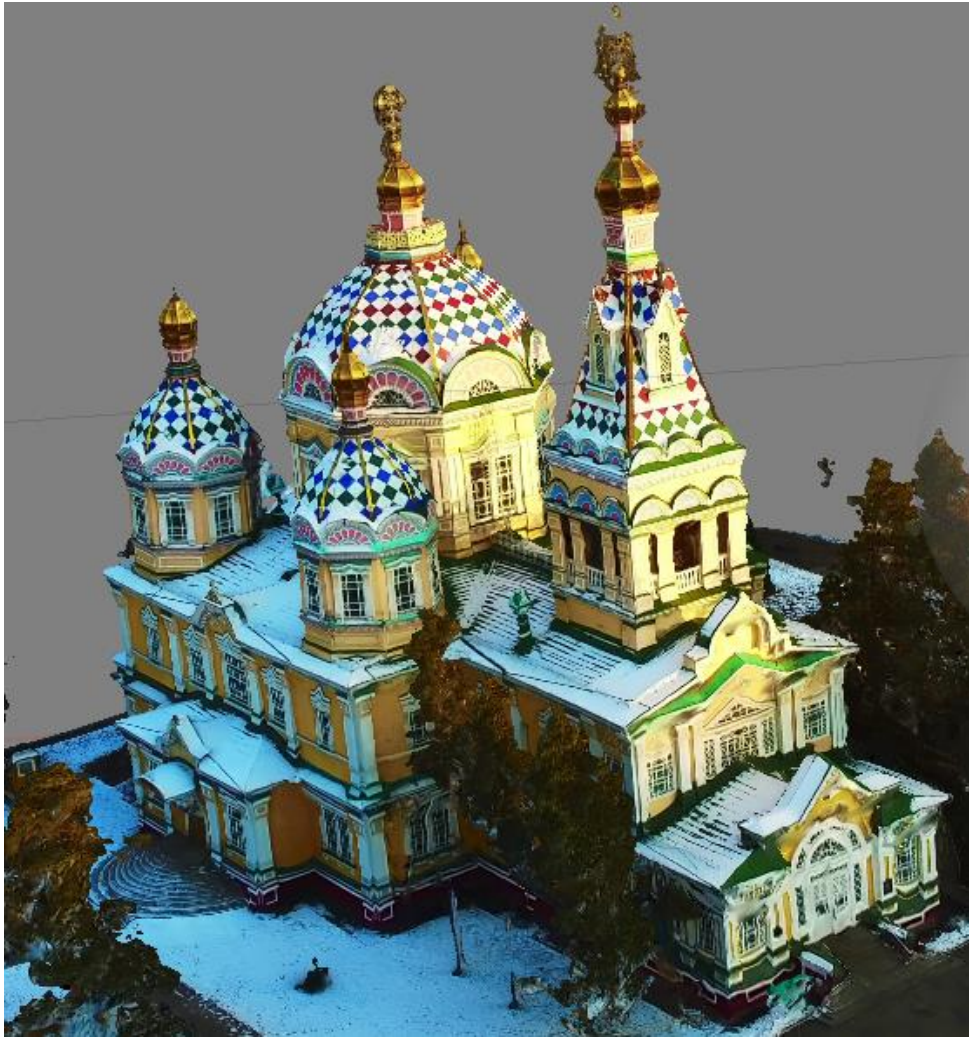
Εικόνα 3.6: 3D Μοντελοποίηση σε επίπεδο κτιρίου - Μπροστινή όψη



