



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία με τίτλο:

**ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΕΞΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ**

Αικατερίνη Μαρία Φωτίου
Ιούλιος 2018

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χαράλαμπο Ιωαννίδη για την συνεργασία και τη βοήθειά του σε όλα τα στάδια της εργασίας, καθώς και την κ. Σοφία Σοϊλέ για τη σημαντική συνεισφορά της σε πρακτικά ζητήματα. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Ευάγγελο Μαλτέζο για την βοήθειά του σε ορισμένα ζητήματα που με δυσκόλεψαν. Ευχαριστώ επίσης την συμφοιτήριά μου και διπλωματούχο της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Έρια Αρώνη, για τις πολύτιμες συμβουλές της. Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τις φίλες και τους φίλους τοπογράφους για τα ωραία μα και διδακτικά χρόνια που περάσαμε μαζί!

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες, με την ευρεία διάδοση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, ολοένα και περισσότερες διαδικασίες απόδοσης του χώρου αυτοματοποιούνται. Σε αυτή την κατεύθυνση βρίσκονται τόσο διαδικασίες της Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας όσο και της Ψηφιακής Χαρτογραφίας. Σε αυτό το πλαίσιο λοιπόν, η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την παραγωγή ενός Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους μέσω ψηφιακής συνταύτισης εικόνων, το οποίο στη συνέχεια αποτελεί το βασικό δεδομένο εισόδου για την αυτόματη εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου. Τα αρχικά δεδομένα ήταν αεροφωτογραφίες της περιοχής της Μαγούλας με γνωστό τον εσωτερικό και εξωτερικό προσανατολισμό. Η διαδικασία της ψηφιακής συνταύτισης εκτελέστηκε στο εμπορικό λογισμικό ERDAS IMAGINE χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αυτά και το αποτέλεσμα της ήταν νέφη σημείων ανά στερεοζεύγος αεροφωτογραφιών. Τα νέφη αυτά υπέστησαν επεξεργασία με τη χρήση του MATLAB ώστε να απομονωθούν τα σημεία του γυμνού εδάφους, απαραίτητο βήμα για τη δημιουργία του ΨΜΕ. Κριτήριο για αυτή τη διαδικασία αποτέλεσε η τιμή του δείκτη Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Στη συνέχεια εκτελέστηκε η διαδικασία παραγωγής του κανονικοποιημένου μοντέλου εδάφους με δεδομένα τα σημεία που προέκυψαν στο προηγούμενο βήμα. Να σημειωθεί ότι πριν την παραγωγή του κανονικοποιημένου μοντέλου εκτελέστηκε μία διαδικασία πυκνώσης των σημείων του εδάφους. Μετά την ολοκλήρωση δημιουργίας του μοντέλου έγινε η εισαγωγή του στο λογισμικό ArcMap 10.3 για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιώντας εντολές της εργαλειοθήκης Spatial Analyst > Hydrology. Στο τέλος της εργασίας, τα παράγωγα προϊόντα, δηλαδή το ΨΜΕ και το υδρογραφικό δίκτυο, αξιολογήθηκαν ως προς την ποιότητά τους μέσω της σύγκρισής τους με κάποια δεδομένα αναφοράς. Στην περίπτωση του ΨΜΕ το μοντέλο αναφοράς ήταν αυτό της “Ελληνικό Κτηματολόγιο” ενώ για το δίκτυο ήταν το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του Σαρανταπόταμου που παραχωρήθηκε από το Εργαστήριο Εγγειοβελτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, αλλά και τα ψηφιοποιημένα ρεύματα από χάρτη της Γ.Υ.Σ.με κλίμακα 1:5000. Βάσει αυτών των αξιολογήσεων επισημάνθηκαν οι αιτίες των σφαλμάτων τους και έγιναν κάποιες προτάσεις για βελτίωση της διαδικασίας.

Abstract

In recent decades, with the widespread use of computers, more and more procedures for rendering the space are being automated. In this direction there are both Digital Photogrammetry and Digital Cartography. In this context, this diploma thesis deals with the production of a Digital Terrain Model through digital image matching, which is then the basic input for the automatic extraction of the hydrographic network. The original data were aerial photographs of the Magoula area together with the interior orientation parameters and the exterior orientation parameters. The procedure of digital image matching was performed on commercial software ERDAS IMAGINE using these data and its result was point cloud for each stereo-pair of aerial photographs. These point clouds were processed using MATLAB in order to isolate the bare ground, which is a necessary step for the creation of the DTM. Criterion for this process was the value of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Then, the creation of raster DTM was performed using as input the points obtained from the previous process. It should be mentioned that before the production of the normalized model, a process of densification of the ground points was performed. After the creation of the model was completed, it was introduced into the ArcMap 10.3 software for the extraction of the hydrographic network using commands of the Spatial Analyst> Hydrology toolbox. At the end of the diploma thesis, the derived products, i.e. the DTM and the hydrographic network, were assessed for their quality by comparing them with some reference data. In the case of DTM, the reference model was that of the "Hellenic Cadastre", while for the network was the drainage network allocated by the Department of Infrastructure and Rural Development Scope of National Technical University of Athens, as well as the digitized streams from a map of the Hellenic Military Geographical Services. Based on these assessments the causes of their errors were highlighted and some suggestions were made for improving the process.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή	13
1.1 Αντικείμενο και στόχος εργασίας	14
1.2 Δομή της εργασίας	14
Κεφάλαιο 2 ^ο : Ψηφιακό μοντέλο εδάφους και υδρογραφικό δίκτυο	17
2.1 Αναπαράσταση του εδάφους.....	17
2.2 Παγκόσμια ψηφιακά μοντέλα εδάφους.....	18
2.2.1 Μοντέλα ASTER	18
2.2.2 Μοντέλα SRTM	19
2.3 Δομή ψηφιακών μοντέλων εδάφους	19
2.3.1 ΨΜΕ σε δομή TIN.....	19
2.3.2 ΨΜΕ σε δομή κανάβου	20
2.4 Τρόποι συλλογής υψομετρικών δεδομένων	21
2.4.1 Τοπογραφικοί χάρτες	21
2.4.2 Τοπογραφικές μετρήσεις	22
2.4.3 Φωτογραμμετρικές μέθοδοι	22
2.4.4 LIDAR.....	22
2.4.5 Δεδομένα INSAR	23
2.5 Αξιολόγηση ψηφιακών μοντέλων εδάφους	24
2.5.1 Έλεγχοι ποιότητας ΨΜΕ	25
2.6 Εφαρμογές ψηφιακών μοντέλων εδάφους	27
2.6.1 Υδρολογική χρήση	27
2.6.2 Εντοπισμός κτιρίων	28
2.6.3 Αξιολόγηση της ποιότητας άλλων ΨΜΕ	28
2.7 Υδρογραφικό δίκτυο.....	28
2.7.1 Θεωρητικά στοιχεία.....	28
2.7.2 Μεθοδολογία αυτόματης εξαγωγής υδρογραφικού δικτύου.....	29
Κεφάλαιο 3 ^ο : Φωτογραμμετρικό υπόβαθρο	33
3.1 Θεμελιώδεις φωτογραμμετρικές έννοιες	33
3.2 Επιπολική γεωμετρία.....	36
3.3 Επιπολική επανασύσταση.....	37
3.4 Ψηφιακή συνταύτιση εικόνων	38
3.4.1 Είδη ψηφιακής συνταύτισης	39
3.4.2 Αλγόριθμοι ψηφιακής συνταύτισης	40

3.4.3 Μέθοδοι υπολογισμού κόστους συσχέτισης.....	41
3.4.4 Ημι-καθολικός αλγόριθμος	43
Κεφάλαιο 4 ^ο : Εφαρμογή.....	45
4.1 Περιοχή μελέτης	45
4.2 Δεδομένα.....	47
4.3 Ψηφιακή συνταύτιση.....	49
4.4 Επεξεργασία νεφών: αφαίρεση θορύβου	51
4.5 Επεξεργασία νεφών: δείκτης NDVI.....	53
4.6 Πύκνωση του νέφους των σημείων εδάφους	60
4.7 Δημιουργία μοντέλου εδάφους δομής RASTER	61
4.8 Εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου	64
Κεφάλαιο 5 ^ο : Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	67
5.1 Αξιολόγηση ψηφιακού μοντέλου εδάφους	67
5.1.1 Μοντέλο αναφοράς	67
5.1.2 Αξιολόγηση του μοντέλου και σχολιασμός σφαλμάτων	68
5.2 Αξιολόγηση του εξαχθέντος υδρογραφικού δικτύου	75
5.2.1 Δίκτυα αναφοράς	75
5.2.2 Σύγκριση με το δίκτυο αναφοράς (A)	77
5.2.3 Σύγκριση με το δίκτυο αναφοράς (B)	81
5.2.4 Έλεγχος του παραχθέντος δικτύου σε σχέση με το δομημένο περιβάλλον	83
Κεφάλαιο 6 ^ο : Συμπεράσματα και δυνατότητες βελτίωσης	87
6.1 Συμπεράσματα σχετικά με την παραγωγή ΨΜΕ.....	87
6.2 Συμπεράσματα σχετικά με την αυτόματη εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου	89

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Διαφορά ψηφιακού μοντέλου επιφανείας (DSM) και ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DTM).....	18
Εικόνα 2: Τριγωνισμός Delaunay.....	19
Εικόνα 3: Απεικόνιση ενός ΨΜΕ με δομή κανάβου και γραφική επεξήγηση της δομής του.....	21
Εικόνα 4: Κωδικοποίηση για την κατεύθυνση ροής βάσει ψηφιδωτού ΨΜΕ. (πηγή : http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm).....	30
Εικόνα 5: Υπολογισμός συσσώρευσης ροής βάσει ψηφιδωτού ΨΜΕ. (πηγή : http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm).....	31
Εικόνα 6: Απεικόνιση των βασικών στοιχείων της κεντρικής προβολής (Πέτσα, 2000).	34
Εικόνα 7: Εκφράσεις της κλίμακας σε κατακόρυφες λήψεις (αριστερά) και επίγειες λήψεις (δεξιά) (Πέτσα, 2000)	34
Εικόνα 8: Απεικόνιση της μονοσήμαντης σχέσης χώρου-εικόνας (Πέτσα, 2000).	35
Εικόνα 9: Γεωμετρία του στερεοζεύγους (Καλησπεράκης, 2010).	37
Εικόνα 10: Στερεοζεύγος πριν και μετά τη διαδικασία επιπολικής επανασύστασης (πηγή : Καρράς, διαφάνειες Φωτογραμμετρίας III).	38
Εικόνα 11: Οπτικοποίηση του χώρου των ψηφιακών παραλλάξεων (Φλωρίδη, 2013).	44
Εικόνα 12: Περιοχή μελέτης (πηγή : Google Earth).....	46
Εικόνα 13: Επικάλυψη μεταξύ αεροφωτογραφιών.	48
Εικόνα 14: Νέφος σημείων της περιοχής μελέτης σε κανάλια 4-3-2.	51
Εικόνα 15: Νέφος σημείων με θόρυβο (κάτω) και χωρίς θόρυβο (πάνω).	53
Εικόνα 16: Απόσπασμα από τον κώδικα διαγραφής σημείων από το νέφος βάσει του δείκτη NDVI.....	55
Εικόνα 17: Νέφος 3 με αφαίρεση σημείων με τιμή NDVI > 0.98.....	56
Εικόνα 18: Νέφος 1 με σημεία βλάστησης και εδάφους (αριστερά) και νέφος 1 με σημεία εδάφους και σημειωμένα υπολείμματα σκεπών (δεξιά).....	59
Εικόνα 19: Το νέφος σημείων εδάφους ολόκληρης της περιοχής μελέτης.....	60
Εικόνα 20: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης σε δομή TIN	61
Εικόνα 21: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης σε δομή καννάβου .	63
Εικόνα 22: Διεύθυνση ροής (αριστερά) και συσσώρευση ροής (δεξιά).....	65
Εικόνα 23: Παραχθέντα δίκτυα με διαφορετικό κατώφλι συσσώρευση ροής.....	66
Εικόνα 24: Απεικόνιση της επικάλυψης (ροζ) των μοντέλων αναφοράς και του μοντέλου προς αξιολόγηση	68
Εικόνα 25:Ανάδειξη χονδροειδών σφαλμάτων και χρωματική απόδοση υψομετρικών διαφορών βόρειου τμήματος περιοχής μελέτης σύμφωνα με τα στατιστικά μεγέθη μετά την αφαίρεση των χονδροειδών σφαλμάτων	72
Εικόνα 26: Ανάδειξη χονδροειδών σφαλμάτων και χρωματική απόδοση υψομετρικών διαφορών κεντρικού τμήματος περιοχής μελέτης σύμφωνα με τα στατιστικά μεγέθη μετά την αφαίρεση των χονδροειδών σφαλμάτων	73

Εικόνα 27: Ανάδειξη χονδροειδών σφαλμάτων και χρωματική απόδοση υψομετρικών διαφορών νότιου τμήματος περιοχής μελέτης σύμφωνα με τα στατιστικά μεγέθη μετά την αφαίρεση των χονδροειδών σφαλμάτων	74
Εικόνα 28: Αυθαίρετη αρίθμηση κλάδων παραχθέντος υδρογραφικού δικτύου	76
Εικόνα 29: Απόσπασμα χάρτη Γ.Υ.Σ. με ψηφιοποιημένο το ρέμα Αγ. Αικατερίνη	77
Εικόνα 30: Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του Σαρανταπόταμου (Παπαγεωργάκη, 2012) και όρια περιοχής μελέτης της παρούσας εργασίας	78
Εικόνα 31: Παραχθέν υδρογραφικό δίκτυο και δίκτυο αναφοράς Α	79
Εικόνα 32: Παραχθέν υδρογραφικό δίκτυο και δίκτυο αναφοράς Β	82
Εικόνα 33: Απεικόνιση του παραχθέντος υδρογραφικού δικτύου με υπόβαθρο ορθοφωτογραφία της περιοχής μελέτης	84

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το ευρύτερο πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται η παρούσα διπλωματική εργασία, το αντικείμενό της και ο στόχος, οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν καθώς και ο τρόπος με τον οποίο δομείται.

Ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει η Φωτογραμμετρία είναι η εξαγωγή τρισδιάστατων πραγματικών συντεταγμένων μέσω φωτογραφιών. Αναγκαία συνθήκη για αυτό είναι η ύπαρξη τουλάχιστον δύο φωτογραφιών που να απεικονίζουν την ίδια σκηνή και οι οποίες να έχουν ληφθεί από διαφορετικά σημεία. Οι φωτογραμμετρικές διαδικασίες που μεσολαβούν για την απόκτηση των πραγματικών συντεταγμένων μίας απεικονιζόμενης σκηνής είναι εν συντομία η αποκατάσταση των φωτογραμμετρικών προσανατολισμών και η επίλυση εμπροσθοτομίας στο χώρο. Αυτή η διαδικασία αφορά στις παθητικές μεθόδους συλλογής 3D πληροφορίας οι οποίες βασίζονται κατά αποκλειστικότητα σε εικόνες. Εκτός από αυτές όμως υπάρχουν και οι ενεργητικές μέθοδοι, όπως οι σαρωτές laser και τα συστήματα lidar.

Με την πάροδο των χρόνων γίνονται ολοένα και περισσότερα βήματα για την αυτοματοποίηση των φωτογραμμετρικών διαδικασιών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού αποτελεί η αυτόματη διαδικασία ψηφιακής συνταύτισης μέσω της οποίας υπολογίζονται ομολογίες μεταξύ δύο η περισσότερων επικαλυπτόμενων εικόνων. Η ανάπτυξη των αλγορίθμων συνταύτισης εικόνων είναι αποτέλεσμα της έρευνας δύο επιστημονικών πεδίων: της Φωτογραμμετρίας και της Όρασης υπολογιστών. Η μέθοδος αυτή αποτελεί σήμερα έναν από τους βασικότερους τρόπους συλλογής τρισδιάστατης πληροφορίας λόγω της ευχρηστίας και του οικονομικού πλεονεκτήματος που παρουσιάζει. Ακόμη η ψηφιακή συνταύτιση μπορεί να αποτελέσει εργαλείο για την αποκατάσταση των προσανατολισμών αλλά και για τη διεξαγωγή αεροτριγωνισμού μέσω της εύρεσης σημείων σύνδεσης στις εικόνες.

Συνοπτικά, η λογική εξαγωγής των υψομέτρων στην περίπτωση των αεροφωτογραφιών μέσω της ψηφιακής συνταύτισης είναι η εξής : με δεδομένα τα ζεύγη ομόλογων σημείων ενός στερεοζεύγους είναι δυνατός ο υπολογισμός της παράλλαξης- x βάσει της οποίας υπολογίζεται η απόσταση από το σημείο λήψης. Έτσι λοιπόν, είναι δυνατό από ζεύγη επικαλυπτόμενων εικόνων να συλλεχθούν δεδομένα για τη δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων Επιφανείας (DSM) και Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (DTM).

Γενικά το αποτέλεσμα μίας διαδικασίας συνταύτισης είναι ένα νέφος σημείων που αντιπροσωπεύουν τη σκηνή που απεικονίζεται στις φωτογραφίες. Περαιτέρω επεξεργασία αυτών των νεφών μπορεί να οδηγήσει στον διαχωρισμό κτιρίων, βλάστησης και εδάφους όταν πρόκειται για αεροφωτογράφιση. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η δυνατότητα συλλογής σημείων εδάφους αφού αποτελεί πλέον ανταγωνιστική μέθοδο παραγωγής ΨΜΕ καθώς παρέχει αποτελέσματα συγγενούς ακρίβειας με αυτή των συστημάτων LiDAR αλλά με χαμηλότερο κόστος.

Μία βασική εφαρμογή ενός μοντέλου εδάφους είναι η εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου μίας περιοχής. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για υδρολογική μελέτη, τεχνικά έργα, για πολεοδομικές μελέτες, για περιβαλλοντικές μελέτες κ.α.

Στην εργασία αυτή το ΨΜΕ χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου της Μαγούλας, μίας περιοχής στη Δυτική Αττική. Η ευρύτερη περιοχή του Θριασίου πεδίου έχει πληγεί στο παρελθόν αρκετές φορές από έντονα πλημμυρικά γεγονότα, τα οποία έχουν οδηγήσει σε ορισμένες περιπτώσεις και σε ανθρώπινες απώλειες (Ζαρκαδούλας , 2014). Οι πιο πρόσφατες καταστροφές είναι αυτή του Ιουνίου 2018 και του Νοεμβρίου 2017 κατά την οποία έχασαν τη ζωή τους 23 άνθρωποι. Η ανεπάρκεια των αντιπλημμυρικών έργων σε συνδυασμό με μεγάλα ύψη βροχής αλλά και την αυθαίρετη δόμηση οδηγούν στις καταστροφικές αυτές συνέπειες.

1.1 Αντικείμενο και στόχος εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η δημιουργία ενός Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους μίας περιοχής στη Μαγούλα μέσω του οποίου γίνεται η εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου. Αφορμή αποτέλεσε η καταστροφική πλημμύρα στη Μάνδρα τον Νοέμβριο του 2017 και το ενδιαφέρον για την διερεύνηση και αξιολόγηση μίας αυτόματης μεθόδου απεικόνισης του υφιστάμενου υδρογραφικού δικτύου. Τέτοια καταστροφικά γεγονότα απαιτούν άμεσες λύσεις οι οποίες πρέπει να βασίζονται σε δοκιμασμένες μεθόδους και εργαλεία. Να διευκρινιστεί ότι στόχος της εργασίας αυτής δεν είναι η μελέτη του γεγονότος της πλημμύρας, αλλά η μελέτη και διερεύνηση των δυνατοτήτων μίας μεθοδολογίας μέσω της οποίας μπορεί εύκολα να επιτευχθεί το αρχικό βήμα για περαιτέρω υδρολογική μελέτη, δηλαδή η χαρτογραφική απόδοση του υφιστάμενου υδρογραφικού δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, στόχος της εργασίας είναι η μελέτη και διερεύνηση των δυνατοτήτων τόσο της παραγωγής ΨΜΕ μέσω συνταύτισης εικόνων όσο και της αυτόματης εξαγωγής υδρογραφικού δικτύου μέσω αυτού του ΨΜΕ.

1.2 Δομή της εργασίας

Στο σημείο αυτό, για την συνολική κατανόηση της εργασίας, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν συνοπτικά τα κεφάλαια και ο ρόλος τους.

Στο κεφάλαιο αυτό, δηλαδή το πρώτο (1^ο), γίνεται μία εισαγωγή στο ευρύτερο πλαίσιο που εντάσσεται η εργασία, αναφέρεται το αντικείμενο με το οποίο ασχολείται καθώς και ο στόχος της και τέλος παρουσιάζεται η δομή της. Παρέχεται επίσης ένα σχεδιάγραμμα των βημάτων που ακολουθήθηκαν σε πρακτικό επίπεδο για την ολοκλήρωσή της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο (2^ο) εισάγονται οι έννοιες των Ψηφιακών Μοντέλων Επιφανείας και των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους, περιγράφονται οι μορφές δημιουργίας τους καθώς και οι τρόποι συλλογής υψομετρικών δεδομένων για την παραγωγή τους. Αναφέρονται επίσης οι πιθανές χρήσεις τους σε διάφορες εφαρμογές. Έπειτα αναφέρονται κάποια βασικά στοιχεία των υδρογραφικών δικτύων και περιγράφεται η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την αυτόματη εξαγωγή τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο (3^ο) αναλύονται κάποιες βασικές φωτογραμμετρικές έννοιες που είναι απαραίτητες για την κατανόηση της διαδικασίας δημιουργίας ΨΜΕ. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά περιγράφεται το γεωμετρικό μοντέλο μέσω του οποίου προσεγγίζεται η λήψη φωτογραφιών. Ιδιαίτερη βαρύτητα έχει η κατανόηση της επιπολικής γεωμετρίας μεταξύ δύο επικαλυπτόμενων εικόνων η οποία εξηγείται σε αυτό το κεφάλαιο και χρησιμοποιείται για την επιπολική επανασύσταση, η οποία περιγράφεται αμέσως μετά. Το κεφάλαιο κλείνει με την περιγραφή της ψηφιακής συνταύτισης και ειδικά του ημι-καθολικού αλγορίθμου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο (4^ο) εμπεριέχονται όλα τα πρακτικά στάδια για την δημιουργία του μοντέλου εδάφους και την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου μαζί με εικόνες και επεξηγήσεις των διάφορων επιλογών που έγιναν. Γίνεται αναφορά επίσης σε τυχόν δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο (5^ο) γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μέσω σύγκρισης των παραχθέντων με δεδομένα αναφοράς και παράλληλα αιτιολογούνται τα σφάλματα που προέκυψαν.