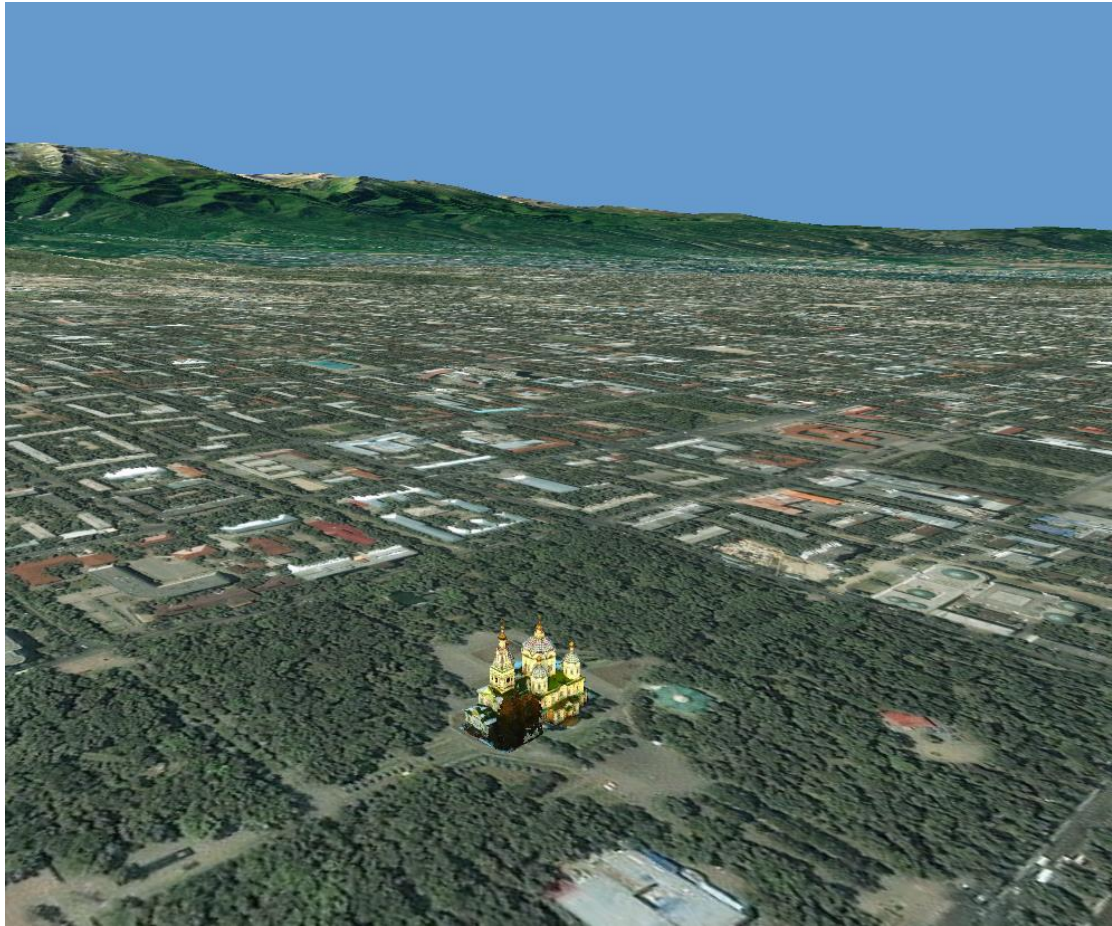
Εικόνα 3.7: 3D Μοντελοποίηση σε επίπεδο κτιρίου - Οροφή



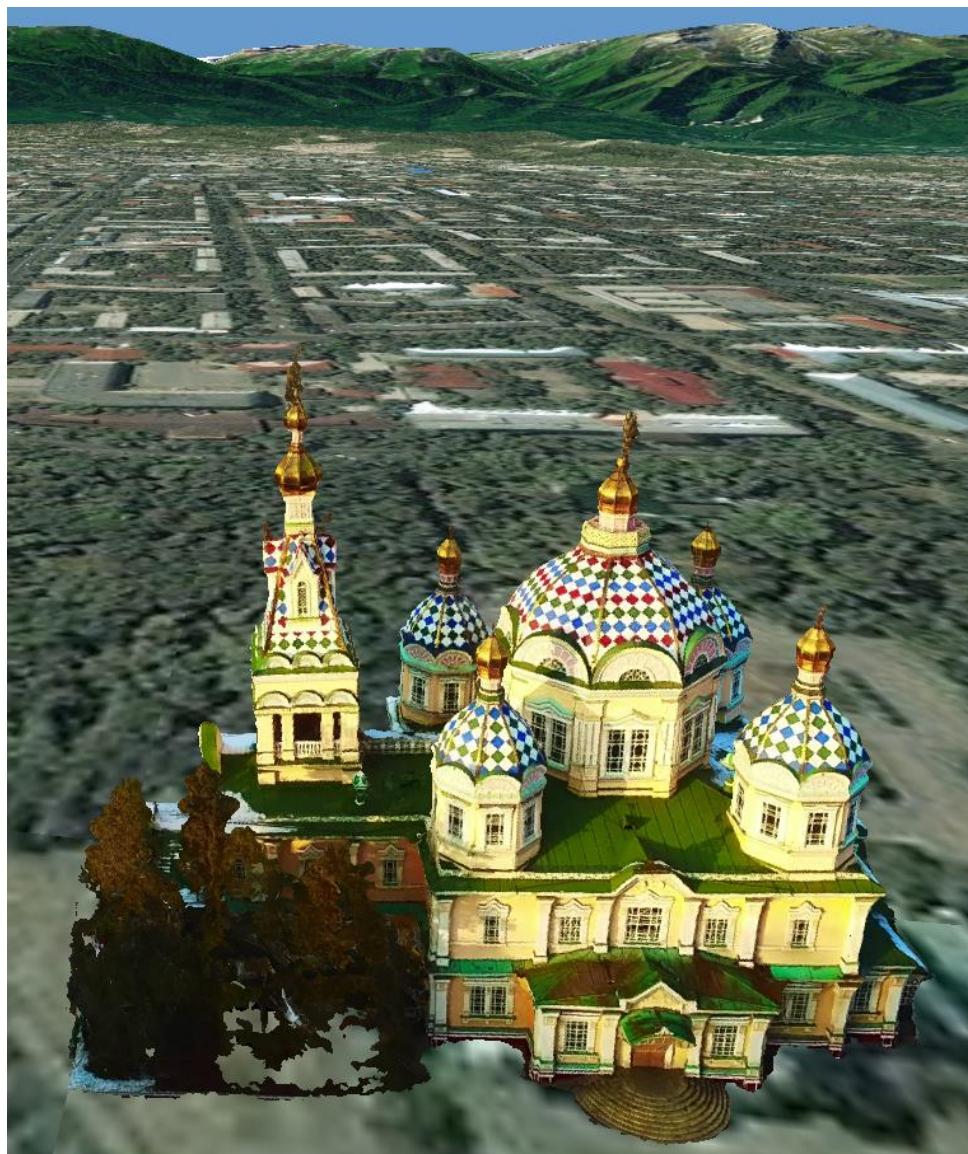
Εικόνα 3.8: 3D Μοντελοποίηση σε επίπεδο κτιρίου - Πίσω όψη



Εικόνα 3.9: 3D Μοντελοποίηση σε επίπεδο κτιρίου – Τυχαία γωνία



Εικόνα 3.10: Το μοντέλο στο γεωγραφικό χώρο



Εικόνα 3.11: Εστίαση στο γεωαναφερμένο μοντέλο

3.4. Αποτελέσματα: Επίπεδο Συγκροτήματος Κτιρίων

Ακολούθως παρουσιάζεται η τρισδιάστατη αναπαράσταση του επιλεγμένου κτιριακού συγκροτήματος. Στην πρώτη εικόνα εμφανίζεται το σύνολο της περιοχής μελέτης, ενώ στη συνέχεια γίνεται εστίαση σε επίπεδο κτιρίου όπου αυξάνεται το επίπεδο λεπτομέρειας.