Στο έκτο κεφάλαιο (6^ο) με γνώμονα τα ευρήματα της αξιολόγησης παρουσιάζονται αναλυτικά κάποια συμπεράσματα σχετικά με τις διαδικασίες και τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν και τέλος, βάσει αυτών, προτείνονται τροποποιήσεις για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται ένα σχεδιάγραμμα των διαδικασιών που έγιναν :



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα ροής διαδικασιών για την παραγωγή ΨΜΕ και εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου

Κεφάλαιο 2^ο: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους και υδρογραφικό δίκτυο

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία παρουσίαση των τρόπων με τους οποίους η φυσική γήινη επιφάνεια αναπαρίσταται τόσο σε αναλογικά μέσα όσο και σε ψηφιακά. Επίσης, περιγράφονται οι μέθοδοι με τις οποίες μπορούν να συλλεχθούν υψομετρικές πληροφορίες και αναδεικνύεται η χρησιμότητα αυτής της αναπαράστασης και οι εφαρμογές της σε διάφορες επιστήμες. Τέλος, παρουσιάζονται κάποια βασικά στοιχεία για τα υδρογραφικά δίκτυα, καθώς και η μεθοδολογία σύμφωνα με την οποία μπορούν να εξαχθούν αυτόματα για μία περιοχή από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

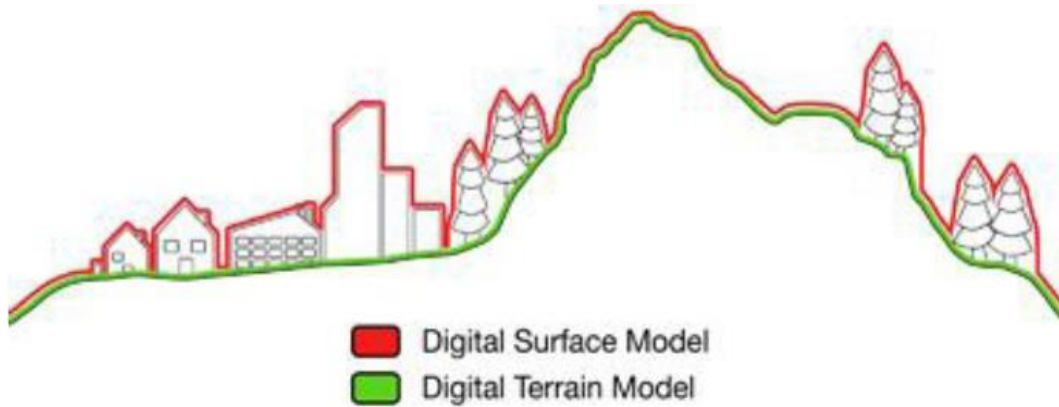
2.1 Αναπαράσταση του εδάφους

Η τοπογραφία της φυσικής γήινης επιφάνειας είναι αρκετά σύνθετη και ως εκ τούτου δύσκολο να αναπαρασταθεί αντικατοπτρίζοντας την πραγματική της μορφή χωρίς καμία διαστρέβλωση. Αυτή η δυσκολία πηγάζει από το γεγονός ότι το έδαφος είναι μία συνεχής επιφάνεια ενώ τα δεδομένα βάσει των οποίων καλείται να πραγματοποιηθεί η αναπαράσταση του, είναι διακριτά, κι αυτό γιατί δεν είναι δυνατό να γνωρίζουμε το ύψος κάθε σημείου της επιφάνειας του εδάφους παρά μόνο σε αυτά που έχουν μετρηθεί.

Η κλασική τοπογραφική μέθοδος αναπαράστασης του ανάγλυφου μίας περιοχής είναι η σχεδίαση των ισοϋψών καμπυλών. Οι καμπύλες αυτές αποτελούν μία νοητή γραμμή του εδάφους της οποίας όλα τα σημεία έχουν το ίδιο υψόμετρο. Η μεταβολή του υψομέτρου από τη μία καμπύλη στην άλλη ονομάζεται ισοδιάσταση. Η μέθοδος αυτή κυριαρχεί στα αναλογικά τοπογραφικά διαγράμματα, παρ' όλα αυτά στα περισσότερα σύγχρονα λογισμικά υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής ισοϋψών καμπυλών από υψομετρικά σημεία. Γενικά, οι ισοϋψείς είναι ακατάλληλες για αυτοματοποιημένη επεξεργασία.

Στη σύγχρονη εποχή, όπου η ανάπτυξη των ψηφιακών μέσων καλπάζει, ο πιο συνηθισμένος τρόπος περιγραφής της υψομετρικής πληροφορίας μίας περιοχής είναι τα Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (Digital Terrain Model - DTM). Στο εξής θα αναφέρονται για συντομία και ΨΜΕ. Τα μοντέλα αυτά, όποια δομή και να ακολουθούν από αυτές που θα αναφερθούν παρακάτω, δημιουργούνται βάσει πεπερασμένων αριθμών σημείων.

Πολλές φορές προκαλείται σύγχυση μεταξύ των ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DTM), των ψηφιακών μοντέλων ανάγλυφου (DEM) και των ψηφιακών μοντέλων επιφανείας (DSM). Τα πρώτα είναι τα μοντέλα εκείνα που αναπαριστούν την γυμνή επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή το έδαφος χωρίς τα κτίρια και χωρίς τα βλάστηση. Αντίθετα, τα Ψηφιακά Μοντέλα Επιφανείας (Digital Surface Model – DSM) αναπαριστούν τη γήινη επιφάνεια μαζί με ό,τι αυτή περιλαμβάνει. Τα ψηφιακά μοντέλα ανάγλυφου (Digital Elevation Model) αφορούν στα υψόμετρα οποιασδήποτε επιφανείας και θα μπορούσε να πει κανείς ότι αποτελούν μία ευρεία κατηγορία, παρακλάδια της οποίας είναι τα DTM και τα DSM. Συχνά στη βιβλιογραφία τα DEM ταυτίζονται με τα DTM. Στην εικόνα που ακολουθεί δίνεται μία γραφική επεξήγηση της διαφοράς των DSM και DTM.



Εικόνα 1: Διαφορά ψηφιακού μοντέλου επιφανείας (DSM) και ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DTM)

Αναφέρεται συχνά στη βιβλιογραφία ότι ένα ΨΜΕ αποτελεί μία 2.5 D αναπαράσταση του εδάφους. Ουσιαστικά αυτό σημαίνει ότι σε κάθε σημείο (X, Y) αντιστοιχεί μόνο μία τιμή υψομέτρου Z.

2.2 Παγκόσμια ψηφιακά μοντέλα εδάφους

Λόγω της ευκολίας στη διαχείριση αλλά και της ευρείας χρήσης των ΨΜΕ, υπάρχουν στο διαδίκτυο διαθέσιμα ανοιχτά δεδομένα σε παγκόσμιο επίπεδο. Τα πιο σημαντικά είναι αυτά του δέκτη ASTER και της αποστολής SRTM τα οποία περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

2.2.1 Μοντέλα ASTER

Ο δέκτης ASTER δημιουργήθηκε σε συνεργασία της NASA και του Ιαπωνικού Υπουργείου οικονομίας, εμπορίου και βιομηχανίας (METI). Αποτελεί έναν εκ των πέντε αισθητήρων που βρίσκονται στη διαστημική πλατφόρμα Terra. Τα δεδομένα του δέκτη παρέχουν εικόνες ανάλυσης από 15m ως 90m, σε 14 διαφορετικά μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, από το ορατό μέχρι το θερμικό υπέρυθρο. Οι εικόνες αυτές παρέχουν τη δυνατότητα στερεοσκοπικής όρασης για τη δημιουργία μοντέλων εδάφους.

Το πρώτο παγκόσμιο DEM από εικόνες ASTER, οι οποίες είχαν συλλεχθεί από το 2000 ως το 2008, εκδόθηκε το 2009. Είχε προκύψει από περισσότερες από 1.2 εκατομμύρια εικόνες, ανάλυσης 15m, μέσω φωτογραμμετρικών τεχνικών. Το παραγόμενο μοντέλο είχε ανάλυση περίπου 30m. Ως σύστημα αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το WGS84 και τα υψόμετρα αναφέρονταν στο μοντέλο γεωειδούς EGM96. Για τον ελλαδικό χώρο έχει εκτιμηθεί ότι η κατακόρυφη ακρίβειά του κυμαίνεται από 16m ως 32m (Λαμπράκης, et al., 2015). Μία βελτιωμένη έκδοση αυτού προέκυψε το 2011. Η βελτίωση αυτή πηγάζει από την καλύτερη οριζοντιογραφική ανάλυση, την βελτιωμένη ανίχνευση των ορίων των υδάτινων μαζών, το μικρότερο παράθυρο συσχέτισης (της τάξης των 5x5 εικονοστοιχείων), η παράλληλη προσαρμογή των υψομέτρων και τέλος οι νέες 260.000 δορυφορικές εικόνες από το 2008 και μετά. Το GDEM που δημιουργήθηκε κάλυπτε περισσότερες περιοχές σε σχέση με αυτό της αποστολής SRTM (Μαριού, 2013).

2.2.2 Μοντέλα SRTM

Η αποστολή SRTM πραγματοποιήθηκε τον Φεβρουάριο του 2000 και έγινε με συνεργασία της NASA, του National Geospatial-Intelligence Agency και της Γερμανικής και Ιταλικής διαστημικής υπηρεσίας. Και αυτή η αποστολή προμήθευσε τα παγκόσμια χωρικά δεδομένα με ένα παγκόσμιο ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM SRTM), το οποίο καλύπτει περισσότερο από το 80% της γήινης επιφάνειας μεταξύ των 60° γεωγραφικού πλάτους βόρεια ως των 56° νότια. Τα δεδομένα για το DEM SRTM βασίζονται στην τεχνολογία της συμβολομετρίας συνθετικού ανοίγματος (InSAR) και η ανάλυσή τους για την περισσότερη έκταση ήταν 90m ενώ για τις Η.Π.Α. ήταν μεγαλύτερη, περίπου στα 30m.

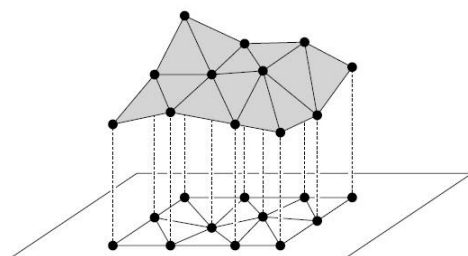
Στο διαστημικό λεωφορείο της αποστολής υπήρχαν δύο κεραίες εκ των οποίων η μία λειτουργούσε στην C-band με μήκος κύματος 6.5cm και η άλλη στην X-band με μήκος κύματος 3.1cm. Συνεχόμενη χαρτογραφική κάλυψη πραγματοποιούσε το C-RADAR ενώ στόχος του X-RADAR ήταν η απόκτηση δεδομένων κατά μήκος λωρίδων πλάτους 50km, οι οποίες προσέφεραν συνεχή κάλυψη στα υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη. Το X-RADAR προσέφερε καλύτερο λόγο του σήματος προς τον θόρυβο και επίσης παρείχε υψηλότερη ανάλυση δεδομένων. Επίσης, είχε τη δυνατότητα να λειτουργεί ανεξάρτητα ώστε να καλύπτει τυχόν προβλήματα που προκύπταν από το C-RADAR. Τα δεδομένα από το X-RADAR χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του χάρτη ανάλυσης των 30m, ενώ τα δεδομένα από το C-RADAR δημιούργησαν το DEM χαμηλότερης ανάλυσης που κάλυπτε όλη την γήινη επιφάνεια (Μαριού, 2013). Για την επικράτεια της Ελλάδας έχει υπολογιστεί ότι η ακρίβεια του ως προς τα υψόμετρα κυμαίνεται μεταξύ 30m και 40m (Λαμπράκης, et al., 2015).

2.3 Δομή ψηφιακών μοντέλων εδάφους

Για την δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους είναι προαπαιτούμενη η ύπαρξη υψομετρικών δεδομένων, τα οποία συνήθως έχουν τη μορφή σημειακών οντοτήτων. Ο τρόπος με τον οποίο δομούνται αυτά τα δεδομένα οδηγούν στον διαχωρισμό των δύο βασικών ειδών ΨΜΕ, τα οποία είναι μορφής TIN (Triangular Irregular Network) και κανάβου (grid).

2.3.1 ΨΜΕ σε δομή TIN

Αυτή η μορφή ψηφιακού μοντέλου εδάφους αναπαριστά την επιφάνεια του εδάφους ως ένα σύνολο γειτονικών τριγώνων με άνισες πλευρές. Για την πλήρη κατανόηση αυτής της μορφής έχει νόημα να αναφερθεί περιληπτικά η διαδικασία δημιουργίας των TIN. Το πιο σύνηθες μαθηματικό υπόβαθρο που χρησιμοποιείται είναι ο 2D τριγωνισμός Delaunay για μοντέλα 2.5D – ο οποίος και περιγράφεται στη



Εικόνα 2: Τριγωνισμός Delaunay.

συνέχεια- ή μία πιο περίπλοκη μέθοδος τριγωνισμού Delaunay για 3D μοντέλα. Με δεδομένο ένα πεπερασμένο σύνολο σημείων, τα οποία αποτελούν τα υψομετρικά δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για την απόδοση του ανάγλυφου, γίνεται τριγωνισμός. Με τον όρο τριγωνισμός εννοείται μία επίπεδη υποδιαίρεση της

οριζοντιογραφικής επιφάνειας που καλύπτουν τα σημεία, στην οποία τα επιμέρους κομμάτια είναι τρίγωνα με κορυφές τα δεδομένα σημεία. Στη συνέχεια, κάθε σημείο ανυψώνεται στο σωστό του ύψος. Το αποτέλεσμα είναι ένα πολυεδρικό ανάγλυφο που χρησιμοποιείται ως προσέγγιση του πραγματικού ανάγλυφου.

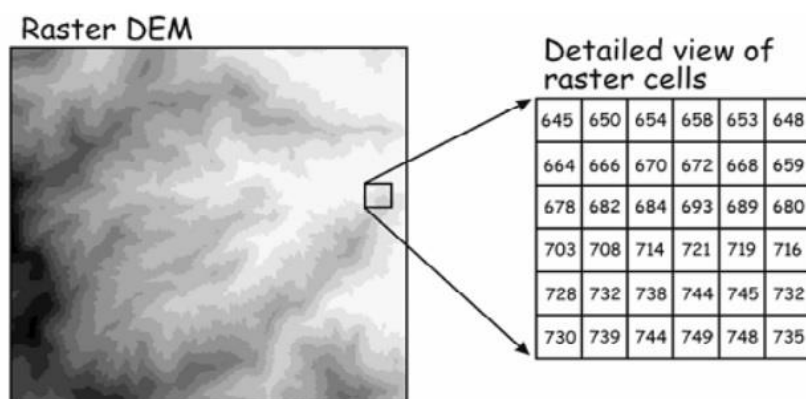
Ως δεδομένα εισόδου, μία διαδικασία δημιουργίας ακανόνιστων τριγωνικών δικτύων – ελληνική μετάφραση των TIN – δέχεται κανονικά και μη κανονικά κατανεμημένα σημεία γνωστών υψομέτρων, τα οποία μετά την ολοκλήρωση της παραμένουν στην ίδια θέση ως κόμβοι. Με τον τρόπο αυτό, ένα TIN διατηρεί την ακρίβεια των αρχικών δεδομένων και κατά την παραγωγή του δεν χρησιμοποιείται η μέθοδος της παρεμβολής. Αυτή η δομή δεδομένων έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να προσαρμοστεί πλήρως στο ανάγλυφο του εδάφους μέσω της διαφοροποίησης του μεγέθους των τριγώνων που δημιουργούνται. Πιο αναλυτικά, ένα TIN είναι πιθανό να παρουσιάζει μεγαλύτερη πυκνότητα τριγώνων σε ορισμένες περιοχές που λόγω έντονης μεταβολής των υψομέτρων έχουν συλλεχθεί και περισσότερα δεδομένα. Αντίθετα, ενδέχεται να παρουσιάζει χαμηλότερη πυκνότητα σε περιοχές ήπιου ανάγλυφου και αυτό γιατί τα δεδομένα εισόδου θα είναι πιο αραιά στις περιπτώσεις αυτές. Ως εκ τούτου κρίνεται καθοριστικός παράγοντας για την ακρίβεια ενός TIN η προσεκτική συλλογή δεδομένων. Παραδείγματος χάρη, σε μεταβολές του εδάφους, όπως τοπικές εξάρσεις ή μισγάγγειες, είναι σημαντικό να μετριέται πληθώρα σημείων ώστε τα φαινόμενα αυτά να αποδοθούν αξιόπιστα στο μοντέλο του εδάφους (Τσούλος, και συν., 2015) (Λαμπράκης, και συν., 2015).

2.3.2 ΨΜΕ σε δομή κανάβου

Ένα μοντέλο εδάφους του οποίου τα δεδομένα έχουν δομηθεί σε μορφή κανάβου παρουσιάζει την ίδια δομή αρχείου με την ψηφιακή εικόνα. Αναλυτικότερα, όπως μία ψηφιακή εικόνα ορίζεται από ένα πλέγμα γραμμών και στηλών με φατνία συγκεκριμένου μεγέθους στα οποία αποθηκεύεται η τιμή φωτεινότητας, έτσι και στα μοντέλα εδάφους στα αντίστοιχα φατνία αποθηκεύεται μία τιμή υψομέτρου. Τα μοντέλα αυτής της δομής αποτελούν τον πιο απλό τρόπο αναπαράστασης υψομετρικών δεδομένων και η επεξεργασία τους απαιτεί λιγότερη υπολογιστική ισχύς.

Λόγω αυτής της κανονικότητας που χαρακτηρίζει έναν κανάβο, τα raster DEM μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα για την παραγωγή χαρτών κλίσεων και για την ορθοαναγωγή εικόνων (Λαμπράκης, και συν., 2015). Εξαιτίας όμως πάλι της κανονικότητας παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα που αφορούν στην ακρίβεια απόδοσης του ανάγλυφου. Επεξηγηματικά, τα δεδομένα εισόδου υφίστανται παρεμβολή προκειμένου να προσδιοριστούν τα υψόμετρα σε περιοχές που δεν υπάρχουν δεδομένα. Επιπρόσθετα, λόγω του καθορισμένου βήματος του κανάβου, είναι πιθανό, φαινόμενα του εδάφους που λαμβάνουν χώρα εντός μικρότερης απόστασης από το βήμα να αδυνατούν να απεικονιστούν, με αποτέλεσμα να χάνεται σημαντική πληροφορία από το τελικό ΨΜΕ. Με απλά λόγια θα μπορούσε να πει κανείς ότι κατά τη δημιουργία ενός κανονικοποιημένου μοντέλου εδάφους δίνεται ίση βαρύτητα στις περιοχές με μεταβολές ανάγλυφου και στις επίπεδες περιοχές, εν αντιθέσει με τα TIN. Μία δυνατότητα που δίνεται στο χρήστη και μπορεί να χρησιμοποιήσει ώστε να εξασφαλίσει πιο αξιόπιστη αναπαράσταση του εδάφους

είναι η προσεκτική επιλογή της ανάλυσης του κανάβου, δηλαδή του μεγέθους του φατνίου. Κατά την επιλογή του μεγέθους αυτού πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η κλίμακα απόδοσης και η πυκνότητα των δεδομένων, καθώς και το ίδιο το ανάγλυφο. Μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό ότι μία περιοχή με έντονες και απότομες εξάρσεις του εδάφους έχει ανάγκη για μικρότερο βήμα από ότι μία ήπια περιοχή, καθώς η πρώτη παρουσιάζει περισσότερες λεπτομέρειες που πρέπει να απεικονιστούν.



Εικόνα 3: Απεικόνιση ενός ΨΜΕ με δομή κανάβου και γραφική επεξήγηση της δομής του.

2.4 Τρόποι συλλογής υψομετρικών δεδομένων

Πέραν της σημασίας που έχει η μελέτη του τρόπου διάρθρωσης της υψομετρικής πληροφορίας στα δύο βασικά είδη ΨΜΕ που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, είναι σημαντικό να αναφερθούν και οι βασικοί τρόποι συλλογής των υψομετρικών δεδομένων. Γίνεται προσπάθεια η αναφορά να ξεκινήσει από τους παλαιότερους και να καταλήξει στους πιο σύγχρονους.

2.4.1 Τοπογραφικοί χάρτες

Η πιο κλασική μέθοδος αναπαράστασης της μορφολογίας του εδάφους είναι η χάραξη ισοϋψών καμπυλών σε τοπογραφικά διαγράμματα. Επειδή υπάρχει πληθώρα διαθέσιμων τοπογραφικών σχεδίων, η ψηφιοποίηση των ισοϋψών αποτελεί έναν συνηθισμένο τρόπο απόκτησης υψομετρικών δεδομένων για την παραγωγή ενός ΨΜΕ. Εκτός της μεγάλης διαθεσιμότητας σε χάρτες, η διαδικασία της ψηφιοποίησης προτιμάται πολλές φορές γιατί αποτελεί μία οικονομική μέθοδο.

Εκτός από τα παραπάνω πλεονεκτήματα όμως, η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Αρχικά, στην περίπτωση αναλογικών χαρτών, για την ψηφιοποίηση είναι προαπαιτούμενη η σάρωση των χαρτών, διαδικασία που εισάγει από μόνη της σφάλματα στα δεδομένα. Έπειτα, η διαδικασία της ψηφιοποίησης απαιτεί μία εξοικείωση του χρήστη καθώς συμβάλλει στην αξιοπιστία του αποτελέσματος σε σημαντικό βαθμό. Ένα χονδροειδές σφάλμα στο στάδιο αυτό οδηγεί σε απόδοση λανθασμένων υψομέτρων για κάποιο κομμάτι της περιοχής μελέτης. Οι ισοϋψείς καμπύλες συχνά παρουσιάζουν ασυνέχειες ή και σύμπτωση μεταξύ τους, προσθέτοντας έτσι ακόμα έναν παράγοντα ανακρίβειας. Συνήθως τα ψηφιακά μοντέλα που προκύπτουν από αυτές είναι μικρής ή μεσαίας κλίμακας.

2.4.2 Τοπογραφικές μετρήσεις

Οι μετρήσεις υπαίθρου με τοπογραφικές μεθόδους αποτελούν έναν από τους πιο αξιόπιστους τρόπους συλλογής σημείων με γνωστά υψόμετρα λόγω της υψηλής ακρίβειας που τις διακρίνει. Μπορούν να γίνουν είτε με GPS (Global Positioning System) είτε με total station ενώ η επιλογή των σημείων προς μέτρηση προσαρμόζεται στη μορφή του εδάφους, αφού υπάρχει άμεση ανθρώπινη επαφή με αυτό. Οι τοπογραφικές μετρήσεις αν και πολύ ακριβείς δεν είναι πάντα εύχρηστες αφενός λόγω υψηλού κόστους και αφετέρου λόγω του μεγάλου χρόνου που απαιτούν. Χρησιμοποιούνται για την παραγωγή DEM υψηλής ακρίβειας και μεγάλης κλίμακας, καθώς συνήθως χρησιμοποιούνται για μικρές περιοχές, αφού η κάλυψη μεγάλων απαιτεί και πολύ μεγάλο χρόνο.

2.4.3 Φωτογραμμετρικές μέθοδοι

Η παραγωγή ενός ΨΜΕ μπορεί να γίνει και με φωτογραμμετρικές μεθόδους είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα. Χειροκίνητα ή ημιαυτόματα με στερεοσκοπική παρατήρηση και απόδοση και αυτόματα μέσω της πυκνής συνταύτισης εικόνων.

Χρησιμοποιώντας φωτογραμμετρικούς σταθμούς, μέσω της στερεοσκοπικής όρασης, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να συλλέξει σημεία του εδάφους από επικαλυπτόμενα ζεύγη εικόνων βάσει των οποίων μπορεί να δημιουργηθεί ένα μοντέλο εδάφους. Η λειτουργία των σταθμών αυτών βασίζεται στην συνεχή επίλυση της εμπροσθοτομίας στο χώρο προκειμένου να προσδιοριστούν οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων που σκοπεύονται. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας είναι μεσαίας ή υψηλής ακρίβειας και αφορούν κυρίως σε τεχνικά έργα μεγάλης κλίμακας και σε εθνικές συλλογές δεδομένων (π.χ. ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.) (Μαριού, 2013). Σημαντικό ρόλο για την ποιότητα αυτών των δεδομένων παίζει η αρχική ανάλυση των εικόνων καθώς και η διαδικασία σκόπευσης σημείων από τον χρήστη.

Η πυκνή συνταύτιση εικόνων, η οποία περιγράφεται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 3, πρόκειται ουσιαστικά για την αυτόματη αποκατάσταση ομολογιών μεταξύ ενός στερεοζεύγους. Σαν αποτέλεσμα έχει την εξαγωγή τρισδιάστατης πληροφορίας οπότε και χρησιμοποιείται σαν μέθοδος συλλογής υψομετρικών δεδομένων. Μάλιστα αποτελεί και τη μέθοδο που ακολουθήθηκε σε αυτή την εργασία.

2.4.4 LIDAR

Η ονομασία αυτής της τεχνολογίας προέρχεται από το Light Detection And Ranging και συχνά αναφέρεται ως Radar Laser. Αρχικά να αναφερθεί ότι υπάρχουν δύο είδη συστημάτων LiDAR: τα επίγεια και τα εναέρια (Μαριού, 2013). Τα δεύτερα δημιουργήθηκαν κυρίως για να συλλέγουν υψομετρικά δεδομένα και μέχρι την εμφάνισή τους δεν ήταν δυνατό να αποκτηθούν τόσο πυκνά και ακριβή δεδομένα.

Η λειτουργία των συστημάτων LiDAR στηρίζεται στον υπολογισμό του χρόνου που χρειάζεται ώστε ένας παλμός laser να "πέσει πάνω" στο εκάστοτε αντικείμενο και να επιστρέψει πίσω στον σαρωτή. Η απόσταση στη συνέχεια υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ταχύτητα του φωτός, δηλαδή μετριέται ο χρόνος ως ένα ενδιάμεσο βήμα για τον υπολογισμό της απόστασης. Κατά τη διαδικασία σάρωσης

μίας περιοχής τοποθετούνται μαζί με τον δέκτη και συστήματα GPS και IMU ώστε κάθε στιγμή να είναι γνωστή η θέση του αερομεταφορέα.

Είναι σημαντικό, για την κατανόηση της λειτουργίας αυτής της τεχνολογίας, να αναφερθεί ότι ένας παλμός έχει πολλαπλές επιστροφές. Η καταγραφή του πρώτου παλμού έχει να κάνει με την αποτύπωση των ψηλότερων αντικειμένων, όπως π.χ. βλάστηση ή κτίρια, ενώ η καταγραφή του τελευταίου παλμού έχει να κάνει με την αποτύπωση του εδάφους. Αντίθετα με άλλες πιο συμβατικές μεθόδους, η απόκτηση υψομετρικών δεδομένων με LiDAR, χάρη σε αυτήν της την ιδιότητα, έχει την ικανότητα να συλλέγει σημεία του εδάφους ακόμα και όταν η βλάστηση είναι πυκνή.

Το αποτέλεσμα μίας σάρωσης με LiDAR είναι ένα πυκνό νέφος σημείων (Point Cloud), του οποίου τα σημεία συνήθως έχουν απόσταση μεταξύ τους μικρότερη από 0.5m. Η οριζοντιογραφική ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί είναι από 0.15m ως 1m ενώ για τα υψόμετρα είναι από 0.10m ως 0.15m. Η παραγωγή ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους απαιτεί και την επεξεργασία του παραγόμενου νέφους σημείων, δηλαδή την ταξινόμηση των σημείων και το φιλτράρισμα των DSM, αφού τα τελευταία είναι αυτά που δημιουργούνται πρώτα. Ένας παράγοντας που μπορεί να έχει αρνητική επίδραση κατά τη συλλογή δεδομένων με LiDAR είναι η σκόνη στην ατμόσφαιρα και η υγρασία.

2.4.5 Δεδομένα INSAR

Η λέξη InSAR προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Interferometric Synthetic Aperture Radar, δηλαδή συμβολομετρία radar συνθετικού ανοίγματος. Τα συστήματα αυτά αποτελούν μία προέκταση των συστημάτων SAR, οπότε κρίνεται σκόπιμο να γίνει πρώτα μία αναφορά σε αυτά.

Και αυτά τα συστήματα, όπως τα LiDAR, αποτελούν ενεργητικούς δέκτες απεικόνισης, με την έννοια ότι και αυτά εκπέμπουν ακτινοβολία και λαμβάνουν την επιστροφή της. Τα SAR καταγράφουν για κάθε σημείο το πλάτος, τη φάση και τη συχνότητα των σημάτων που επιστρέφουν, αφού έχουν ανακλαστεί στις διάφορες επιφάνειες. Τα συστήματα αυτά τοποθετούνται σε ένα αεροσκάφος ή σε δορυφόρο, στο οποίο βρίσκεται μία πλατφόρμα με μικρή κεραία radar η οποία ουσιαστικά κινείται κατά τη διεύθυνση της πτήσης ή αζιμούθιου και σαρώνει το έδαφος πλευρικά της πλατφόρμας. Η τελική ανάλυση επιτυγχάνεται με τη χρήση τεχνικών επεξεργασίας σημάτων για τη δημιουργία μίας «συνθετικής κεραίας», με αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας πολύ καλύτερης διακριτικής ικανότητας κατά τη διεύθυνση πτήσης. Η κίνηση της πλατφόρμας είναι αυτή που δίνει τη δυνατότητα σχηματισμού της «συνθετικής κεραίας» της οποίας το μήκος μπορεί να είναι τόσο όσο απαιτείται για να επιτευχθεί η επιθυμητή ανάλυση. Η διακριτική ικανότητα κατά μήκος της διεύθυνσης πτήσης σχετίζεται με το άνοιγμα της κεραίας σε αυτή τη διεύθυνση, ενώ καθορίζει και το εύρος δέσμης (beamwidth) που εκπέμπεται από το radar. Αντίστοιχα, η διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση των αποστάσεων παραπλεύρως της πλατφόρμας, εξαρτάται από το εύρος των συχνοτήτων (bandwidth) του παλμού (Μαριού, 2013).

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων SAR είναι ότι μπορούν να λειτουργήσουν όλο το 24ωρο και εν αντιθέσει με τα LiDAR δεν επηρεάζονται από τα σύννεφα και την ομίχλη (Μαριού, 2013).

2.5 Αξιολόγηση ψηφιακών μοντέλων εδάφους

Η χρήση των ψηφιακών μοντέλων εδάφους, όπως περιγράφεται εκτενέστερα και στην επόμενη ενότητα, μπορεί να αφορά σε μία απλή αναπαράσταση του εδάφους αλλά μπορεί και να σχετίζεται και με τη λήψη αποφάσεων για σημαντικά έργα. Είναι σημαντικό λοιπόν, μετά τη δημιουργία τους να γίνεται και μία αξιολόγηση της αξιοπιστίας τους.

Τα σφάλματα των ΨΜΕ σχετίζονται με την ακρίβεια και την πυκνότητα των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί, τη μορφολογία του εδάφους και τη μέθοδο παρεμβολής, αν χρησιμοποιήθηκε κάποια, για την παραγωγή τους (Μαριού, 2013). Όπως για τους ελέγχους όλων των μετρήσεων, έτσι για τα ΨΜΕ, γίνεται έλεγχος της ορθότητας και της ακρίβειας τους. Επειδή πολλές φορές οι όροι αυτοί συγχέονται είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να δοθεί ένας σύντομος ορισμός τους. Η ορθότητα έχει να κάνει με το πόσο πλησιάζει η εκτιμώμενη τιμή ενός μεγέθους, π.χ. ενός υψομέτρου στην προκειμένη περίπτωση, την αληθή τιμή αυτού. Η εκτιμώμενη τιμή συνήθως προκύπτει από μετρήσεις ή υπολογισμούς ενώ η αληθής τιμή συνήθως δεν είναι γνωστή. Η ακρίβεια έχει να κάνει με το πόσο οι μετρήσεις, δηλαδή οι εκτιμώμενες τιμές για ένα μέγεθος, συγκλίνουν μεταξύ τους. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος μέτρησης της ακρίβειας είναι η τυπική απόκλιση ή το τυπικό σφάλμα (Μαριού, 2013).

Η ακρίβεια και η πυκνότητα των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί για την παραγωγή ενός ΨΜΕ αφορούν ουσιαστικά στις ακρίβειες των μεθόδων που έχουν χρησιμοποιηθεί, οι οποίες μπορεί να είναι αυτές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Παραδείγματος χάρη, η σάρωση και ψηφιοποίηση αναλογικών χαρτών δεν αποτελεί μία πολύ ακριβής μέθοδο καθώς όπως προαναφέρθηκε εισάγονται σφάλματα από τις ίδιες τις μετρήσεις για τη δημιουργία του χάρτη αλλά και κατά τη διαδικασία σάρωσης και ψηφιοποίησης. Κατά τη συνταύτιση εικόνων μπορεί να δημιουργηθούν σοβαρά σφάλματα από λανθασμένη εύρεση ομολογιών για κάποια σημεία και επίσης η πυκνότητα των σημείων ελαττώνεται σε περιοχές με χαμηλή υφή (Karel, et al., 2006). Όλα αυτά, αλλά και ανάλογες δυσκολίες που προκύπτουν σε άλλες μεθόδους συλλογής δεδομένων, οδηγούν στη μείωση της ακρίβειας των δεδομένων για την παραγωγή ενός μοντέλου εδάφους.

Η ποιότητα των δεδομένων εισόδου μπορεί να αναλυθεί με βάση τρεις κεντρικούς άξονες: την κατανομή τους στην περιοχή μελέτης, την ακρίβειά τους και τη συνοχή. Με τον όρο κατανομή εννοείται η πυκνότητα, η πληρότητα και ο τύπος τους (Karel, και συν., 2006). Πιο αναλυτικά μελετάται τί ποσοστό της περιοχής καλύπτουν, πόσο κοντά είναι το ένα με το άλλο και τι είδους δεδομένα είναι (σημειακά, γραμμικά κ.τ.λ.). Ο όρος ακρίβεια αφορά αυτήν καθαυτή την ακρίβεια της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε και τέλος η συνοχή έχει να κάνει με την περίπτωση που ένα ΨΜΕ έχει δημιουργηθεί από διαφορετικά επικαλυπτόμενα σύνολα δεδομένων.

2.5.1 Έλεγχοι ποιότητας ΨΜΕ

Στην πράξη, η εκτίμηση της ποιότητας ενός ΨΜΕ μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Μία κατηγοριοποίηση αυτών θα μπορούσε να γίνει σύμφωνα με τα εργαλεία που αξιοποιεί καθένας από αυτούς: *οπτικοί*, γιατί χρησιμοποιούν την οπτική αντιπαράθεση του ΨΜΕ προς αξιολόγηση με ένα ΨΜΕ αναφοράς για να εξαχθούν συμπεράσματα και *στατιστικοί*, γιατί χρησιμοποιούνται στατιστικά εργαλεία (π.χ. μέσος όρος, τυπική απόκλιση κ.α.). Από τα παραπάνω προκύπτει ότι προαπαιτούμενα για την αξιολόγηση είναι κάποια δεδομένα αναφοράς. Αυτά συνήθως είναι είτε μεμονωμένα σημεία στην περιοχή ενδιαφέροντος μετρημένα με πολλή μεγάλη ακρίβεια είτε μοντέλα αναφοράς που και αυτά έχουν εξαχθεί με πιο ακριβείς μεθόδους. Τα μεμονωμένα σημεία είναι απαραίτητο να είναι κατανεμημένα σε όλη την έκταση της περιοχής και μπορεί να προέρχονται από τοπογραφικές μετρήσεις ή μετρήσεις με GPS. Όσον αφορά στα μοντέλα αναφοράς είναι σημαντικό να έχουν την ίδια ανάλυση με το μοντέλο προς σύγκριση, αλλιώς η σύγκρισή τους στερείται νοήματος.

Πρακτικοί έλεγχοι

- **Ισοϋψείς καμπύλες**

Ένας συχνός και εύκολος οπτικός έλεγχος είναι αυτός που προκύπτει από την σύγκριση ισοϋψών καμπυλών. Αναλυτικότερα, η πλειοψηφία των σύγχρονων λογισμικών πακέτων παρέχει τη δυνατότητα για εξαγωγή των ισοϋψών καμπυλών από ψηφιακά μοντέλα εδάφους. Έτσι, η οπτική παράθεση του συνόλου των ισοϋψών του ενός μοντέλου έναντι των ισοϋψών του άλλου είναι μία ευπρόσιτη μέθοδος που επιτρέπει την εξαγωγή μίας σειράς συμπερασμάτων. Τα συμπεράσματα αυτά αφορούν στην ικανοποιητική ή όχι προσαρμογή των καμπυλών, αλλά και στην ύπαρξη ή όχι εστιών χονδροειδών σφαλμάτων. Ας σημειωθεί ότι οι καμπύλες προς σύγκριση πρέπει να έχουν ίδια ισοδιάσταση.

- **Φωτοσκίαση**

Η φωτοσκίαση ανάγλυφου πρόκειται για μία πολύ παλιά μέθοδο απόδοσης της μορφής της φυσικής γήινης επιφάνειας που στην πρωταρχική της μορφή εφαρμόστηκε μέσω της γραφικής τεχνικής της γραμμοσκίασης. Βασίζεται στην προσπάθεια προσομοίωσης του οπτικού αποτελέσματος της επίδρασης ενός ιδεατού φωτισμού στην επιφάνεια ενός τρισδιάστατου αναλογικού μοντέλου του εδάφους της απεικονιζόμενης περιοχής. Αυτή η μέθοδος παρέχει μία άμεση και εύληπτη αντίληψη της επιφάνειας ακόμα και από μη ειδικούς. Τα τελευταία χρόνια έχει έρθει ξανά στο προσκήνιο λόγω των σύγχρονων ψηφιακών μέσων που παρέχουν αυτόματα την πραγματοποίησή της (Νάκος, 2011). Έτσι, η παρουσίαση του μοντέλου προς αξιολόγηση και ενός μοντέλου αναφοράς μέσω της μεθόδου αυτής μπορεί να οδηγήσει εύκολα και γρήγορα σε μία πρώτη εικόνα της ποιότητας του παραγόμενου μοντέλου εδάφους. Είναι εύκολο να συμπεράνει κανείς ότι δεν πρόκειται για έναν ακριβή τρόπο αξιολόγησης και συνήθως λειτουργεί συμπληρωματικά με άλλες μεθόδους.

- **Προσδιορισμός υδρολογικού μοντέλου**

Λόγω της μεγάλης εξάρτησης μεταξύ της μορφής του εδάφους και της επιφανειακής απορροής σε αυτό, σαν τρόπος εκτίμησης της ποιότητας ενός ΨΜΕ προτείνεται στη βιβλιογραφία η σύγκριση του δικτύου ρεμάτων που προκύπτει από το καθένα (Τσούλος, και συν., 2015). Όπως θα αναλυθεί εκτενώς στο 3ο κεφάλαιο, για την αυτόματη εξαγωγή των ρεμάτων μίας περιοχής αυτό που είναι απαραίτητο είναι ένα ψηφιακό μοντέλο του εδάφους με ψηφιδωτή δομή. Ας αναφερθεί ότι πέραν της οπτικής αξιολόγησης μεταξύ δύο υδρογραφικών δικτύων είναι δυνατή και η ποσοτική τους σύγκριση αν τα διανυσματικά στοιχεία μετατραπούν σε ψηφιδωτά (rasterize).

- **Άλλες μέθοδοι**

Καθότι η εκτίμηση της ποιότητας ενός ΨΜΕ αποτελεί ένα μέρος της παρούσης διπλωματικής και όχι ολόκληρη, κρίθηκε σκόπιμο να αναφερθούν κάποιες βασικές μέθοδοι για το σκοπό αυτό. Ο υπολογισμός και η οπτικοποίηση των κλίσεων δύο διαφορετικών ψηφιακών μοντέλων εδάφους μπορεί να δώσει σημαντικά στοιχεία για την μεταξύ τους ομοιότητα και κατ' επέκταση τη σύγκριση του μοντέλου ενδιαφέροντος. Ανάλογη εφαρμογή μπορεί να έχει και η οπτικοποίηση του προσανατολισμού του εδάφους. Στην ουσία υπολογίζεται προς ποια διεύθυνση του ορίζοντα «κοιτάει» το κεκλιμένο έδαφος (Μαριού, 2013). Ακόμα ένα μέσο που μπορεί να χρησιμεύσει για την σύγκριση δύο μοντέλων είναι οι υψομετρικές διατομές. Πρόκειται ουσιαστικά για τομές του ΨΜΕ με ένα κατακόρυφο επίπεδο. Η σύγκριση αυτών των τομών από ένα ΨΜΕ ενδιαφέροντος και ένα ΨΜΕ αναφοράς επιτρέπει την αξιολόγηση του πρώτου (Μαριού, 2013).