Εικόνα 3.12: 3D μοντελοποίηση σε επίπεδο συγκροτήματος κτιρίων – Σύνολο περιοχής





β)

Εικόνα 3.13: 3D μοντελοποίηση σε επίπεδο συγκροτήματος κτιρίων – Εστιάσεις σε υποπεριοχές

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ

4.1. Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη και ανάλυση των διαφόρων πτυχών της γεωοπτικοποίησης και ειδικότερα της τρισδιάστατης γεωοπτικοποίησης και τελικά η εφαρμογή αυτών των αρχών και τεχνολογιών για την ρεαλιστική αναπαράσταση τρισδιάστατων μοντέλων επιλεγμένων αντικειμένων / κτιριακών δομών. Παράλληλα, σημαντικό ρόλο στην εν λόγω εφαρμογή έπαιξαν τα δεδομένα εισόδου που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν, τα οποία ήταν βίντεο υψηλής ανάλυσης ήδη αναρτημένα στο διαδίκτυο. Με τον τρόπο αυτό, διερευνάται η χρήση της πληθώρας δεδομένων οπτικοακουστικού υλικού που υπάρχουν αναρτημένα σε διαδικτυακές πηγές για έναν διαφορετικό, καινοτόμο σκοπό, όπως αυτός της 3D μοντελοποίησης, μειώνοντας σημαντικά το κόστος και το χρόνο δημιουργίας ενός τρισδιάστατου μοντέλου που απαιτούν τυπικές, παραδοσιακές τεχνικές.

Για τη δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων χρησιμοποιήθηκε μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους για εργασίες τέτοιου είδους και συγκεκριμένα η μέθοδος SFM. Ο αλγόριθμος έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα στη δημιουργία της κλειστής επιφάνειας του μοντέλου και απέδωσε ένα αρκετά πιστό μοντέλο του μελετώμενου αντικειμένου με μικρά σφάλματα, κυρίως σε (τυφλά) τμήματα που δεν φαίνονται/φωτογραφίζονται επαρκώς στα δεδομένα εισόδου. Επίσης, προβλήματα διαπιστώθηκαν σε σημεία όπου η επιφάνεια του αντικειμένου παρουσίαζε ανωμαλίες και πολυπλοκότητες. Το πρόβλημα αυτό όμως δεν επηρέασε σημαντικά την ποιότητα του αποτελέσματος, καθώς αντιμετωπίστηκε επαρκώς κατά τη δημιουργία της υψής του μοντέλου, με πληροφορία που εξήχθη από απευθείας παρατήρηση των υπάρχουσών φωτογραφιών καθώς και τη χειροκίνητη βελτίωση του σύννεφου σημείων με απαλοιφή του θορύβου.

Ειδικότερα, συγκρίνοντας τα δύο τρισδιάστατα μοντέλα που δημιουργήθηκαν, σε επίπεδο κτιρίου και σε επίπεδο συγκροτήματος κτιρίων / γειτονιάς, η αναπαράσταση του μεμονωμένου κτιρίου έδωσε καλύτερα αποτελέσματα με έμφαση στη λεπτομέρεια και λιγότερα σφάλματα. Το γεγονός αυτό είναι άμεσα συνδεδεμένο με τα δεδομένα εισόδου καθώς το βίντεο που χρησιμοποιήθηκε

στην περίπτωση αυτή απέδιδε όλα τα τμήματα του κτιρίου σε κοντινή απόσταση, με πολύ λίγα τυφλά σημεία. Παράλληλα, τα χαρακτηριστικά του κτιρίου βοήθησαν την όλη διαδικασία καθώς παρουσιάζει έντονα χρώματα και υφές που μπορούν να αποδοθούν εύκολα σε μία εικόνα. Από την άλλη πλευρά, το δεύτερο μοντέλο που δημιουργήθηκε για το κτιριακό συγκρότημα έδωσε και αυτό ικανοποιητικά αποτελέσματα, λαμβάνοντας υπόψη τον όγκο της πληροφορίας που υπήρχε στα δεδομένα εισόδου και έπρεπε να αποδοθεί. Στην περίπτωση αυτή, τα κτίρια για τα οποία πραγματοποιήθηκε τρισδιάστατη αναπαράσταση ήταν τέσσερα, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα του μοντέλου, τον όγκο του σύννεφου σημείων και τα τυφλά σημεία. Παρ' όλες τις παραπάνω δυσκολίες, το τελικό μοντέλο ήταν αρκετά λεπτομερές και απέδωσε σε σημαντικό βαθμό τα τμήματα της περιοχής και το κάθε κτίριο, ενώ χρειάστηκαν λίγες χειροκίνητες αλλαγές/διορθώσεις. Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, επομένως, τα τελικά αποτελέσματα της τρισδιάστατης αναπαράστασης των μοντέλων ήταν αρκετά ικανοποιητικά και η διαδικασία ήταν επιτυχής, αναδεικνύοντας τα οφέλη που μπορεί να έχει η τεχνολογία αυτή σε ποικίλες εφαρμογές στους διάφορους κλάδους της αγοράς.