Στατιστικοί έλεγχοι

Οι έλεγχοι με στατιστικά εργαλεία αποτελούν, εν γένει, μία πιο αξιόπιστη μέθοδο για την εκτίμηση της ποιότητας ενός ΨΜΕ. Αντίθετα με τους οπτικούς ελέγχους, οι οποίοι παρέχουν μία ποιοτική αξιολόγηση βασιζόμενη στην οπτική αντιπαράθεση ενός ΨΜΕ με ένα άλλο ΨΜΕ αναφοράς, οι στατιστικοί ποσοτικοποιούν αυτή την αξιολόγηση. Το μέσο για να γίνει αυτή η ποσοτικοποίηση μπορεί να είναι είτε ένα σύνολο υψομετρικών σημείων ελέγχου (φωτοσταθερά ή τριγωνομετρικά σημεία) είτε ένα μοντέλο αναφοράς. Στην πρώτη περίπτωση, η οποία αναφέρεται και ως *pixel-to-point*, τα σημεία γνωστών υψομέτρων συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του μοντέλου προς αξιολόγηση και προκύπτουν οι υψομετρικές διαφορές (Μαριού, 2013). Στη δεύτερη περίπτωση, η οποία αναφέρεται και ως *pixel-to-pixel*, κάθε εικονοστοιχείο του παραγόμενου ΨΜΕ συγκρίνεται με το αντίστοιχο εικονοστοιχείο του ΨΜΕ αναφοράς για να προκύψουν και εδώ υψομετρικές διαφορές.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, είτε *pixel-to-point* μέθοδος εφαρμοστεί είτε *pixel-to-pixel*, προκύπτουν υψομετρικές διαφορές που αντιπροσωπεύουν τη διαφορά της εκτιμώμενης τιμής του υψομέτρου από την πραγματική του. Προφανώς πρόκειται για προσέγγιση της πραγματικής του τιμής, αφού η αληθινή τιμή ενός μεγέθους δεν μπορεί να είναι γνωστή, η οποία για χάρη της αξιολόγησης παίζει το ρόλο της αληθινής. Για αυτό το λόγο είναι σημαντικό τα σημεία ελέγχου ή το μοντέλο αναφοράς να είναι μεγαλύτερης ακρίβειας από το

μοντέλο προς αξιολόγηση. Αυτές οι υψομετρικές διαφορές λοιπόν χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή διάφορων στατιστικών μεγεθών όπως η μέση τιμή, η διάμεσος, η μέγιστη και ελάχιστη τιμή, η τυπική απόκλιση, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κ.α. (Μαριού, 2013). Κάποιες φορές είναι ενδεικτικό της ποιότητας ενός ΨΜΕ να γίνεται αντιπαράθεση των βασικών του στατιστικών μεγεθών με αυτά ενός ΨΜΕ αναφοράς (Nikolakopoulos, et al., 2007). Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά κάποια βασικά και εύχρηστα στατιστικά μεγέθη.

- **Μέση τιμή**

Η μέση υψομετρική διαφορά μπορεί να αναδείξει την ύπαρξη ή όχι συστηματικού σφάλματος. Θεωρητικά τα υψόμετρα των αντίστοιχων σημείων πρέπει να ισούνται άρα η διαφορά τους να είναι μηδενική. Κάτι τέτοιο φυσικά είναι σχεδόν αδύνατο να συμβεί γιατί στις μετρήσεις υπεισέρχονται σφάλματα. Παρ' όλα αυτά η μέση τιμή πρέπει να είναι κοντά στο μηδέν. Όσο περισσότερο αποκλίνει από αυτό τόσο πιο χαμηλής ακρίβειας είναι το συγκρινόμενο ΨΜΕ. Στην περίπτωση σύγκρισης των στατιστικών μεγεθών κάθε μοντέλου ξεχωριστά, κι όχι της διαφοράς τους, πρέπει τα μεγέθη να έχουν κοντινές τιμές.

- **Μέγιστη και ελάχιστη τιμή**

Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή των υψομετρικών διαφορών μπορεί να αποτελέσει ένδειξη για την ύπαρξη μεμονωμένων χονδροειδών σφαλμάτων του ΨΜΕ που αξιολογείται. Κατά τη σύγκριση των μέγιστων και ελάχιστων τιμών κάθε μοντέλου ξεχωριστά πρέπει και εδώ, όπως και στη μέση τιμή, οι τιμές να είναι κοντινές αν όχι ίδιες.

- **Τυπική απόκλιση**

Είναι ένα μέτρο που χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το ποσό της διασποράς ενός συνόλου τιμών δεδομένων, στην προκειμένη περίπτωση υψομετρικές διαφορές ή υψόμετρα. Μια χαμηλή τυπική απόκλιση υποδηλώνει ότι οι τιμές των δεδομένων τείνουν να είναι κοντά στο μέσο όρο του συνόλου, ενώ μία υψηλή τυπική απόκλιση υποδεικνύει ότι τα στοιχεία απλώνονται πάνω από ένα ευρύτερο φάσμα των τιμών.

2.6 Εφαρμογές ψηφιακών μοντέλων εδάφους

Μετά την παρουσίαση των πιθανών τρόπων απόκτησης δεδομένων για τη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους και επιφανείας, των δομών που μπορούν να έχουν αυτά, αλλά και των μεθόδων για την αξιολόγηση της ποιότητάς τους, είναι σκόπιμο να γίνει μία αναφορά στα είδη εφαρμογών που χρησιμοποιούνται τα μοντέλα αυτά.

2.6.1 Υδρολογική χρήση

Μία από τις βασικές εφαρμογές όπου η χρήση ΨΜΕ είναι απαραίτητη είναι οι υδρολογικές μελέτες, κι αυτό γιατί η ροή του νερού πάνω στη γήινη επιφάνεια έχει άμεση σχέση με τη μορφολογία του εδάφους. Ειδικότερα, στη μελέτη για τη δημιουργία ενός συστήματος λήψης αποφάσεων για πλημμύρες, το ANFAS, αναφέρεται ότι για την εφαρμογή του απαιτούνται μέσα σε πολλά άλλα δεδομένα και DTMs (Πραστάκος, et al.). Για την εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου θεμελιώδης

συνεισφορά υπήρξε ο αλγόριθμος των 8 διευθύνσεων (Jenson S.K., 1988), ο οποίος βασίζεται σε ψηφιδωτά DTM. Επίσης για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου μίας περιοχής, εφαρμογή που αποτελεί βασικό μέρος αυτής της διπλωματικής, οι (Murphy Paul N. C., 2008) χρησιμοποίησαν μοντέλο εδάφους από δεδομένα LiDAR και ένα άλλο που δημιουργήθηκε με φωτογραμμετρικές μεθόδους και έκαναν συγκρίσεις των αποτελεσμάτων. Ακόμα έχουν γίνει μελέτες για τα διαφορετικά αποτελέσματα που προκύπτουν για το υδρογραφικό δίκτυο από διαφορετικές πηγές δημιουργίας DEM (Li Jing, 2009). Μία άλλη διπλωματική εργασία ασχολείται με την ταξινόμηση του ανάγλυφου βάσει υδρολογικών κριτηρίων που και αυτό απαιτεί τη δημιουργία ΨΜΕ (Παπαγεωργάκη, 2012). Αυτά αποτελούν ένα μικρό δείγμα της βιβλιογραφίας που υπάρχει σχετικά με υδρολογικά δίκτυα και τη χρήση ψηφιακών μοντέλων εδάφους.

2.6.2 Εντοπισμός κτιρίων

Μία εξίσου σημαντική εφαρμογή που έχουν τα DTM σε συνδυασμό συνήθως με τα DSM είναι ο εντοπισμός των κτιριακών όγκων σε μία περιοχή. Μία συνήθης τεχνική για το σκοπό αυτό είναι η δημιουργία ενός μοντέλου επιφάνειας, ενός μοντέλου εδάφους και η αφαίρεση του τελευταίου από το πρώτο (Sefercik, et al., 2014). Το αποτέλεσμα αυτής της αφαίρεσης αναφέρεται ως normalized DSM (nDSM). Υπάρχει επίσης η δυνατότητα για συνδυασμό φασματικής πληροφορίας, μίας CIR εικόνας για παράδειγμα, και ενός nDSM για ταξινόμηση των διαφόρων καλύψεων γης σε μία περιοχή (Haala, et al., 1999). Όταν γίνεται η αφαίρεση μεταξύ DSM και DTM υπάρχει η δυνατότητα για κατηγοριοποίηση των υψομετρικών δεδομένων που προκύπτουν (Ράμμος, 2008), όπως για παράδειγμα λαμβάνοντας υπόψη ότι ένας όροφος συνήθως είναι 3m, μία επιφάνεια που βρίσκεται στο 1m δεν μπορεί να καταταγεί στα σπίτια.

2.6.3 Αξιολόγηση της ποιότητας άλλων ΨΜΕ

Όπως έχει τονισθεί στα όσα έχουν αναφερθεί, η δημιουργία ψηφιακών μοντέλων υψομέτρων (DEM) είναι πολύ σημαντική διαδικασία για τις επιστήμες που ασχολούνται με φυσικά φαινόμενα αλλά και για μελέτες κατασκευαστικών έργων κ.τ.λ. Είναι εξίσου σημαντικό η δημιουργία τους να ακολουθείται και από κάποιες μεθόδους που να αξιολογούν την πιστότητα με την οποία αποδίδουν την πραγματική μορφολογία του εδάφους ή οποιασδήποτε άλλης επιφάνειας. Έτσι μία εκ των χρήσεων τους είναι αυτή καθαυτή η σύγκρισή τους με άλλα που έχουν παραχθεί με διαφορετική μέθοδο. Επίσης συχνά γίνονται και αξιολογήσεις των παγκόσμιων DEM μεταξύ τους για μία δεδομένη περιοχή (Nikolakoroulos, et al., 2006) ή με επίγειες μετρήσεις σημείων (Μαριού, 2013).

2.7 Υδρογραφικό δίκτυο

2.7.1 Θεωρητικά στοιχεία

Με τον όρο υδρογραφικό δίκτυο εννοείται το δίκτυο μεταφοράς του επιφανειακού νερού και των ιζημάτων μίας λεκάνης απορροής πάνω στην επιφάνεια της Γης. Η επιφανειακή απορροή αποτελεί μέρος του υδρολογικού κύκλου και δημιουργείται από το νερό των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων που δεν απορροφάται από το έδαφος, εφόσον υπάρχει κατάλληλη κλίση και βάθος ροής (Τσούλος, και συν.,

2015). Η στοιχειώδης μονάδα του υδρογραφικού δικτύου είναι το υδάτινο ρεύμα ή αλλιώς χείμαρρος, το οποίο πρόκειται για τη συγκέντρωση του επιφανειακού νερού σε μία στενή κοίτη.

Τα ρεύματα συχνά καλούνται και κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου λόγω των διακλαδώσεων που δημιουργούν. Στα ψηλότερα υψόμετρα, οι κλάδοι είναι συνήθως μικρά, εφήμερα ρεύματα που οδηγούν το νερό προς τα κατάντη ρεύματα, δηλαδή σε χαμηλότερα υψόμετρα. Οι κλάδοι συνδέονται μεταξύ τους και εκείνοι που βρίσκονται σε χαμηλότερα υψόμετρα (κατάντη) δέχονται τα ύδατα από εκείνους που βρίσκονται σε ψηλότερα (ανάντη). Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ταξινόμησης των κλάδων (π.χ. κατά Horton, κατά Stahler, κατά Shreve κ.α.), αλλά ανεξάρτητα από τη μέθοδο, οι κλάδοι μικρότερης τάξης είναι αυτοί στους οποίους δεν συμβάλλουν άλλοι κλάδοι. Πέρα από τα ρεύματα, θεωρήθηκε σκόπιμο για την πλήρη κατανόηση της εργασίας, να αναφερθούν και κάποια άλλα σημαντικά στοιχεία ενός υδρογραφικού δικτύου, όπως η λεκάνη απορροής και ο υδροκρίτης.

Λεκάνη απορροής είναι μία σαφώς ορισμένη τοπογραφική και υδρολογική ενότητα, στην οποία συγκεντρώνονται τα όμβρια ύδατα και διοχετεύονται σε ένα υδρολογικό σύστημα. Οι πλαγιές και οι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου αποτελούν τα βασικά μορφολογικά στοιχεία της.

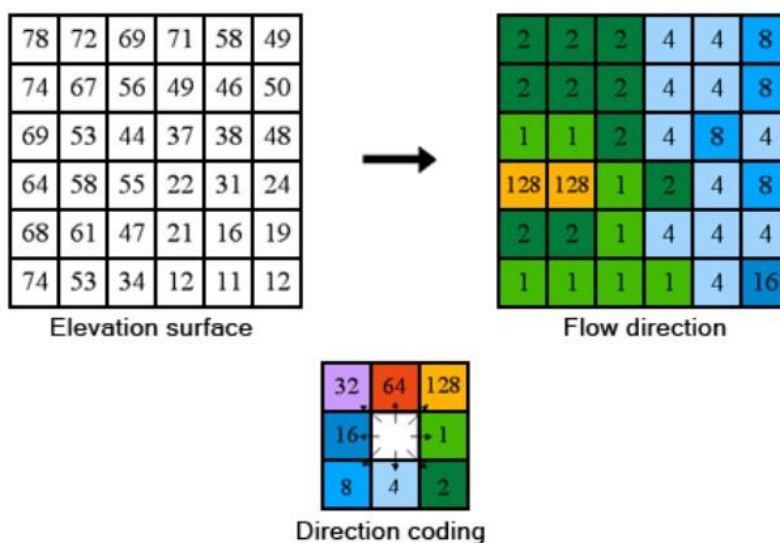
Υδροκριτική γραμμή ή υδροκρίτης ονομάζεται η νοητή γραμμή που συνδέει τα υψηλότερα σημεία των υψωμάτων της επιφάνειας της Γης (π.χ. λόφοι ή βουνοκορφές) και διαχωρίζει τη ροή των όμβριων υδάτων. Πρακτικά πρόκειται για το νοητό όριο μεταξύ γειτονικών υδρολογικών λεκανών.

2.7.2 Μεθοδολογία αυτόματης εξαγωγής υδρογραφικού δικτύου

Αυτό που εμμέσως αναφέρθηκε και στα παραπάνω είναι ότι η διαδρομή που ακολουθούν τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα στην επιφάνεια του εδάφους εξαρτάται άμεσα από τις υψομετρικές διαφορές, την κλίση του εδάφους και τον προσανατολισμό της επιφάνειας όπου κινούνται. Εφόσον λοιπόν η μορφή του εδάφους επηρεάζει την απορροή των υδάτων, το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Terrain Model) καθίσταται ένα από τα βασικότερα συστατικά για την αυτόματη εξαγωγή και ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου μίας περιοχής. Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους μπορούν να έχουν δύο βασικές δομές, οι οποίες αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Η μία είναι η ψηφιδωτή (raster) κατά την οποία το έδαφος αναπαρίσταται από ένα επίπεδο, όπως και η ψηφιακή εικόνα, όπου σε κάθε φαντίο του ψηφιδωτού αποθηκεύεται μία τιμή υψομέτρου και για την οπτική απόδοση δημιουργείται μία χρωματική σκάλα, ανάλογα με τις διαβαθμίσεις των υψομέτρων. Η άλλη είναι η μέθοδος ακανόνιστων τριγώνων (Triangulated Irregular Network-TIN) η οποία αναπαριστά το ανάγλυφο με ένα σύνολο τριγωνικών επιφανειών των οποίων οι κορυφές ταυτίζονται με τις θέσεις των σημείων των δεδομένων εισόδου (Τσούλος, 2008). Κάθε κορυφή έχει γνωστό υψόμετρο. Οι αλγόριθμοι για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου μίας περιοχής βασίζονται κυρίως σε raster δεδομένα, δηλαδή σε ΨΜΕ σε δομή κανάβου. Τα προϊόντα που παράγονται από τα δεδομένα αυτά (πολύγωνα λεκανών απορροής, ρεύματα κ.α.) μπορούν εύκολα να μετατραπούν σε διανυσματικές οντότητες για περαιτέρω ανάλυση (Jenson S.K., 1988).

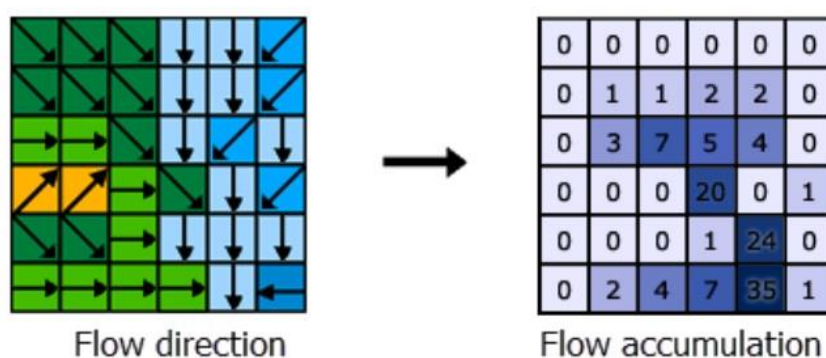
Πέραν των διαφορών ως προς τη δομή και την αναπαράσταση του εδάφους, οι δύο εκδοχές των ΨΜΕ έχουν κοινή προϋπόθεση την ύπαρξη σημείων με γνωστό υψόμετρο είτε αυτά έχουν προέλθει από φωτογραμμετρικές μεθόδους είτε από επιτόπιες μετρήσεις. Ένα προβληματικό αλλά σύνηθες φαινόμενο είναι ότι σφάλματα κατά τη διαδικασία παραγωγής των ΨΜΕ οδηγούν σε πιθανή δημιουργία βυθισμάτων (sinks) και κορυφών (peaks), τα οποία συχνά δεν ανταποκρίνονται στα αρχικά δεδομένα εισόδου. Κάποια από τα βυθίσματα μπορεί να είναι φυσικά, ειδικά σε παγετώδεις ή καρστικές περιοχές, πολλά όμως είναι ατέλειες του ΨΜΕ. Οι κορυφές είναι συνηθέστερα φυσικά στοιχεία της γήινης επιφάνειας και λιγότερο καθοριστικές για τον υπολογισμό της κατεύθυνσης ροής των υδάτων. Τέτοια σφάλματα, κυρίως τα βυθίσματα επειδή εμποδίζουν τη ροή του νερού όντας περιοχές εσωτερικής αποστράγγισης, πρέπει να απομακρύνονται από το μοντέλο πριν να γίνει προσπάθεια να εξαχθούν πληροφορίες από αυτό. Ο εντοπισμός και η αποκατάσταση των βυθισμάτων αποτελεί έτσι και το πρώτο βήμα στα λογισμικά για την εξαγωγή των ρευμάτων.

Επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης ροής. Με βάση το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης απορροής, με επικρατέστερο εκείνο της Απορροής 8 Διευθύνσεων (Jenson S.K., 1988). Σύμφωνα με αυτό, κάθε φαντίο του ΨΜΕ εξετάζεται σε σχέση με τα γειτονικά του, δημιουργείται δηλαδή ένα ψηφιακό παράθυρο διαστάσεων 3x3 ώστε το κεντρικό εικονοστοιχείο να συγκριθεί με τα οκτώ γειτονικά του. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι κλίσεις βάσει των υψομετρικών διαφορών και τελικά προσδιορίζεται η διεύθυνση μέγιστης κλίσης, η οποία είναι και η διεύθυνση απορροής του νερού στο έδαφος, οπότε και κωδικοποιείται ανάλογα. Η κωδικοποίηση αυτή παίρνει μία τιμή εκ των οκτώ πιθανών, οι οποίες είναι : 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 και 128 και δηλώνουν έμμεσα τη διεύθυνση απορροής του νερού. Αυτή η περιγραφή γίνεται ευκολότερα κατανοητή αν παρατηρήσει κανείς το την εικόνα που ακολουθεί :



Εικόνα 4: Κωδικοποίηση για την κατεύθυνση ροής βάσει ψηφιδωτού ΨΜΕ. (πηγή : <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm>)

Αφού προσδιοριστεί η κατεύθυνση ροής για κάθε εικονοστοιχείο του μοντέλου εδάφους, η οποία δεν είναι άλλη από την κατεύθυνση προς την οποία απορρέει το νερό από το εκάστοτε εικονοστοιχείο, υπολογίζεται η συσσώρευση ροής. Το νέο δεδομένο που προκύπτει από τη διαδικασία υπολογισμού της συσσώρευσης ροής είναι ένα αρχείο ίσων διαστάσεων με το ψηφιδωτό μοντέλο εδάφους, όπου σε κάθε εικονοστοιχείο του εκχωρείται μία τιμή ίση με τον αριθμό των κελιών που απορρέουν σε αυτό. Όπως γίνεται προφανές από την προηγούμενη περιγραφή, για το στάδιο αυτό είναι απαραίτητη η ύπαρξη των δεδομένων της κατεύθυνσης ροής διότι μόνο βάσει αυτών μπορεί να γνωστοποιηθεί προς τα που ρέει το νερό κάθε pixel (Jenson S.K., 1988).



Εικόνα 5: Υπολογισμός συσσώρευσης ροής βάσει ψηφιδωτού ΨΜΕ. (πηγή : <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm>)

Τα εικονοστοιχεία στα οποία αντιστοιχεί η τιμή μηδέν, δηλαδή αυτά στα οποία δεν απορρέει κανένα άλλο εικονοστοιχείο, εν γένει αντιστοιχούν στο πρότυπο των κορυφογραμμών. Αυτό είναι λογικό καθώς οι κορυφογραμμές, όντως τα ψηλότερα σημεία μίας λεκάνης απορροής δεν δέχονται ύδατα από άλλα σημεία του εδάφους.