4.2. Προοπτικές Εξέλιξης

Η γεωγραφική οπτικοποίηση δεν αντιμετωπίζεται απλά ως ένα σύνολο μεθοδολογιών αναπαράστασης της χωρικής πληροφορίας, αλλά ως μια εγγενής ανθρώπινη δραστηριότητα μέσα από την οποία δημιουργείται γνώση (Edsall, 2005). Διαφέρει από έναν επίπεδο χάρτη καθώς επιτρέπει στο χρήστη να αλληλοεπιδρά με τα δεδομένα, ώστε είτε να κατανοήσει τα διάφορα φαινόμενα είτε να εξάγει νέα γνώση από τα διαθέσιμα δεδομένα. Η γεωοπτικοποίηση έχει συνδεθεί με πολλές τεχνολογίες και υπολογιστικές τεχνικές και για το λόγο αυτό αποτελεί σύγχρονο αντικείμενο που περιλαμβάνεται σε πολλές μελέτες και δημοσιεύσεις πρόσφατα. Υπό αυτή τη σκοπιά, ενδιαφέρουσα ερευνητικά αντικείμενα αποτελούν ο συνδυασμός της γεωοπτικοποίησης με την γεωυπολογιστική (Geocomputation) και τον τομέα της γεωοπτικής αναλυτικής (geovisual analytics). Με την γεωοπτική αναλυτική, η γεωοπτικοποίηση αποκτά νέες προοπτικές εξέλιξης καθώς συναντά την οπτικοποίηση πληροφοριών (information visualization), την επιστημονική

οπτικοποίηση (scientific visualization) και τεχνικές ανάλυσης δεδομένων (analysis of data) και υπολογιστικών μετασχηματισμών (computational transformation), με στόχο την παροχή αναλυτικών συλλογιστικών τεχνικών που επιτρέπουν στους χρήστες να αποκτήσουν βαθιά γνώση του υπό μελέτη φαινομένου και βοηθούν στην αξιολόγηση, τον σχεδιασμό και την λήψη αποφάσεων.

Ειδικότερα, η τρισδιάστατη γεωοπτικοποίηση είναι ένα αντικείμενο που περιλαμβάνεται σε πολλές πρόσφατες δημοσιεύσεις διεθνώς και εξελίσσεται συνεχώς, καθώς συνδέεται άρρηκτα με την ραγδαία τεχνολογική πρόοδο. Παρ' όλα τα μεγάλα βήματα που έχουν γίνει προς την κατεύθυνση αυτή τα τελευταία χρόνια, υπάρχουν αρκετές προοπτικές εξέλιξης και περιθώρια βελτίωσης που συνιστούν ερευνητικά αντικείμενα, τα οποία μελετήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Η υποστήριξη 3D τοπολογίας, οι τεχνικές αυτόματης μοντελοποίησης και η αναπαράσταση και χωρικοποίηση αφηρημένων εννοιών με τη βοήθεια της τρίτης διάστασης είναι ίσως τα σημαντικότερα από αυτά τα αντικείμενα, με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία.

Τέλος, πρέπει να τονιστεί πως ως σήμερα λείπει η λεπτομερής θεωρία σχετικά με την γεωοπτικοποίηση και ιδιαίτερα την 3D γεωοπτικοποίηση καθώς και το σύνολο των επιστημονικών τομέων με τους οποίους μπορεί να συσχετιστεί (Bleisch, 2012). Οι διάφορες αναπαραστάσεις θα πρέπει να βασίζονται σε αιτιολογημένες και σχεδιασμένες αποφάσεις ανάλογα τις εκάστοτε προθέσεις και σκοπούς. Τυπικές ερωτήσεις μπορεί να περιλαμβάνουν τα εξής: ποια δεδομένα θα πρέπει να απεικονιστούν και σε τι κλίμακα; ποιος είναι ο σκοπός της οπτικοποίησης και ποιες προϋποθέσεις πρέπει να πληρούνται; ποιο είναι το μήνυμα που πρέπει να λάβει και να κατανοήσει ο τελικός αποδέκτης;

Οι απαντήσεις σε αυτές και οι αιτιολογίες ενδέχεται να βασίζονται σε υπάρχουσες θεωρίες και κατευθυντήριες οδηγίες από συναφείς επιστημονικούς κλάδους, όπως η χαρτογραφία ή η οπτικοποίηση πληροφοριών (information visualization), αλλά θα πρέπει παράλληλα να λαμβάνονται υπόψη τα ειδικά χαρακτηριστικά κάθε περίπτωσης. Συνεπώς, καθίσταται αναγκαία η διατύπωση συγκεκριμένης θεωρίας ή/και κανόνων για την οπτική διερεύνηση, ανάλυση, σύνθεση και απόδοση των γεωχωρικών πληροφοριών και τελικά η τυποποίηση

των διαδικασιών γεωοπτικοποίησης ως ένα βαθμό, ανάλογα με τις διάφορες κατηγορίες εφαρμογών, με σκοπό την αποφυγή λαθών, παρερμηνεύσεων και μετάδοσης λανθασμένου μηνύματος στον τελικό αποδέκτη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abdalla, R., 2004. Utilizing 3D web-based GIS for infrastructure protection and emergency preparedness. *ISPRS Conference, Istanbul, Turkey.*

Abdul-Rahman, A. & Pilouk, M., 2007. *Spatial Data Modelling.* Berlin Heidelberg New York: Springer.

Ambroziak, B. M. & Ambroziak, J. R., 1999. Infinite Perspectives. Two Thousand Years of Three-Dimensional Mapmaking. In: s.l.:New York: Princeton Architectural Press.

Andrienko, G. et al., 2007. Visual analytics for spatial decision support: setting the research agenda. *International Journal of Geographic Information Science* 8, p. 839–857.

Andreasson, H. & Duckett, T., 2004. Topological localization for mobile robots using omni-directional vision and local features. The 5th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles.

Bertin, J., 2010. *Semiology of Graphics: Diagrams, Networks.* s.l.:ESRI Press.

Bleisch, S., 2012. 3D Geovisualization – Definition and Structures. *XXII ISPRS Congress, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Τόμος I-2.

Brasington, J. & Smart, R., 2003. Close range digital photogrammetric analysis of experimental drainage basin evolution. *Earth Surface Processes and Landforms* 28(3):231 - 247.

Carson, S., 1998. CAD and GIS: Graphics meets information allowing for the conception of 3D maps, http://maps.unomaha.edu/Peterson/gis/Final_Projects/1998/Carson/main.html (last access on 12/2019).

Changbin, W., Yuan, D. & Xinxin, Z., 2019. Three-dimensional data modeling of real estate objects in China. *Journal of Geographical Systems.*

Chen, J. et al., 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter. *Remote Sensing of Environment* 91, p. 332–344.

Chertov, O. A. et al., 2005. Geovisualization of forest simulation modeling results: A case study of carbon sequestration and biodiversity. *Computers and Electronics in Agriculture* 49, pp. 175-191.

Dandois, J. P. & Ellis, E., 2013. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation. *Remote Sensing of Environment*, Volume 136, p. 259–276.

Döllner, J., Baumann, K. & Buchholz, H., 2006. *Virtual 3D city models as foundation of complex urban information spaces.* Vienna, Austria: s.n.