Αφού έχουν ολοκληρωθεί τα τρία αυτά πρωταρχικά βήματα για την υδρολογική ανάλυση μίας περιοχής, τότε τα τρία νέα σύνολα δεδομένων που έχουν προκύψει μπορούν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω για συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως η εξαγωγή των λεκανών απορροής και του υδρογραφικού δικτύου. Για την εφαρμογή της εργασίας αυτής αυτό που ερευνήθηκε είναι το δίκτυο ρευμάτων της περιοχής μελέτης. Για να γίνει εφικτό αυτό είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η συσσώρευση ροής για κάθε εικονοψηφίδα της περιοχής. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, σε κάθε pixel αντιστοιχεί ένας αριθμός ο οποίος αντιπροσωπεύει το σύνολο των pixels που απορρέουν στο συγκεκριμένο. Έτσι, πέραν των κελιών με μηδενικές τιμές, κάθε κελί με άλλη τιμή μπορεί να θεωρηθεί μέρος του υδρογραφικού δικτύου. Όμως μία τέτοια θεώρηση δεν έχει πρακτικό νόημα. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να ορίζεται ένα κατώφλι σχετικό με τη συσσώρευση ροής σε κάθε εικονοστοιχείο. Έτσι, κάθε εικονοστοιχείο στο οποίο απορρέουν περισσότερα εικονοστοιχεία από το

κατώφλι θα θεωρείται μέρος του υδρογραφικού δικτύου ενώ σε όποιο καταλήγουν λιγότερα, δεν θα θεωρείται. Το αποτέλεσμα στο οποίο οδηγεί η διαδικασία αυτή, στην ουσία πρόκειται για το αποτέλεσμα μίας λογικής πράξης, κατά την οποία όσων κελιών η τιμή ξεπερνά το κατώφλι θα λαμβάνουν τιμή 1 και θα προβάλλονται σε ένα φόντο μηδενικών τιμών, δηλαδή κελιών που δεν θεωρούνται υδρογραφικό δίκτυο. Ο τύπος αρχείου παραμένει ψηφιδωτός (raster) και πολλές φορές, στο τέλος της διαδικασίας είναι χρήσιμο να γίνεται μετατροπή και να εξάγεται σε διανυσματική μορφή το δίκτυο, αφού πρόκειται για γραμμικό φαινόμενο. Η μετατροπή αυτή είναι πλέον ευρέως διαδεδομένη σε πολλά λογισμικά GIS.

Η επιλογή του κατωφλίου συσσώρευσης ροής για τον προσδιορισμό των εικονοστοιχείων ροής και μη ροής πρέπει να είναι τέτοια ώστε η επικάλυψη μεταξύ του δικτύου που παράγεται από DTM (DTM Stream Network – DSM) και του χαρτογραφημένου δικτύου (Mapped Stream Network – MSN) να είναι η μέγιστη. Ενώ οι τρεις πρώτες διαδικασίες για την αυτόματη εξαγωγή ενός υδρογραφικού δικτύου έχουν αυτοματοποιηθεί και μπορούν να εκτελεστούν μέσω αρκετών λογισμικών πακέτων, η επιλογή του κατωφλίου για τον καθορισμό των ρευμάτων συχνά καθορίζεται αυθαίρετα από τον χρήστη μέσω δοκιμών και σύγκρισης με το χαρτογραφημένο δίκτυο. Αυτή η χειροκίνητη διαδικασία μπορεί να καταλήξει είτε σε παραπάνω ρεύματα, δηλαδή ρεύματα που στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν είτε σε λιγότερα, δηλαδή κάποια να παραλείπονται. Η πρώτη περίπτωση έχει να κάνει με επιλογή κατωφλίου χαμηλότερου από το βέλτιστο ενώ αντίστοιχα η δεύτερη με επιλογή κατωφλίου υψηλότερου από το βέλτιστο. Επίσης είναι μια χρονοβόρα διαδικασία. Οι τιμές του κατωφλίου ποικίλουν ανάλογα με την κλίμακα της μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, μελέτες μεγάλης κλίμακας απαιτούν ρεύματα υψηλότερης τάξης και συνεπώς μεγαλύτερο κατώφλι και αντιστρόφως (Bhowmik, et al., 2015).

Τα τελευταία χρόνια έχουν δημιουργηθεί διάφοροι αλγόριθμοι αυτοματοποίησης της επιλογής κατωφλίου. Η αυτοματοποίηση βασίζεται στη σύγκριση με ένα χαρτογραφημένο υδρογραφικό δίκτυο. Ειδικότερα οι αυτοματισμοί μπορεί να βασίζονται σε στατιστικές σχέσεις παραμέτρων τοπίου στις πηγές ροής των MSNs ή στην ελαχιστοποίηση των πλευρικών μετατοπίσεων μεταξύ των πηγών ροής των MSNs DSNs. Η πλευρική μετατόπιση μπορεί να οφείλεται στις διαφορές προέλευσης των δεδομένων, στη διαφορά εξοπλισμού και ανθρώπινης διαδικασίας. Οι αλγόριθμοι που βασίζονται σε παραμέτρους του περιβάλλοντος είναι πολύ απαιτητικοί σε ό,τι αφορά τα δεδομένα εισόδου και τους υπολογισμούς (Bhowmik, και συν., 2015). Από την άλλη, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί την πλευρική μετατόπιση μεταξύ ενός MSN και ενός DSN για την αυτοματοποίηση της επιλογής κατωφλίου (Bhowmik, και συν., 2015) χρειάζεται μόνο τη μετατροπή του χαρτογραφημένου δικτύου σε raster αρχείο και ένα ΨΜΕ σε δομή κανάβου.

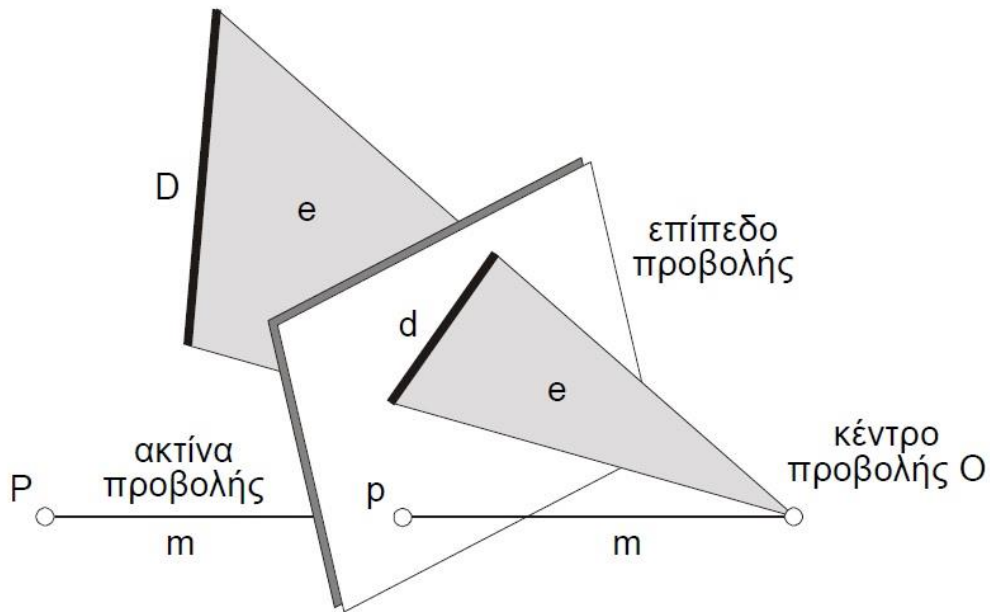
Κεφάλαιο 3^ο: Φωτογραμμετρικό υπόβαθρο

Δεδομένου ότι μέρος της εργασίας αυτής είναι η παραγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους χρησιμοποιώντας φωτογραμμετρικές μεθόδους, κρίνεται αναγκαίο για την πλήρη κατανόηση των διαδικασιών να παρουσιαστούν κάποιες βασικές έννοιες της Φωτογραμμετρίας. Η αρχή θα γίνει με τον ίδιο τον ορισμό της επιστήμης της Φωτογραμμετρίας και το μοντέλο που περιγράφει καλύτερα τη διαδικασία λήψης μίας φωτογραφίας, στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα βασικά στοιχεία της επιπολικής γεωμετρίας και πως αυτά αξιοποιούνται για την εφαρμογή αυτοματοποιημένων διαδικασιών. Τέλος, περιγράφεται η διαδικασία ψηφιακής συνταύτισης και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για αυτή.

3.1 Θεμελιώδεις φωτογραμμετρικές έννοιες

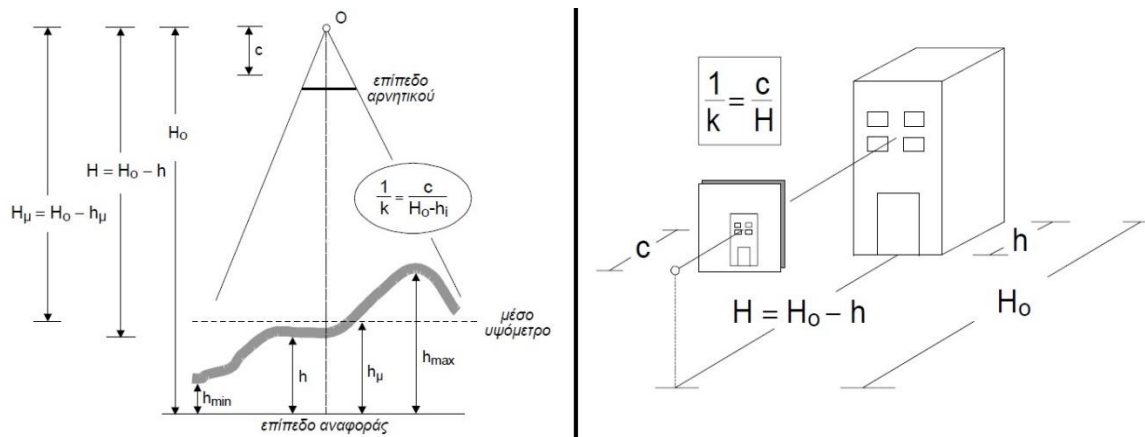
Ως Φωτογραμμετρία ορίζεται ένα σύνολο τεχνικών που αποσκοπούν στον κατά το δυνατόν πιστότερο γεωμετρικό προσδιορισμό αντικειμένων του τρισδιάστατου (3D) χώρου από μετρήσεις πάνω σε εικόνες. Εύλογο ερώτημα είναι πως μπορεί να αποσπάσει κανείς πληροφορίες για την τρίτη διάσταση, δηλαδή το ύψος των αντικειμένων, από μία εικόνα που αποτελεί ένα επίπεδο. Η απάντηση είναι πως η τρίτη διάσταση ενυπάρχει σε μία φωτογραφία μέσω της εκτροπής λόγω ανάγλυφου, φαινόμενο που περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια.

Ιδιαίτερη σημασία έχει να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο προσεγγίζεται, από φωτογραμμετρική άποψη, μία εικόνα. Το γεωμετρικό μοντέλο που προσεγγίζει λοιπόν μία φωτογραφία είναι αυτό της κεντρικής προβολής. Σύμφωνα με αυτό, τα σημεία του χώρου προβάλλονται στο επίπεδο προβολής, το οποίο είναι το επίπεδο του φιλμ για τις αναλογικές εικόνες ή το επίπεδο του αισθητήρα για τις ψηφιακές, μέσω μίας δέσμης ακτινών προβολής. Οι ακτίνες αυτές διέρχονται όλες από το κέντρο προβολής, τον ρόλο του οποίου διαδραματίζει το κέντρο του φακού της μηχανής. Αποτέλεσμα μίας κεντρικής προβολής, και εν προκειμένω μίας φωτογραφικής απεικόνισης, είναι ένα σύνολο εικονοσημείων τα οποία συγκροτούν μία προοπτικά παραμορφωμένη εικόνα του αντικειμένου, δηλαδή μία προοπτική απεικόνισή του (Πέτσα, 2000). Παρακάτω, μέσω της εικόνας [6], φαίνονται σχηματικά αυτά που περιγράφηκαν.



Εικόνα 6: Απεικόνιση των βασικών στοιχείων της κεντρικής προβολής (Πέτσα, 2000).

Η κεντρική προβολή παρουσιάζει κάποια χαρακτηριστικά τα οποία καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τις φωτογραμμετρικές διαδικασίες. Πρώτο και πολύ βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι η κλίμακα εντός της ίδιας εικόνας μεταβάλλεται. Αυτό οφείλεται στην αλλαγή του ύψους των διαφόρων αντικειμένων που φωτογραφίζονται – με απλά λόγια στο ανάγλυφό τους – αλλά και στην απόσταση από την οποία γίνεται η λήψη της φωτογραφίας, στο είδος του φακού και στην κλίση του άξονα λήψης.



Εικόνα 7: Εκφράσεις της κλίμακας σε κατακόρυφες λήψεις (αριστερά) και επίγειες λήψεις (δεξιά) (Πέτσα, 2000)

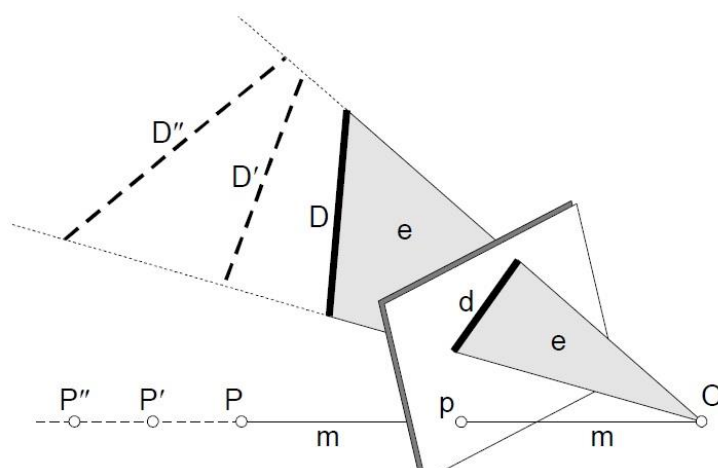
Ένα ακόμα χαρακτηριστικό της κεντρικής προβολής, καθοριστικό για τη Φωτογραμμετρία, είναι η εκτροπή λόγω ανάγλυφου, η οποία έχει να κάνει με το γεγονός ότι σε μία φωτογραφία καταγράφονται στοιχεία και των τριών διαστάσεων του χώρου, σε αντίθεση με την ορθή προβολή (π.χ. χάρτες) στην οποία καταγράφονται μόνο δύο διαστάσεις. Τα κατακόρυφα στοιχεία των αντικειμένων

καταγράφονται ως οριζόντια μήκη στην εικόνα, τα οποία μάλιστα είναι ακτινικά, δηλαδή κατευθύνονται προς το κέντρο της εικόνας.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η κεντρική προβολή και κατ' επέκταση μία φωτογραφία, αποτελούν προβολές του 3D χώρου στον 2D χώρο. Έτσι, κατ' αρχήν δεν είναι δυνατό να ανακατασκευαστούν τρισδιάστατα αντικείμενα από μία εικόνα. Αυτό γίνεται αντιληπτό από τα παρακάτω :

- Ένα σημείο P του χώρου απεικονίζεται σε σημείο p της εικόνας μέσω της ακτίνας προβολής.
- Αντίθετα, σε ένα σημείο p της εικόνας αντιστοιχεί η ευθεία προβολής στο χώρο, με την έννοια ότι το σημείο του χώρου που απεικονίζεται μέσω του εικονοσημείου κείται επί της ευθείας προβολής, αλλά δεν είναι γνωστό ακριβώς ποιο είναι.
- Μία ευθεία D του χώρου απεικονίζεται σε ευθεία d της εικόνας μέσω του επιπέδου προβολής.
- Αντίθετα, σε μία ευθεία d της εικόνας αντιστοιχεί το επίπεδο προβολής στο χώρο.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η αντιστοιχία χώρου-εικόνας είναι μονοσήμαντη, δηλαδή από τον χώρο μπορεί να γίνει αντιστοιχία στην εικόνα, αλλά από την εικόνα δεν είναι δυνατό να γίνει αντιστοιχία στον χώρο. Αυτές οι διαπιστώσεις αποδίδονται σχηματικά στην εικόνα [8].



Εικόνα 8: Απεικόνιση της μονοσήμαντης σχέσης χώρου-εικόνας (Πέτσα, 2000).

Για τον προσδιορισμό του τρισδιάστατου χώρου έγινε σαφές ότι δεν επαρκεί μία μόνο δέσμη ακτινών, δηλαδή μία μόνο εικόνα. Ο συνδυασμός όμως δύο δεσμών, δηλαδή δύο εικόνων, των οποίων οι ακτίνες που προέρχονται από το ίδιο σημείο του χώρου (ομόλογες ακτίνες) θα τέμνονται σε αυτό, μπορούν να προσδιορίσουν το εκάστοτε σημείο του χώρου. Απαραίτητη προϋπόθεση βέβαια είναι να έχει προηγηθεί βαθμονόμηση της μηχανής ώστε να έχει οριστεί η κεντρική προβολή και επίσης αυτές οι δέσμες να είναι είτε σωστά ενταγμένες και προσανατολισμένες στο γεωδαιτικό σύστημα είτε να είναι γνωστή η σχετική τους θέση. Με φωτογραμμετρικούς όρους δηλαδή είναι αναγκαία η αποκατάσταση του εσωτερικού και του εξωτερικού προσανατολισμού ή του σχετικού. Φυσικά αν στόχος είναι η απόκτηση γεωδαιτικών συντεταγμένων τότε είναι απαραίτητος ο εξωτερικός

προσανατολισμός. Τελευταία αλλά εξίσου σημαντική προϋπόθεση είναι το κέντρο προβολής να είναι διαφορετικό για κάθε δέσμη, δηλαδή οι δύο εικόνες να έχουν ληφθεί από διαφορετικά σημεία ώστε οι ακτίνες να τέμνονται και να μην ταυτίζονται. Το αποτέλεσμα μίας τέτοιας διαδικασίας είναι δύο διαφορετικές προοπτικές απεικονίσεις του αντικειμένου, δηλαδή οι εκτροπές λόγω ανάγλυφου είναι διαφορετικές σε κάθε εικόνα.

Είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να γίνει αναφορά στην έννοια της παράλλαξης. Παράλλαξη είναι η φαινομενική μετατόπιση της θέσης ενός αντικειμένου, ως προς ένα σύστημα αναφοράς, η οποία προκαλείται από μία μετατόπιση της θέσης παρατήρησής του (Πατιάς, 1991). Στην περίπτωση του στερεοζεύγους η μετατόπιση έχει να κάνει με την αλλαγή του σημείου λήψης της φωτογραφίας. Η παράλλαξη, στη γενική περίπτωση, αναλύεται σε συνιστώσες που ονομάζονται x -παράλλαξη y -παράλλαξη. Κάθε μία από αυτές εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς στη Φωτογραμμετρία, με την πρώτη να είναι απαραίτητη για τον καθορισμό των υψομέτρων και τη δεύτερη να πρέπει να εξαιρεθεί ώστε να είναι δυνατή η στερεοσκοπική παρατήρηση. Η x -παράλλαξη σχετίζεται άμεσα με τα υψόμετρα των σημείων. Σε μία αεροφωτογράφιση, αν A , B είναι δύο σημεία του εδάφους με το σημείο B να έχει μεγαλύτερο υψόμετρο από το A , τότε η φαινομενική μετατόπιση του B , εξαιτίας της κίνησης του αεροπλάνου, θα είναι μεγαλύτερη. Άρα και η x -παράλλαξη (Πατιάς, 1991). Με αυτόν τον τρόπο, οι υψομετρικές διακυμάνσεις του αντικειμένου καταγράφονται ως διαφορές παράλλαξης σε ζεύγη εικόνων (Πέτσα, 2000). Έτσι λοιπόν, μέσω των μετρήσεων των x -παράλλαξεων μπορούν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις στην τρίτη διάσταση. Η y -παράλλαξη αφορά στην ασυμβατότητα των ακτινών προβολής ενός σημείου, δηλαδή στο γεγονός ότι δεν τέμνονται, κατά τη στιγμή της λήψης των εικόνων. Η εξάλειψή της είναι απαραίτητη για την στερεοσκοπική όραση όπως αναφέρθηκε και η διαδικασία κατά την οποία αυτό συμβαίνει ονομάζεται σχετικός προσανατολισμός και αναφέρεται στη συνέχεια.

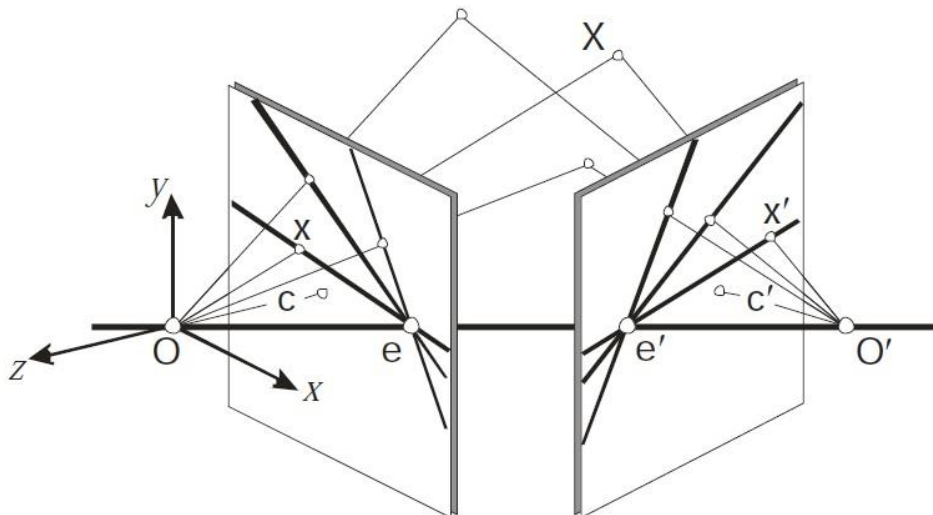
3.2 Επιπολική γεωμετρία

Η επιπολική γεωμετρία περιγράφει την προβολική γεωμετρική σχέση μεταξύ δύο επικαλυπτόμενων εικόνων. Εξαρτάται μόνο από την εσωτερική γεωμετρία της μηχανής και από τη σχετική θέση των σημείων λήψης των εικόνων ενώ ταυτόχρονα είναι ανεξάρτητη από τις συντεταγμένες του τρισδιάστατου χώρου (Αρβανίτης, 2012). Βάσει των σχέσεων της επιπολικής γεωμετρίας καθίσταται εφικτή η εξαγωγή πληροφοριών για τον πραγματικό χώρο (Αρβανίτης, 2012). Παρακάτω δίνονται οι βασικές οντότητες της επιπολικής γεωμετρίας:

Πόλοι των εικόνων (e , e') είναι οι τομές της ευθείας της βάσης λήψης, η οποία ορίζεται από τα δύο κέντρα προβολής (O , O'), με τα επίπεδα της εικόνας.