Donolo, R. M., 2014. Contributions to Geovisualization for Territorial Intelligence. *PhD Thesis. INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON, UNIVERSITÁ DEGLI STUDI DI ROMA TOR VERGATA.*

Dykes, A. P., 1995. Hydrological controls on shallow mass movements and characteristic slope forms in the tropical rainforest of Temburong District, Brunei. *PhD thesis, King's College, University of London.*

Dykes, J., MacEachren, A. M. & Kraak, M. J., 2005. Exploring Geovisualization. *Elsevier Ltd.*

Easa, S., Strauss, T. & Souleyrette, R., 2002. Three-Dimensional Transportation Analysis: Planning and Design. *Journal of Transportation Engineering* 128(3).

Edsall, R., 2005. Challenging Conventions for Geovisualization Interface Design: Implications for Exploratory Data Analysis. *International Conference on Information Visualization.*

Eliseev, M., Tomchinskaya, T., Lipenkov, A. & Blinov, A., 2017. Using 3D-modeling Technologies to Increase Road Safety. *Transportation Research Procedia* 20:171-179.

Elmqvist, N. & Tudoreanu, M. E., 2007. Occlusion Management in Immersive and Desktop 3D Virtual Environments: Theory and Evaluation. *The Int. J. of Virtual Reality*, Issue 6(2), pp. 21-32.

Fookes, P. G., Sweeney, M., Mandy, C. N. & Martin, R. P., 1985. Geological and geotechnical engineering aspects of low-cost roads in mountainous terrain. *Engineering Geology* 21, pp. 1-152.

Furukawa, Y. & Ponce, J., 2007. Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.*

Gahegan, M., Wachowicz, M., Harrower, M. & Rhyne, T. M., 2001. The integration of geographic visualization with knowledge discovery in databases and geocomputation. *Cartography and Geographic Information Science* 28, pp. 29-44.

Garcia-Almirall, P., Dalmau, F. V. & Bergada, M. M., 2014. Planned vs. Real City: 3D GIS for Analyzing the Transformation of Urban Morphology. *Proceedings of the AGILE'2014 International Conference on Geographic Information Science.*

Hall, A. & Ahonen-Rainio, P., 2012. Knowledge Visualization in Spatial Analysis. *Proceedings of the AGILE'2012 International Conference on Geographic Information Science.*

Hartley, R. & Sturm, P., 1994. Triangulation. In *American Image Understanding Workshop*. p. 957–966.

Ho, Q. & Jern, M., 2013. Geovisual Analytics and Storytelling Applied to a Flood Scenario. *GeoViz 2013: Interactive Maps that Help People Think*, <http://www.geomatik-hamburg.de/geoviz/> (last access on 12/2019).

Immerzeel, W. et al., 2014. High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles. *Remote Sensing of Environment*, Volume 150, pp. 93-103.

James, M. & Robson, S., 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*.

Keutterling, A. & Thomas, A., 2006. Monitoring glacier elevation and volume changes with digital photogrammetry and GIS at Gepatschferner glacier. *International Journal of Remote Sensing* 27(19):4371-4380.

Korzeniowska, K. & Pfeifer, N., 2014. 3D Building Change Detection on the basis of Airborne Laser Scanning Data. *Proceedings of the AGILE'2014 International Conference on Geographic Information Science*.

Kraak, M. J., 2003. Geovisualization illustrated. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, pp. 390-399.

Kraak, M. J., 2008. Editorial: from geovisualisation toward geovisual analytics. *Cartographic Journal* 45, p. 163–164.

Kraak, M. J. & Ormeling, F., 2010. *Cartography: Visualisation of Spatial Data*. Essex: s.n.

Lowe, D., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*.

Lucieer, A., de Jong, S. & Turner, D., 2013. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, Volume 38, pp. 97-116.

Maarel, H., 2005. Building and Modeling a City in 3D.

Maarel, H., 2005. Building and modelling a city in city 3D: visualisation of Apeldoorn, the Netherlands. *GEOINFORMATICS [EN LIGNE], VOL 8 N° 1*.

MacEachren, A. M. et al., 2004. Geovisualization for knowledge construction and decision. In: *Computer Graphics and Applications*. s.l.:s.n., p. 13–17.