Επιπολικό επίπεδο ονομάζεται το επίπεδο που ορίζεται από δύο ομόλογες ακτίνες και την ευθεία της βάσης του στερεοζεύγους,.

Επιπολικές ευθείες είναι τα ίχνη των επιπολικών επιπέδων στα επίπεδα των εικόνων.



Εικόνα 9: Γεωμετρία του στερεοζεύγους (Καλησπεράκης, 2010).

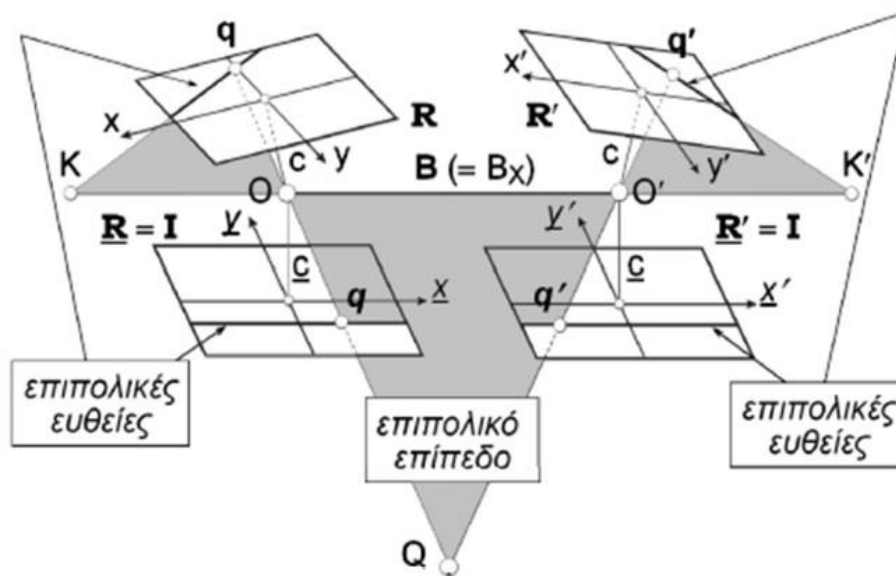
Από το σχήμα της εικόνας [9] γίνεται εμφανές ότι κάθε σημείο του χώρου ορίζει μία δέσμη επιπολικών επιπέδων, η οποία είναι αξονική ως προς τη βάση. Η βάση με τη σειρά της ορίζει επί των εικόνων δύο ομόλογες επίπεδες δέσμες επιπολικών ευθειών με κορυφές τους πόλους (Καλησπεράκης, 2010). Οι προβολές (x , x') σε δύο επικαλυπτόμενες εικόνες ενός σημείου (X) του χώρου κείνται επί των ομόλογων επιπολικών ευθειών. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα, δηλαδή ότι το ομόλογο σημείο ενός εικονοσημείου κείται απαραίτητως επί της ομόλογης επιπολικής ευθείας της άλλης εικόνας του ζεύγους, συμβάλλει σημαντικά στην διαδικασία εύρεσης ομολογιών κατά την ψηφιακή συνταύτιση.

Όπως περιγράφεται και παρακάτω στο κεφάλαιο αυτό, η συνταύτιση χαρακτηριστικών αφορά σε κάποια χαρακτηριστικά σημεία των εικόνων και γίνεται μέσω σύγκρισης περιγραφικών διανυσμάτων ενώ η πυκνή συνταύτιση, μέθοδος που χρησιμοποιείται και στην εργασία αυτή, αφορά σε όλες τις εικονοψηφίδες, αν είναι δυνατόν. Κάτι τέτοιο, χωρίς τη χρήση δεσμεύσεων, αφενός θα είχε πολύ μεγάλο υπολογιστικό κόστος και αφετέρου τα αποτελέσματα της διαδικασίας δεν θα ήταν το ίδιο αξιόπιστα. Για τους λόγους αυτούς, συνήθως κατά την εφαρμογή αλγορίθμων πυκνής συνταύτισης, στα στερεοζεύγη γίνεται επιπολική επανασύσταση.

3.3 Επιπολική επανασύσταση

Στο σημείο αυτό θα γίνει αναφορά στη βασική ιδέα της επιπολικής επανασύστασης ενός στερεοζεύγους χωρίς να αναφερθούν τα επιμέρους βήματα για την ολοκληρωμένη δημιουργία των νέων εικόνων, καθώς κάτι τέτοιο ξεφεύγει από το πλαίσιο της εργασίας. Η διαδικασία της επιπολικής επανασύστασης αφορά στον μετασχηματισμό ενός ζεύγους επικαλυπτόμενων εικόνων στο σύστημα της βάσης. Συγκεκριμένα οι δύο άξονες λήψης γίνονται παράλληλοι μεταξύ τους και κάθετοι στη βάση λήψης (Αδάμ, 2011). Για τη διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη η γνώση του εσωτερικού προσανατολισμού και του εξωτερικού ή του σχετικού.

Πρώτο βήμα είναι η κάθε εικόνα να στραφεί κατά τον ανάστροφο πίνακα στροφής της (R_1^T, R_2^T) προκειμένου να αποκτήσει μοναδιαίο πίνακα στροφής ως προς το γεωδαιτικό σύστημα, αν είναι γνωστός ο εξωτερικός προσανατολισμός τους, ή ως προς το σύστημα της αριστερής εικόνας, αν είναι γνωστός ο σχετικός τους προσανατολισμός, αφού συνήθως αυτός υπολογίζεται ως η στροφή της δεξιάς εικόνας ως προς την αριστερή. Άρα, στην περίπτωση που η επιπολική επανασύσταση πραγματοποιείται με γνωστό τον σχετικό προσανατολισμό, η αριστερή εικόνα στο πρώτο βήμα θα παραμείνει ως είναι ($R_1 = I$) και θα στραφεί μόνο η δεξιά. Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του πίνακα στροφής της βάσης του στερεοζεύγους στο χρησιμοποιούμενο σύστημα αναφοράς (R_B) βάσει του οποίου μετασχηματίζονται και οι δύο εικόνες στο σύστημα της βάσης ($R_{N1} = R_B R_1^T$ και $R_{N2} = R_B R_2^T$ ή $R_{N1} = R_B$ και $R_{N2} = R_B R^T$ αν είναι γνωστός ο σχετικός προσανατολισμός αντί του εξωτερικού) (Κύρκου, 2015). Αποτέλεσμα της επιπολικής επανασύστασης είναι τα ζεύγη των ομόλογων επιπολικών ευθειών να είναι συνευθειακά και να ταυτίζονται με τις σειρές της ψηφιακής εικόνας. Να σημειωθεί ότι κατά την αναζήτηση ομολογιών το ψηφιακό παράθυρο αναζήτησης, στην πράξη, δεν περιορίζεται μόνο σε μία σειρά της εικόνας αναζήτησης γιατί εναπομέναντα σφάλματα των προσανατολισμών δεν επιτρέπουν πολλές φορές την πλήρη εξάλειψη της γ παράλλαξης.



Εικόνα 10: Στερεοζεύγος πριν και μετά τη διαδικασία επιπολικής επανασύστασης (πηγή : Καρράς, διαφάνειες Φωτογραμμετρίας III).

3.4 Ψηφιακή συνταύτιση εικόνων

Με τον όρο συνταύτιση εννοείται η εύρεση αντιστοιχίας μεταξύ των στοιχείων δύο συνόλων, παραδείγματος χάρη δύο εικόνων, όπως στην περίπτωση της ψηφιακής συνταύτισης εικόνων. Η τελευταία πρόκειται για τη αυτόματη αποκατάσταση ομολογιών ανάμεσα σε δύο (stereo-matching) ή περισσότερες εικόνες (multiple-view matching). Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα της ψηφιακής συνταύτισης εικόνας ανάγεται στη διαδικασία εύρεσης σε μία εικόνα (εικόνα αναζήτησης, συνήθως η δεξιά του ζεύγους) του ομόλογου σημείου p' ενός σημείου p που βρίσκεται σε μία άλλη εικόνα (εικόνα αναφοράς, συνήθως η αριστερή του ζεύγους) (Φλωρίδη, 2013).

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι είναι αναγκαίο οι εικόνες προς συνταύτιση να έχουν επικαλυπτόμενο κομμάτι. Είναι πιθανό παρ' όλα αυτά, ακόμα και όταν υπάρχει επαρκής επικάλυψη, ορισμένα σημεία της μίας εικόνας να μην είναι ορατά στην άλλη. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, όπως η στροφή μεταξύ των εικόνων που μεταβάλλει τις εκάστοτε αποκρύψεις ή ακόμα και ένα κινούμενο αντικείμενο που βρέθηκε τυχαία στη σκηνή. Ακόμα, είναι δυνατό στη σκηνή να υπάρχουν επαναλαμβανόμενα πρότυπα, με αποτέλεσμα σε ένα σημείο της εικόνας αναφοράς να μην αντιστοιχίζεται μόνο ένα ομόλογο σημείο από την εικόνα αναζήτησης. Πολλές φορές η ύπαρξη έστω και μικρού θορύβου μπορεί να μεταβάλλει τα αποτελέσματα μίας διαδικασίας συνταύτισης. Τα προβλήματα αυτά, δηλαδή η πιθανότητα μη ύπαρξης ομόλογου σημείου, η πιθανότητα μη μοναδικότητας του ομόλογου σημείου και η μη σταθερότητα των αποτελεσμάτων με μικρή διαφοροποίηση των δεδομένων συντελούν στην κατάταξη του προβλήματος της ψηφιακής συνταύτισης εικόνας στη κατηγορία των "ελλιπώς ορισμένων" προβλημάτων (ill-posed problems), γεγονός το οποίο σημαίνει ότι είναι δυνατό να μην έχουν (Φλωρίδη, 2013):

- καμία λύση (π.χ. λόγω αποκρύψεων)
- μοναδική λύση (π.χ. λόγω επαναλαμβανόμενου μοτίβου)
- σταθερή λύση (π.χ. λόγω θορύβου)

Τα θεμελιώδη στοιχεία που εξετάζουν και συγκρίνουν οι διάφοροι αλγόριθμοι συνταύτισης προκειμένου να βρεθούν οι ομολογίες μεταξύ των εικόνων είναι τα εικονοστοιχεία. Η χρήση του πληθυντικού δεν είναι τυχαία καθώς ένα εικονοστοιχείο από μόνο του, πολλές φορές δεν είναι ικανό να αποτελέσει το απόλυτο πρότυπο συνταύτισης. Αυτό είναι λογικό αφού η πληροφορία που φέρει ένα μεμονωμένο εικονοστοιχείο είναι μόνο η τιμή του χρώματός του ή η ένταση του γκρίζου τόνου όταν πρόκειται για ασπρόμαυρες φωτογραφίες. Είναι προφανές ότι σε μία εικόνα περισσότερα από ένα εικονοστοιχεία θα έχουν το ίδιο χρώμα και έτσι δεν είναι εύκολο να ταυτιστεί το καθένα. Για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων συνήθως ως πρότυπο συνταύτισης επιλέγεται ένα σύνολο εικονοψηφίδων.

3.4.1 Είδη ψηφιακής συνταύτισης

Ανάλογα με το είδος του προτύπου που επιλέγεται να συνταυτιστεί, το πρόβλημα της ψηφιακής συνταύτισης εικόνων μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως εξής: τη *συνταύτιση χαρακτηριστικών* (feature-based matching) και την *επιφανειακή συνταύτιση* (area-based matching). Στη συνταύτιση χαρακτηριστικών ως πρότυπο αναζήτησης ορίζονται χαρακτηριστικά όπως σημεία, γραμμές, ευθείες και ακμές, με την προϋπόθεση ότι πληρούν κάποιες γενικές απαιτήσεις. Τέτοιες απαιτήσεις είναι η σταθερότητα σχετικά με το θόρυβο, η μοναδικότητα σε σύγκριση με άλλα πρότυπα, η μη μεταβολή τους γεωμετρικά και ραδιομετρικά και τέλος η διακριτότητά τους σε σχέση με το περιβάλλον τους (Φλωρίδη, 2013). Σκοπός δηλαδή αυτής της μεθόδου συνταύτισης είναι να βρεθούν τα ομόλογα σημεία χαρακτηριστικών σημείων της εικόνας αναφοράς και όχι όλων των σημείων της. Για το λόγο αυτό η συνταύτιση χαρακτηριστικών συχνά αναφέρεται και ως αραιή συνταύτιση. Στην επιφανειακή συνταύτιση ως πρότυπο χρησιμοποιείται μία εικονοψηφίδα γύρω από την οποία σχηματίζεται ένα παράθυρο προς αναζήτηση. Αντίθετα με την συνταύτιση

χαρακτηριστικών, στόχος της επιφανειακής είναι η εύρεση των ομολογιών μεταξύ όλων των εικονοστοιχείων της εικόνας αναφοράς και για αυτό καλείται και πυκνή συνταύτιση. Γενικότερα, η ψηφιακή συνταύτιση χρησιμοποιείται πολλές φορές για την αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού ενός στερεοζεύγους.

3.4.2 Αλγόριθμοι ψηφιακής συνταύτισης

Κάθε είδος ψηφιακής συνταύτισης ακολουθεί μία αλληλουχία γενικών βημάτων τα οποία θα παρουσιαστούν στη συνέχεια συνοπτικά. Κατά τη συνταύτιση χαρακτηριστικών οι οντότητες προς συνταύτιση είναι χαρακτηριστικά σημεία της εικόνας τα οποία διακρίνονται από ορισμένες ιδιότητες που περιεγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Πρώτο βήμα λοιπόν των αλγορίθμων αραιής συνταύτισης είναι ο εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων σε κάθε εικόνα ξεχωριστά. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνοδεύονται και από ορισμένες περιγραφικές ιδιότητες (attributes). Σε δεύτερο στάδιο, γίνεται συνταύτιση των χαρακτηριστικών υπολογίζοντας ένα μέτρο ομοιότητας μεταξύ των ιδιοτήτων τους, δηλαδή η αναζήτηση ομολογιών περιορίζεται στις δύο λίστες περιγραφικών χαρακτηριστικών και δεν γίνεται σε όλη την εικόνα, γεγονός που μειώνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας (Κυπαρίσση, 2011).

Δύο ευρέως διαδεδομένοι αλγόριθμοι για την ανίχνευση και περιγραφή χαρακτηριστικών σημείων σε εικόνες είναι ο SIFT (Scale Invariant Feature Transform) και ο SURF (Speeded Up Robust Features).

Αλγόριθμος SIFT

Ο αλγόριθμος SIFT αποτελείται από έναν ανιχνευτή (detector) και έναν περιγραφέα (descriptor) χαρακτηριστικών σημείων. Καθώς η συνταύτιση αφορά δύο διαφορετικές εικόνες, είναι λογικό να υπάρχει διαφοροποίηση ως προς την κλίμακά τους. Για να είναι λοιπόν ο αλγόριθμος ανεξάρτητος της κλίμακας δημιουργεί ένα νέο σύνολο εικόνων που είναι όμοιο με την πυραμίδα εικόνων, όμως αντί για απλή διαφορά κλίμακας στις εικόνες της πυραμίδας, εφαρμόζεται το φίλτρο Laplacian of Gaussian, οποίο είναι μία διαφορά φίλτρων Gauss με διαφορετικές τιμές σ της καμπύλης κάθε φορά. Η ανίχνευση των σημείων ενδιαφέροντος γίνεται σε αυτόν τον χώρο κλιμάκωσης. Κάθε σημείο που εντοπίζεται συνοδεύεται και από έναν περιγραφέα, ο οποίος προκύπτει από ένα σύνολο εικονοστοιχείων γύρω από αυτό (Αρώνη, 2018).

Αλγόριθμος SURF

Ο αλγόριθμος αυτός, όπως προδίδει και το όνομά του («ταχύτερα υπολογιζόμενων εύρωστων χαρακτηριστικών») έχει κοινά χαρακτηριστικά με αυτούς που προτάθηκαν πριν από αυτόν, αλλά παρουσιάζει καλύτερες αποδόσεις σε μικρότερους χρόνους. Και αυτός αποτελείται από έναν ανιχνευτή και έναν περιγραφέα και τα σημεία ενδιαφέροντος που εντοπίζονται είναι όσο ο δυνατόν ανεξάρτητα από κλίμακα, θόρυβο κ.τ.λ. Η αναζήτηση των σημείων γίνεται σε μία μορφή παρόμοια με πυραμίδα εικόνων όμως δημιουργείται με εξομάλυνση των εικόνων, με κάθε επίπεδο να αποτελεί την αρχική τιμή για το επόμενο. Με αυτό τον τρόπο η εικόνα προς τα ψηλότερα επίπεδα της πυραμίδας δεν μικραίνει ως προς την κλίμακα αλλά μεγαλώνει το μέγεθος του φίλτρου. Η ανίχνευση γίνεται με τη χρήση ενός κυκλικού

ανιχνευτή στο εσωτερικό του οποίου υπολογίζεται ο Εσσιανός πίνακας E. Η ορίζουσά του χρησιμοποιείται ως μέτρο υπολογισμού των διαφοροποιήσεων εντός του κύκλου. Η μέγιστη ορίζουσα σημαίνει και μέγιστη διαφοροποίηση (Αρώνη, 2018).

Αλγόριθμοι επιφανειακής συνταύτισης

Οι αλγόριθμοι επιφανειακής συνταύτισης διακρίνονται σε τοπικούς (local), καθολικούς (global) και ημι-καθολικούς (semi-global) ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιούν για την εύρεση των ομολογιών. Πέραν ορισμένων διαφορών, τα τρία είδη αλγορίθμων σε γενικές γραμμές αποτελούνται από τέσσερα βήματα, τα οποία συνοψίζονται παρακάτω (Μαλτέζος, 2013) :

1. Υπολογισμός του κόστους συσχέτισης
2. Υπολογισμός του αθροίσματος του συνολικού κόστους που προκύπτει από τα επιμέρους κόστη κάθε εικονοψηφίδας εντός του ορισμένου παραθύρου
3. Υπολογισμός παράλλαξης
4. Βελτιστοποίηση παράλλαξης

Στους τοπικούς αλγορίθμους ο υπολογισμός του κόστους συσχέτισης γίνεται κυρίως με τη χρήση ψηφιακών παραθύρων εκμεταλλευόμενοι τη γειτονική περιοχή περί του κάθε εικονοστοιχείου και υπολογίζοντας στο τέλος ένα συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης. Αντίθετα, οι καθολικοί αλγόριθμοι επιλύουν το πρόβλημα εύρεσης ομολογιών ως ένα συνολικό πρόβλημα για όλη την εικόνα. Έτσι, στους καθολικούς αλγορίθμους η διαδικασία συσσωμάτωσης αγνοείται και ο υπολογισμός του κόστους συσχέτισης γίνεται σε επίπεδο εικονοψηφίδας μέσω μίας καθολικής συνάρτησης $E(d)$. Ο ημι-καθολικός αλγόριθμος αποτελεί μία προσέγγιση ανάμεσα στον τοπικό και τον καθολικό επιδιώκοντας να ελαχιστοποιήσει μία καθολική συνάρτηση ενέργειας με ανεξάρτητη μεταβλητή την ψηφιακή παράλλαξη d , όπως και οι καθολικοί αλγόριθμοι. Το κόστος και σε αυτή τη μέθοδο υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε εικονοψηφίδα. Για την παρούσα εργασία ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ημι-καθολικός, οποίος θα αναλυθεί παραπάνω στη συνέχεια. Προτού να γίνει αυτό όμως είναι σημαντικό να αναφερθούν, έστω συνοπτικά, οι διάφορες μέθοδοι υπολογισμού του κόστους συσχέτισης.

3.4.3 Μέθοδοι υπολογισμού κόστους συσχέτισης

Αρχικά να διευκρινιστεί ότι ως κόστος συσχέτισης θεωρείται στην ουσία ένα μέτρο σύγκρισης μεταξύ των εικονοψηφίδων ή των ψηφιακών παραθύρων που έχουν οριστεί. Συγκρίνοντας τα πρότυπα συνταύτισης ως ομόλογα θα προκύψουν αυτά που έχουν το ελάχιστο ή το μέγιστο κόστος συσχέτισης, ανάλογα με τον τρόπο που αυτό υπολογίζεται.

• Απόλυτες & τετραγωνικές διαφορές

Μία από τις πιο συνήθεις μεθόδους υπολογισμού του κόστους συσχέτισης σε επίπεδο εικονοψηφίδας είναι οι απόλυτες διαφορές (Absolute Differences) των τιμών φωτεινότητάς τους ή τα τετράγωνα των διαφορών (Squared Differences) (Μαλτέζος, 2013). Και για τις δύο αυτές μεθόδους γίνεται η παραδοχή της ομοιότητας για ομόλογες εικονοψηφίδες. Με αυτή την παραδοχή τα ομόλογα σημεία θεωρούνται ότι έχουν ίδιες τιμές φωτεινότητας. Αυτό βέβαια δεν είναι απόλυτα

σωστό καθώς οι εικόνες έχουν ληφθεί από διαφορετικά σημεία και άρα οι συνθήκες φωτισμού έχουν αλλάξει από τη μία λήψη στην άλλη. Στις περιπτώσεις τοπικών αλγορίθμων που πραγματοποιείται συσσωμάτωση κόστους υπολογίζεται το άθροισμα των διαφορών είτε αυτές είναι απλές είτε τετραγωνικές.

Η μαθηματική έκφραση των απόλυτων διαφορών φαίνεται στη συνέχεια:

$$c(i, j) = |g'(i, j) - g''(i, j)|$$

όπου $c(i, j)$ το κόστος της εκάστοτε εικονοψηφίδας της εικόνας αναφοράς με την υπό εξέταση εικονοψηφίδα της εικόνας αναζήτησης, $g'(i, j)$ η τιμή έντασης του εικονοστοιχείου στην εικόνα αναφοράς και $g''(i, j)$ η τιμή έντασης στο εκάστοτε εξεταζόμενο εικονοστοιχείο της εικόνας αναζήτησης.

Η μαθηματική έκφραση του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών είναι:

$$c(g', g'') = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |g'(i, j) - g''(i, j)|$$

Κατά αντίστοιχο τρόπο υπολογίζεται και το κόστος συσχέτισης με τη μέθοδο των τετραγωνικών διαφορών με τη διαφορά προφανώς ότι η αφαίρεση των τιμών έντασης είναι υψωμένη στη δεύτερη δύναμη.

- **Συντελεστής συσχέτισης**

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού είναι ο συντελεστής συσχέτισης που χρησιμοποιείται συχνά από τις τοπικές μεθόδους. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα δείκτη ομοιότητας μεταξύ του παραθύρου αναφοράς και του παραθύρου αναζήτησης και μπορεί να πάρει τιμές από -1 ως 1 (Μαλτέζος, 2013). Η μηδενική τιμή σημαίνει ότι τα δύο παράθυρα είναι εντελώς ασυσχέτιστα ενώ οι τιμές -1 και 1 σημαίνουν την πλήρη συσχέτιση, αρνητική ή θετική αντίστοιχα. Η μαθηματική έκφραση του συντελεστή συσχέτισης παρουσιάζεται στη συνέχεια:

$$\rho = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \sigma_2} = \frac{\sum_{j=1}^N (g_1(i) - \bar{g}_1)(g_2(i) - \bar{g}_2)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (g_1(i) - \bar{g}_1)^2 \sum_{j=1}^N (g_2(i) - \bar{g}_2)^2}}$$

- **Μέθοδος ΒΤ**

Άλλη μέθοδος είναι η Birchfield & Tomasi, η οποία υπολογίζει το κόστος συσχέτισης μεταξύ δύο εικονοψηφίδων με χρήση γραμμικών παρεμβολών στις γειτονικές εικονοψηφίδες, συνήθως με τη μέθοδο των απόλυτων διαφορών. Παρόλο που η μέθοδος αυτή είναι περισσότερο περίπλοκη από τις απόλυτες διαφορές, το υπολογιστικό της κόστος δεν είναι ιδιαίτερα μεγαλύτερο από αυτό των απόλυτων διαφορών ενώ θεωρείται πιο αποτελεσματική για περιπτώσεις ασυνέχειας βάθους ή συνεχόμενων αντικειμένων (Μαλτέζος, 2013).

- **Αμοιβαία πληροφορία (Mutual Information - MI)**

Αυτή η μέθοδος υπολογισμού του κόστους συσχέτισης αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και σε εικόνες με σύνθετες ραδιομετρικές σχέσεις. Βασίζεται σε ολόκληρη την εικόνα σε επίπεδο εικονοψηφίδων και όχι σε ψηφιακά παράθυρα. Η αμοιβαία πληροφορία αποτελεί ένα μέτρο για την «ευθυγράμμιση» του μοντέλου που βασίζεται στο εύρος μίας κατανομής πιθανότητας δύο εικόνων (εντροπία H_i) και στην κοινή τους εντροπία ($H_{i1,i2}$). Οι εντροπίες H_{i1} , H_{i2} υπολογίζονται από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας P_i της κάθε εικόνας (Μαλτέζος, 2013).

3.4.4 Ημι-καθολικός αλγόριθμος

Ο ημι-καθολικός αλγόριθμος συνταύτισης εφαρμόζεται σε στερεοζεύγη με γνωστό εσωτερικό και εξωτερικό προσανατολισμό. Επίσης, οι φωτογραφίες που αποτελούν το ζεύγος είναι σημαντικό να είναι επιπολικές, δηλαδή να έχουν μετασχηματιστεί στην κανονική περίπτωση της γεωμετρίας τους στερεοζεύγους. Όπως και στους καθολικούς αλγορίθμους, χρησιμοποιούνται και εδώ οι πυραμίδες εικόνων προκειμένου να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος. Συγκεκριμένα υπολογίζονται ομολογίες στα πιο αδρά επίπεδα των πυραμίδων, στα οποία οι εικόνες είναι γενικευμένες και στη συνέχεια το αποτέλεσμα κάθε επιπέδου χρησιμοποιείται ως αρχική τιμή για το επόμενο, στο οποίο γίνεται ακριβέστερος έλεγχος.

Πρώτο βήμα του αλγορίθμου είναι ο υπολογισμός ενός αρχικού κόστους ομοιότητας C για κάθε εικονοψηφίδα p σε κάθε παράλλαξη d εντός του ορισμένου εύρους παραλλάξεων (Καρκάλου, 2015). Στον αλγόριθμο αυτόν δεν χρησιμοποιούνται ψηφιακά παράθυρα αλλά ο υπολογισμός του κόστους γίνεται για κάθε μία εικονοψηφίδα ξεχωριστά. Εν αντιθέσει με τον καθολικό αλγόριθμο ο οποίος επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει τη συνάρτηση ενέργειας για ολόκληρη την εικόνα, ο ημικαθολικός το κάνει ελέγχοντας 8 ή 16 διευθύνσεις γύρω από την εκάστοτε εικονοψηφίδα (Αρώνη, 2018). Με αυτό τον τρόπο ελαττώνεται σημαντικά ο υπολογιστικός φόρτος. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του κόστους συσχέτισης είναι συνήθως μία από τις εξής προαναφερθείσες : Απόλυτες Διαφορές (AD), BT, Mutual Information (MI) και επίσης οι μη παραμετρικοί μετασχηματισμοί Rank ή Census (Καρκάλου, 2015). Αυτή που συνήθως προτιμάται είναι η Αμοιβαία Πληροφορία (MI) γιατί έχει τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει περίπλοκες εικόνες όσον αφορά στο περιεχόμενο τους αλλά και στον φωτισμό και τη γεωμετρία τους (Gehrke, et al.).

Για την εύρεση της βέλτιστης παράλλαξης σε κάθε εικονοψηφίδα, και άρα τελικά της ομόλογής εικονοψηφίδας της, διαμορφώνεται μία συνάρτηση κόστους, με ανεξάρτητη μεταβλητή την ψηφιακή παράλλαξη d , όπως και στους καθολικούς αλγορίθμους. Η διατύπωση της συνάρτησης είναι:

$$E(d) = \sum_p (C(p, d_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|d_p - d_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|d_p - d_q| > 1])$$

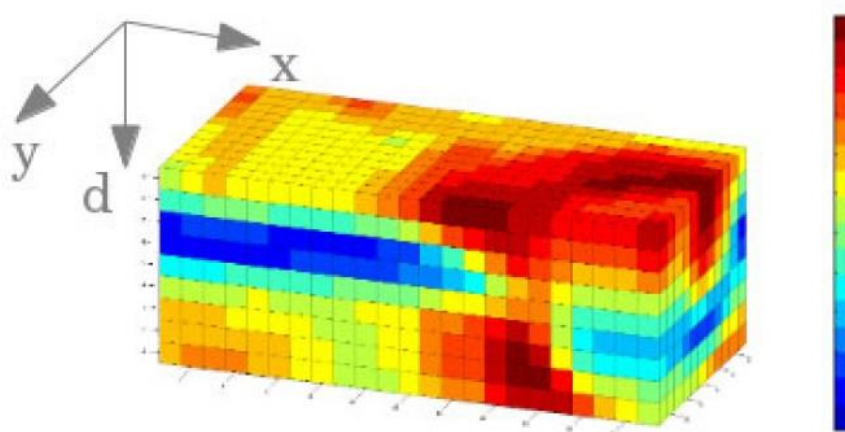
Ο πρώτος όρος της συνάρτησης αθροίζει όλα τα ανά pixel κόστη συσχέτισης για όλη την εικόνα ενώ ο δεύτερος όρος και ο τρίτος προσθέτουν ποινές για όλα τα εικονοστοιχεία που τα γειτονικά τους έχουν διαφορετική παράλλαξη. Συγκεκριμένα, ο δεύτερος όρος προσθέτει μια σταθερή ποινή P_1 για όλες τις εικονοψηφίδες q στη

γειτονιά της εικονοψηφίδας p , στις οποίες η παράλλαξη αλλάζει λίγο (πχ. 1 pixel). Ο τρίτος όρος προσθέτει μία σταθερή ποινή $P2$, η οποία είναι μεγαλύτερη από την πρώτη, αν η παράλλαξη αλλάζει περισσότερο. Με αυτό τον τρόπο οι ασυνέχειες βάθους επιτρέπονται αν η ανά pixel συνταύτιση είναι δυνατότερη από την ποινή, δηλαδή αν η υφή υποδηλώνει ασυνέχεια βάθους. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι ο δεύτερος όρος εμμέσως συνδέει όλα τα εικονοστοιχεία μεταξύ τους και έτσι κάνει τη συνάρτηση καθολική (global) (Hirschmuller).

Ζητούμενο είναι η εύρεση του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση ενέργειας. Αυτό μπορεί να μεταφραστεί ως η εύρεση, για κάθε εικονοψηφίδα, της παράλλαξης στην οποία παρουσιάζεται το ελάχιστο κόστος και άρα επιτυγχάνεται η βέλτιστη συνταύτιση (Καρκάλου, 2015). Επειδή όμως κάτι τέτοιο είναι υπολογιστικά πολύ δύσκολο να επιτευχθεί, έχει προταθεί να υπολογίζεται ένα τελικό συσσωματωμένο κόστος. Το τελικό αυτό κόστος υπολογίζεται ως το άθροισμα του κόστους από κάθε κατεύθυνση χωρίς βάρη. Συνήθως επιλέγονται 8 κατευθύνσεις. Αυτή η διαδικασία αποτελεί το δεύτερο βήμα της γενικής μορφής των ημι-καθολικών αλγορίθμων συνταύτισης.

Το τρίτο βήμα αποτελείται από τον υπολογισμό της παράλλαξης. Όπως και στους τοπικούς αλγορίθμους, η παράλλαξη d για κάθε εικονοψηφίδα p που τελικά επιλέγεται αντιστοιχεί στο ελάχιστο συσσωματωμένο κόστος.

Η συνάρτηση $E(d)$ μπορεί να αναπαρασταθεί από μία δομή δεδομένων που ονομάζεται *εικόνα του χώρου των ψηφιακών παραλλάξεων* (Disparity Space Image – DSI). Αυτή η δομή στην ουσία πρόκειται για έναν τρισδιάστατο πίνακα με στήλες την τετμημένη της εικονοψηφίδας (x), σειρές την τεταγμένη (y) και βάθος την παράλλαξη (d) και κάθε στοιχείο του αντιπροσωπεύει την τιμή που επιστρέφει η εκάστοτε συνάρτηση κόστους για κάθε εικονοψηφίδα (x,y) ανά κάθε πιθανή παράλλαξη (d) (Φλωρίδη, 2013). Για καλύτερη κατανόηση αυτού που περιεγράφηκε ακολουθεί η εικόνα 11.



Εικόνα 11: Οπτικοποίηση του χώρου των ψηφιακών παραλλάξεων (Φλωρίδη, 2013).

Κεφάλαιο 4^ο: Εφαρμογή

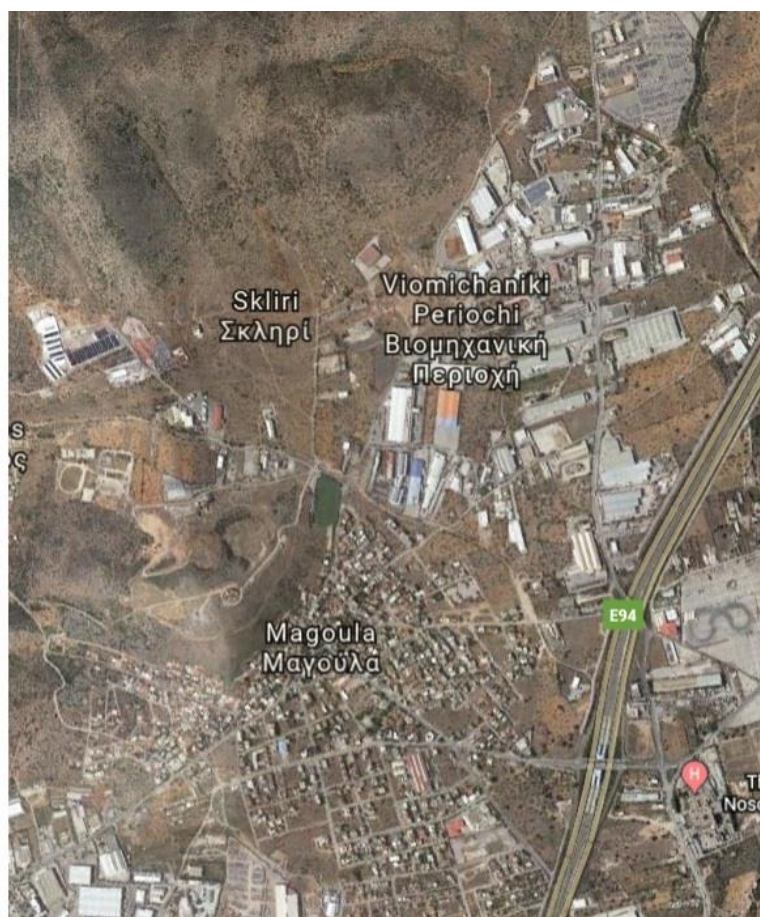
Στην αρχή του κεφαλαίου αυτού περιγράφονται η περιοχή μελέτης και τα αρχικά δεδομένα. Στη συνέχεια, γίνεται αναλυτική παρουσίαση κάθε σταδίου για την δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου. Γίνεται αναφορά στα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν, τις παραμέτρους που επιλέχθηκαν, παρουσιάζονται εικόνες από τα αποτελέσματα και επισημαίνονται τα σημεία που προκάλεσαν δυσκολίες.

4.1 Περιοχή μελέτης

Τα αρχικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εργασία αυτή ήταν ένα μπλοκ αεροφωτογραφιών, αποτελούμενο από 29 φωτογραφίες, οι οποίες απεικονίζουν τους οικισμούς της Μάνδρας και της Μαγούλας, καθώς και περιοχές γύρω από αυτούς. Λόγω του μεγάλου υπολογιστικού κόστους που θα επιβάρυνε τα εκάστοτε βήματα της επεξεργασίας των δεδομένων, θεωρήθηκε καταλληλότερο να επιλεγθεί ένας μικρότερος αριθμός αεροφωτογραφιών οι οποίες θα απεικονίζουν μικρότερη περιοχή. Η επιλογή της περιοχής έγινε με βασικό κριτήριο να περιλαμβάνει όσο το δυνατόν τις διαφορετικές καλύψεις γης που υπάρχουν στην ευρύτερη περιοχή. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στον δήμο Μάνδρας και στον δήμο Ελευσίνας στεγάζονται πολλές εκτεταμένες εγκαταστάσεις εφοδιαστικής (logistics). Άρα λοιπόν, ένα μεγάλο μέρος αυτών των περιοχών καλύπτεται από ογκώδη, βιομηχανικού τύπου κτίρια. Ένα μικρότερο μέρος τους καταλαμβάνουν οι κατοικίες και φυσικά το υπόλοιπο οι δρόμοι, το γυμνό έδαφος και η βλάστηση. Το υποσύνολο της περιοχής που τελικά επιλέχθηκε για την εφαρμογή απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα [12] και αποτελείται από τον οικισμό της Μαγούλας, τη βιομηχανική περιοχή που βρίσκεται βορειοανατολικά αυτού, τον λόφο του Προφήτη Ηλία, μέρος της Αττικής Οδού, βιομηχανικές εγκαταστάσεις νότια του οικισμού και το Θριάσιο Γενικό Νοσοκομείο Ελευσίνας. Το εμβαδό της είναι περίπου 8,8 τετραγωνικά χιλιόμετρα.

Τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, όπως το είδος βλάστησης, η μορφολογία του εδάφους αλλά και οι ανθρώπινες παρεμβάσεις, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επεξεργασία των δεδομένων για τη δημιουργία του ΨΜΕ και την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου. Όσον αφορά στη βλάστηση, αυτή χαρακτηρίζεται αραιή, κυρίως χαμηλή. Συγκριτικά με την εγγύς περιοχή, όπου ιδίως στο Όρος Πατέρας η βλάστηση είναι ιδιαίτερα πλούσια και πυκνή, εδώ παρατηρείται το αντίθετο. Στο βόρειο κομμάτι της περιοχής μελέτης, το 2009, κοντά στην καπνοβιομηχανία Παπαστράτος, είχε εκδηλωθεί πυρκαγιά, αφήνοντας το έδαφος γυμνό ενώ από προηγούμενες καταγραφές προκύπτει ότι υπήρχε θαμνώδης βλάστηση. Επίσης, σε γειτονικές περιοχές, λόγω πυρκαγιών, έχουν χαθεί δασικές εκτάσεις. Το ανάγλυφο της περιοχής δεν παρουσιάζει πολύ απότομες υψομετρικές μεταβολές. Στα βόρεια αποτελείται από λόφους με ήπιες κλίσεις ενώ στα νότια και στα ανατολικά το έδαφος είναι κατά κύριο λόγο επίπεδο. Σε αυτά τα τμήματα βρίσκονται ο κύριος οικισμός και βιομηχανικές εγκαταστάσεις αντίστοιχα. Περίπου στο κέντρο της περιοχής υπάρχει ένας ακόμα λόφος, ο λόφος του προφήτη Ηλία. Σχετικά με τις κατασκευές, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω υπάρχουν αρκετά βιομηχανικά κτίρια αλλά και κατοικίες. Οι κατοικίες, με φωτοερμηνευτική διαδικασία φαίνονται να είναι πλακοσκεπές και κεραμοσκεπές. Οι κεραμοσκεπές δημιούργησαν δυσκολίες στην επεξεργασία των

δεδομένων γιατί είχαν παρόμοια συμπεριφορά με το έδαφος στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι, γεγονός που θα εξεταστεί αναλυτικότερα στη συνέχεια.



Εικόνα 12: Περιοχή μελέτης (πηγή : Google Earth).

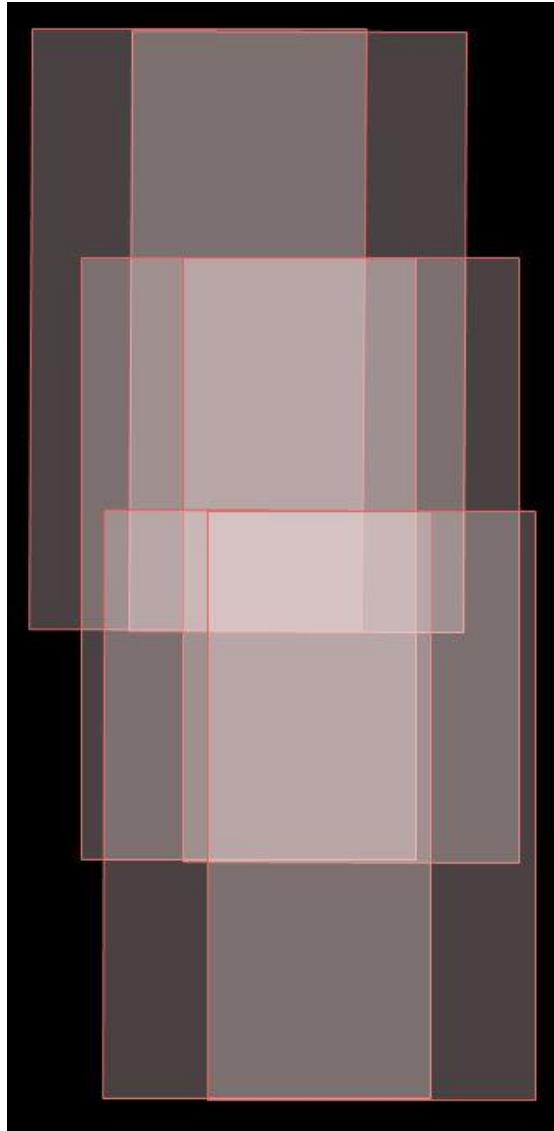
Στόχος της εργασίας δεν είναι μία πλήρης υδρολογική μελέτη της περιοχής όπως άλλωστε διευκρινίστηκε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο, αλλά η χρήση και διερεύνηση τεχνικών για την απόδοση του υδρογραφικού δικτύου της. Παρ' όλα αυτά θα ήταν παράλειψη να μην γίνει αναφορά στο διαχρονικό πρόβλημα πλημμυρών που αντιμετωπίζουν κάποιες περιοχές της δυτικής Αττικής. Συγκεκριμένα ο δήμος Μάνδρας και ο δήμος Ελευσίνας, στον οποίο ανήκει και η Μαγούλα, έχουν υποστεί πολλές καταστροφές από πλημμυρικά γεγονότα. Τα πιο πρόσφατα ήταν αυτά του Νοεμβρίου 2017 και του Ιουνίου 2018. Αρκετοί επιστήμονες και οι αρμόδιες αρχές εντοπίζουν τις αιτίες των καταστροφών αυτών σε μία σειρά γεγονότων. Το ίδιο το γεγονός της βροχής και στις δύο περιπτώσεις ήταν ραγδαίο με λογική συνέπεια την αύξηση της ροής στις κοίτες των ρευμάτων. Η αυξημένη λοιπόν ροή των ρευμάτων σε συνδυασμό με αυθαίρετες παρεμβάσεις, κακή διαχείριση των ρευμάτων (π.χ. μπαζώματα), τα ελλιπή αντιπλημμυρικά μέτρα καθώς και οι στενές εκβολές των ρευμάτων οδηγεί στην υπερχειλίση τους, δηλαδή την πλημμύρα. Ακόμη ένας σημαντικός παράγοντας για τις πλημμύρες εντοπίζεται στο φαινόμενο των πυρκαγιών, οι οποίες οδηγούν στην καταστροφή της βλάστησης και κατ' επέκταση στην μείωση της ποσότητας των υδάτων που απορροφάται από αυτήν υπό κανονικές συνθήκες.