MacEachren, A. M., Hardisty, F., Dai, X. P. & Pickle, L., 2003. Supporting visual analysis of federal geospatial statistics communications of the ACM. pp. 59-60.

MacEachren, A. M., Wachowicz, M., Edsall, R. & Haug, D., 1999. Constructing knowledge from multivariate spatiotemporal data: integrating geographical visualization with knowledge discovery in database methods. *Int. journal geographical information science*, 13(4), pp. 311-334.

Mach, R. & Petschek, P., 2007. Visualization of Digital Terrain and Landscape Data. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.

Masala, E. & Pensa, S., 2013. Dynamic maps for supporting spatial data processes. *GeoViz Hamburg*.

Micheletti, N., Chandler, J. & Lan, S., 2015. Structure from Motion (SfM) Photogrammetry.

Müller, P., Zeng, G., Wonka, P. & Gool, L. V., 2007. Image-based procedural modeling of facades. *ACM Transactions on Graphics*, Issue 26(3), p. 85.

North Dakota State University, 2002. 3D Alaglyph Home Page – North Dakota State University, Department of GeoSciences. <https://www.ndsu.edu/> (last access on 01/2020).

Ragia, L. & Fiume, E., 2009. Challenges in Geovisualization. *Department of Computer Science, University of Toronto*.

Reitmayr, G., Eade, E. & Drummond, T., 2005. Localisation and interaction for augmented maps. Στο: *Proceedings of the 4th IEEE/ACM International Symposium on*. Washington: IEEE Computer Society, p. 120–129.

Remondino, F., El-Hakim, S. F., Gruen, A. & Zhang, L., 2008. Turning images into 3-D models. *IEEE Signal Processing Magazine*, Issue 25(4), pp. 55-65.

Rieke-Zapp, D. & Nearing, M., 2005. Slope shape effects on erosion: A laboratory study. *Soil Science Society of America Journal* 69(5).

Rose, J. & Smith, M. J., 2008. Glacial geomorphological maps of the Glasgow region, western central Scotland. *Journal of Maps v2008*, pp. 399-416.

Singh, S. P., Jain, K. & Mandla, V. R., 2014. Image Based 3D City Modeling: Comparative Study. *ISPRS Technical Commission V Symposium*, Τόμος XL-5.

Smith, M. J., Hillier, J. K., Otto, J. C. & Geilhausen, M., 2013. Geovisualization. In: S. J., ed. *Treatise on*. San Diego: Academic Press, pp. 299-325.

Sturzenegger, M. & Stead, D., 2009. Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. *Natural hazards and earth system sciences* 9(2).

Thomas, J. J. & Cook, C. A., 2005. *Illuminating the Path: The Research and Development Agenda for Visual Analytics*. Washington: IEEE Press.

Valgren, C. & Lilienthal, A., 2014. SIFT, SURF and Seasons: Long-term Outdoor Localization Using Local Features. *ECMR*.

Westoby, M., Brasington, J. & Glasser, N., 2012. Structure-from-Motion photogrammetry: a novel, low-cost tool for geomorphological applications. Volume 936.

Wiechert, A., Gruber, M. & Ponticelli, M., 2011. UltraCam: the new super-large format digital aerial camera. *Proceedings of the ASPRS 2011 Annual Conference*.

Wise, S., 2000. Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. *Hydrological Processes 14*, p. 1909–1929.

Wonka, P., Wimmer, M., Sillion, F. & Ribarsky, W., 2003. Instant architecture. *ACM Transactions on Graphics*, Issue 22(3), pp. 669-677.

Ηλεκτρονικές Πηγές

Acropolis Virtual Tour, 2020. <http://www.acropolisvirtualtour.gr/> (last access on 01/2020).

Google Arts and Culture, 2020. <https://artsandculture.google.com/> (last access on 01/2020).

Market Research Future, 2020. <https://www.marketresearchfuture.com/> (last access on 12/2019).

NASA, 2003. <http://www.nasa.gov/home/> (last access on 12/2019).

Pix4D, 2020. <https://www.pix4d.com/> (last access on 12/2019).