4.2 Δεδομένα

Τα αρχικά δεδομένα ήταν 29 αεροφωτογραφίες από την ευρύτερη περιοχή της Μάνδρας μαζί με τον εσωτερικό προσανατολισμό της μηχανής (πίνακας 1) και τον εξωτερικό προσανατολισμό των εικόνων. Η γεωαναφορά των εικόνων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο του αεροτριγωνισμού, στον οποίο συμμετείχαν συνολικά 2.128 φωτογραφίες και χρησιμοποιήθηκαν 136 φωτοσταθερά και 85 σημεία ελέγχου. Τα υπόλοιπα των σφαλμάτων από τη διαδικασία της συνόρθωσης του μπλοκ φαίνονται στον πίνακα 2.

Οι φωτογραφίες που τελικά χρησιμοποιήθηκαν ήταν έξι και αφού έγινε η συνταύτιση, τα νέφη που εκμεταλλεύτηκαν για τη δημιουργία του ΨΜΕ ήταν τέσσερα και πρόκεινται για νέφη που προέκυψαν από κατά πλάτος επικάλυψη των αεροφωτογραφιών.

Η μηχανή με την οποία έγινε η αεροφωτογράφιση καταγράφει την ακτινοβολία σε τέσσερα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος : το κόκκινο (RED), το πράσινο (GREEN), το μπλε (BLUE) και το εγγύς υπέρυθρο (NEAR INFRARED). Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι κάθε αεροφωτογραφία διαθέτει τέσσερις (4) διαφορετικούς πίνακες ανακλαστικότητας. Οι πίνακες αυτοί δεν μπορούν να οπτικοποιηθούν παράλληλα, αλλά ο χρήστης πρέπει να επιλέξει ποιο τμήμα του φάσματος θα προβάλλει σε καθένα από τα τρία βασικά χρώματα. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να γίνουν διάφοροι συνδυασμοί, καθένας από τους οποίους εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς. Για παράδειγμα, στην εργασία αυτή ο συνδυασμός που χρησιμοποιήθηκε είναι ο 4-3-2, δηλαδή το εγγύς υπέρυθρο στη θέση του κόκκινου, το κόκκινο στη θέση του πράσινου και το πράσινο στη θέση του μπλε. Έτσι, κάθε στοιχείο που ανακλά υψηλά στο εγγύς υπέρυθρο θα εμφανίζεται κόκκινο στη φωτογραφία. Η χρησιμότητα αυτού του συνδυασμού καναλιών έγκειται στο γεγονός ότι το εγγύς υπέρυθρο κανάλι δίνει τη δυνατότητα για εύκολο εντοπισμό της βλάστησης καθώς η τελευταία παρουσιάζει υψηλές τιμές σε αυτό.



Εικόνα 13: Επικάλυψη μεταξύ αεροφωτογραφιών.

Όσον αφορά στα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού, το μέγεθος του εικονοστοιχείου (pixel size) είναι 12μm και η σταθερά της μηχανής (c) είναι 120mm. Συγκεντρωτικά φαίνονται όλες οι παράμετροι στον πίνακα που ακολουθεί. Με δοσμένο τον εξωτερικό προσανατολισμό των εικόνων, δηλαδή τις συντεταγμένες των σημείων λήψης και τις στροφές του άξονα λήψης, προέκυψε ότι το μέσο υψόμετρο πτήσης για τις συγκεκριμένες φωτογραφίες ήταν τα 2650 m. Με τον όρο υψόμετρο πτήσης εννοείται η απόσταση του φακού της μηχανής από το επίπεδο αναφοράς. Γνωρίζοντας λοιπόν και το μέσο υψόμετρο της περιοχής, το οποίο είναι περίπου 84 m, υπολογίστηκε η μέση απόσταση λήψης στα 2566 m. Από τη βασική φωτογραμμετρική σχέση:

$$\frac{1}{k} = \frac{c}{H}$$

όπου k : ο συντελεστής κλίμακας, c : η σταθερά της μηχανής και H : η απόσταση λήψης προκύπτει ότι η μέση κλίμακα των επιλεγμένων εικόνων είναι 1:21380. Έχοντας υπολογίσει τη μέση κλίμακα και γνωρίζοντας τις διαστάσεις του pixel του αισθητήρα

(6μm) προκύπτει ότι το μέγεθος της εδαφοψηφίδας είναι περίπου 25 cm. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι κάθε εικονοστοιχείο της φωτογραφίας απεικονίζει μία περιοχή του εδάφους 25 x 25 cm².

Virtual Focal Length [mm]	120
Virtual Sensor Size [Pixel]	13824 x 7680
Virtual Pixel Size [μm]	12
Virtual Principle Point [mm]	$x_p = 0.0, y_p = 0.0$
Distortion Parameter	Distortion Free

Πίνακας 1: Στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού.

Parameter	Omega	Phi	Kappa	XY
RMS Control	0.033	0.030	0.040	0.032
RMS Check	0.047	0.047	0.072	0.047

Πίνακας 2: Υπόλοιπα σφαλμάτων από τη συνόρθωση.

Πέραν των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του μοντέλου εδάφους και κατ' επέκταση του υδρογραφικού δικτύου, ήταν αναγκαία και η ύπαρξη δεδομένων για την αξιολόγηση τους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακά μοντέλα εδάφους της περιοχής από το Εθνικό Κτηματολόγιο με ανάλυση 2m. Ακόμα, χρησιμοποιήθηκαν τοπογραφικά διαγράμματα της Γ.Υ.Σ., κλίμακας 1:5000. Τα διαγράμματα εκπονήθηκαν τέλη της δεκαετίας 1960 και προφανώς πρόκεινται για αναλογικής μορφής τα όποια έχουν σαρωθεί. Λόγω όμως του γεγονότος ότι έχουν παραχθεί με φωτογραμμετρικές μεθόδους θεωρούνται υψηλότερης ακρίβειας. Με βάση αυτούς τους σαρωμένους χάρτες έγινε η ψηφιοποίηση των ρεμάτων της περιοχής για να συγκριθούν με το παραγόμενο υδρογραφικό δίκτυο. Να αναφερθεί ότι οι μετρήσεις είχαν γίνει στο σύστημα 3^ο και έτσι, πριν την έναρξη της ψηφιοποίησης, χρειάστηκε να γίνει μετασχηματισμός των συντεταγμένων στο σύστημα ΕΓΣΑ 87, προκειμένου όλα τα παράγωγα της εργασίας να έχουν κοινό σύστημα αναφοράς.

4.3 Ψηφιακή συνταύτιση

Τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, δηλαδή οι φωτογραφίες μαζί με τα στοιχεία εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού, αποτέλεσαν τα δεδομένα εισόδου για τη διαδικασία της ψηφιακής συνταύτισης που ακολούθησε. Η τελευταία εκτελέστηκε στο λογισμικό ERDAS IMAGINE της εταιρείας HEXAGON GEOSPATIAL με τη μέθοδο Semi Global Matching (SGM). Πρόκειται για έναν αλγόριθμο πυκνής συνταύτισης εικόνων ο οποίος έχει σαν αποτέλεσμα πυκνά νέφη σημείων με γνωστές συντεταγμένες στο σύστημα αναφοράς που έχουν υπολογιστεί και οι συντεταγμένες του εξωτερικού προσανατολισμού, δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση το ΕΓΣΑ 87. Οι φωτογραφίες που εν τέλει χρησιμοποιήθηκαν είναι έξι και τα νέφη τέσσερα και φαίνονται όλα μαζί στην εικόνα 13. Τα ακριβή βήματα του αλγορίθμου δεν είναι ανοιχτά προς τους χρήστες, καθώς πρόκειται για

εμπορικό και όχι ανοιχτό λογισμικό, αλλά η λογική ακολουθεί την περιγραφή που έγινε στο κεφάλαιο 3.

Στην αρχή εισάγονται οι φωτογραφίες και ορίζονται τα στοιχεία της κάμερας λήψης, δηλαδή τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού. Στη συνέχεια, για κάθε μία εικόνα εισάγονται τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού. Το λογισμικό δημιουργεί αυτόματα πυραμίδες εικόνων ώστε να διευκολυνθούν διάφορες αυτόματες διαδικασίες που παρέχει, όπως η πυκνή συνταύτιση. Έπειτα επιλέγεται η μέθοδος συνταύτισης που επιθυμεί ο χρήστης και τα αποτελέσματα είναι νέφη σημείων σε μορφή .las τα οποία προέρχονται ανά κάθε ζεύγος που η επικάλυψή του ξεπερνάει το 50%. Η επιλογή του ποσοστού επικάλυψης μπορεί να ρυθμιστεί από τον εκάστοτε χρήστη. Το λογισμικό αυτό παρέχει μεταξύ άλλων και τη δυνατότητα στερεοσκοπικής παρατήρησης, η οποία χρησιμοποιήθηκε σε μεταγενέστερο στάδιο για την επισκόπηση του εδάφους σε ορισμένα σημεία ενδιαφέροντος για το υδρογραφικό δίκτυο. Οι συντεταγμένες των σημείων των νεφών είναι στο ΕΓΣΑ 87. Για την προβολή των νεφών χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο λογισμικό Cloud Compare. Να διευκρινιστεί στο σημείο αυτό ότι τα νέφη σημείων μπορούν να αποθηκευτούν σε ποικίλους τύπους αρχείων, όπως .las, .ply, .txt κ.α. Το Cloud Compare δέχεται αρκετούς από αυτούς τους τύπους αρχείων έτσι πολλές φορές χρησιμοποιήθηκε για μετατροπές αρχείων.



Εικόνα 14: Νέφος σημείων της περιοχής μελέτης σε κανάλια 4-3-2.

4.4 Επεξεργασία νεφών: αφαίρεση θορύβου

Αφού ολοκληρώθηκε η συνταύτιση των εικόνων δημιουργήθηκαν τέσσερα νέφη σε μορφή .las, τα οποία αποτελούνταν από εκατομμύρια σημεία. Είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι λόγω του όγκου των δεδομένων, το υπολογιστικό κόστος για την επεξεργασία τους ως ενιαίο νέφος ήταν μεγάλο και έτσι προτιμήθηκε η ξεχωριστή επεξεργασία κάθε νέφους, χρησιμοποιώντας πάντα όμως τις ίδιες παραμέτρους για όλα τα στάδια. Αφού ολοκληρώθηκαν οι επεξεργασίες έγινε και η συνένωσή τους.

Πρώτη επεξεργασία ήταν η αφαίρεση του θορύβου από τα νέφη. Με τον όρο θόρυβο εννοούνται οι τυχόν συγκεντρώσεις σημείων σε θέσεις εκτός της σκηνής και οφείλονται κατά κύριο λόγο σε εσφαλμένες ομολογίες. Για την απομάκρυνση λοιπόν του θορύβου χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον του MATLAB και ειδικά η συνάρτηση

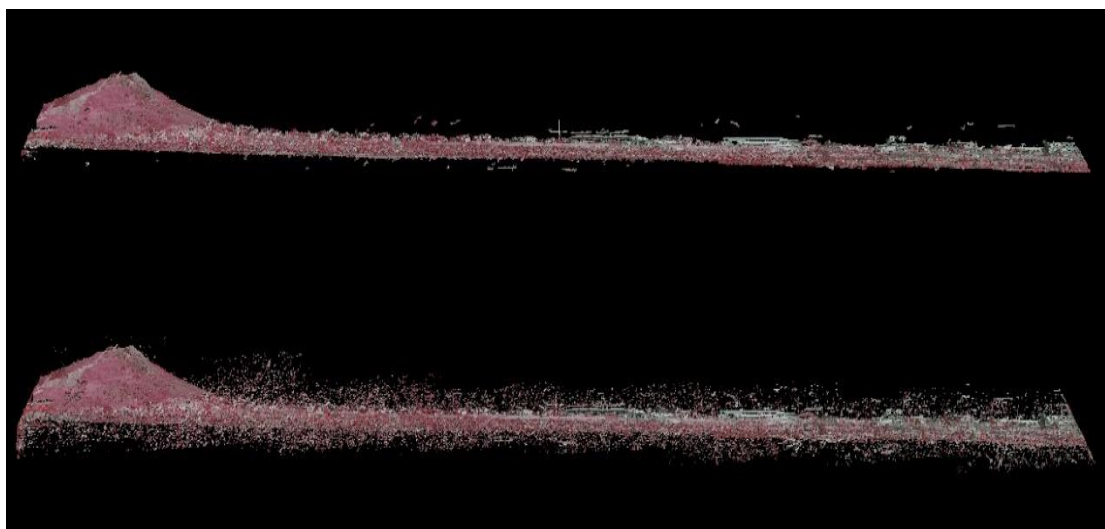
«pcdenoise» από τη βιβλιοθήκη Computer Vision System Toolbox. Η συνάρτηση αυτή δέχεται ως δεδομένο εισόδου ένα νέφος σημείων και επιστρέφει ένα νέο νέφος από το οποίο έχει αφαιρεθεί ο θόρυβος. Υπάρχουν διάφορες εκφράσεις και παράμετροι για τη συνάρτηση αυτή, αλλά η γενική έκφραση που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία είναι η ακόλουθη :

$$[ptCloudOut, ___] = pcdenoise(___Name, Value)$$

με την οποία στο πρώτο μέρος ορίζεται το όνομα του νέου νέφους που θα προκύψει και στο δεύτερο το νέφος το οποίο θα επεξεργαστεί καθώς και τα ζεύγη παραμέτρων με τις τιμές του βάσει των οποίων θα γίνει η επεξεργασία. Οι παράμετροι που καθόρισαν τον τρόπο με τον οποίο απομακρύνθηκε ο θόρυβος σχετίζονται με τον υπολογισμό της μέσης απόστασης των σημείων ανάμεσα σε ένα ορισμένο αριθμό γειτόνων. Έτσι, αφού έγιναν πειραματικά ορισμένες μετρήσεις αποστάσεων ανάμεσα σε γειτονικά σημεία προέκυψε ότι η απόστασή τους κυμαίνεται περίπου στα 0.5m. Έτσι λοιπόν, το κατώφλι για τη μέση απόσταση που μπορούν να έχουν τα σημεία και να μην θεωρηθούν θόρυβος τέθηκε στα 0.55m. Αρχική επιλογή ήταν τα 0.5m αλλά λόγω υπολογιστικού κόστους δεν μπόρεσε να ολοκληρωθεί η διαδικασία και έτσι επιλέχθηκε ένα κατώφλι πολύ λίγο μεγαλύτερο που πρακτικά δεν αλλοιώνει την ακρίβεια της διαδικασίας. Όσον αφορά στον αριθμό των σημείων για τα οποία θα υπολογιστεί η απόσταση τέθηκε στα 150. Είναι λογικό ότι όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο αριθμός τόσο πιο αυστηρά εκτελείται η αφαίρεση του θορύβου αφού ελέγχεται η απόσταση μεταξύ περισσότερων σημείων ενώ ισχύει το αντίθετο για το κατώφλι της απόστασης, αφού όσο μεγαλύτερη είναι τόσο πιο πιθανό να θεωρηθούν σημεία θορύβου ως σωστά σημεία. Έστω λοιπόν ένα νέφος A, η ολοκληρωμένη έκφραση της συνάρτησης με τις συγκεκριμένες παραμέτρους και τα κατώφλια που αναφέρθηκαν είναι :

$$[Adenoised] = pcdenoise (A, 'NumNeighbors', 150, 'Threshold', 0.55)$$

Το αποτέλεσμα, το οποίο παρουσιάζεται ενδεικτικά για το νέφος 4 στην εικόνα [15], ήταν αρκετά ικανοποιητικό, όμως σε κάποια νέφη παρατηρήθηκε να υπάρχουν ακόμα συγκεντρώσεις σημείων κάτω από το επίπεδο που αντιπροσωπεύει το έδαφος. Προφανώς τα σημεία αυτά ήταν εσφαλμένα τοποθετημένα στις θέσεις αυτές, αφού δεν είναι δυνατό να είναι ορατά από τις φωτογραφίες που συνταυτίστηκαν. Τα σημεία αυτά δεν απομακρύνθηκαν επιτυχώς με τη χρήση της παραπάνω συνάρτησης γιατί προφανώς δημιουργούσαν μεγάλες συγκεντρώσεις με τη μέση απόσταση μεταξύ τους να μην ξεπερνά τα 0.6 m, δηλαδή δεν καλύπταν τις προδιαγραφές που τεθήκαν για να θεωρηθούν εσφαλμένα σημεία. Με σκοπό να απαλειφθούν και αυτά τα εναπομείναντα σημεία θορύβου έγινε διαγραφή σημείων που είχαν χαμηλότερο υψόμετρο από 15m. Το όριο των 15m αποφασίστηκε βάσει δοκιμών ώστε να μην αφαιρούνται πραγματικά σημεία από το νέφος.



Εικόνα 15: Νέφος σημείων με θόρυβο (κάτω) και χωρίς θόρυβο (πάνω).

ΝΕΦΟΣ	ΑΡΧΙΚΟ ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙ ΤΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ ΠΛΗΘΟΥΣ ΣΗΜΕΙΩΝ
1	13.816.588	13.729.301	694	0.6%
2	13.646.972	13.510.503	680	1%
3	13.106.846	12.912.405	645	1.5%
4	12.412.178	12.233.106	615	1.4%

Πίνακας 3: Αποτελέσματα εφαρμογής αλγορίθμου αφαίρεσης θορύβου από τα νέφη

4.5 Επεξεργασία νεφών: δείκτης NDVI

Για την ταξινόμηση των διαφόρων αντικειμένων που απεικονίζονται σε μία εικόνα ή σε ένα νέφος σημείων, όπως στην προκειμένη περίπτωση, σημαντικές πληροφορίες αποτελούν οι συμπεριφορές τους στα διάφορα κανάλια. Πιο αναλυτικά, η κατανομή της ακτινοβολίας που εκπέμπει ή ανακλά ένα σώμα σε διάφορα μήκη κύματος είναι χαρακτηριστική της φυσικής και χημικής τους σύστασης. Η μελέτη αυτών των κατανομών είναι που τελικά επιτρέπει την ερμηνεία των διαφόρων αντικειμένων από τηλεπισκοπικές εικόνες (Ξενούλης, 2011).

Η βλάστηση εμφανίζει χαμηλές ραδιομετρικές τιμές στην περιοχή του ορατού φάσματος (0.4 – 0.7 μm) εξαιτίας της μεγάλης απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από τη χλωροφύλλη. Όμως στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου (0.7 – 1.3 μm) παρουσιάζει ισχυρή αύξηση της ανάκλασης λόγω της ελάχιστης ανακλαστικότητας της χλωροφύλλης. Για το λόγο αυτό, ο διαχωρισμός της βλάστησης από άλλα αντικείμενα στις εικόνες ή τα νέφη σημείων επιτυγχάνεται με τη χρήση δεικτών που χρησιμοποιούν τις ραδιομετρικές τιμές στο εγγύς υπέρυθρο.

Ένας τέτοιος δείκτης είναι ο Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), ο οποίος στην ουσία πρόκειται για έναν λόγο στον αριθμητή του οποίου είναι η διαφορά της ραδιομετρικής τιμής του ερυθρού καναλιού από το εγγύς υπέρυθρο ενώ στον παρονομαστή είναι το άθροισμά τους.

Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης επεξεργασίας των νεφών, την αφαίρεση δηλαδή του θορύβου στο περιβάλλον του MATLAB, ακολούθησε η δημιουργία του δείκτη NDVI και η κατωφλίωση των νεφών βάσει αυτού. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος στο ίδιο περιβάλλον.

Πρώτο βήμα για να υπολογιστεί η τιμή του δείκτη για κάθε σημείο του νέφους είναι να διαχωριστούν τα κανάλια και να αποθηκευτούν ως ξεχωριστοί πίνακες (NIR, RED και GREEN) με διαστάσεις $N \times 1$, όπου N ο αριθμός των σημείων σε κάθε νέφος. Είναι προφανές ότι για το ίδιο νέφος όλοι οι πίνακες που αντιπροσωπεύουν τις ραδιομετρικές τιμές των σημείων σε ένα κανάλι θα έχουν τις ίδιες διαστάσεις, αφού ο αριθμός των σημείων είναι κοινός. Με τον διαχωρισμό των καναλιών είναι εφικτές οι πράξεις μεταξύ τους ως πράξεις πινάκων, γεγονός αναγκαίο αφού ο δείκτης NDVI πρόκειται για τον λόγο $(NIR-RED)/(NIR+RED)$. Με το NIR συμβολίζεται η τιμή του εκάστοτε σημείου στο εγγύς υπέρυθρο και με το RED η τιμή του στο κόκκινο κανάλι.

Επόμενο βήμα είναι κατά τον ίδιο τρόπο να διαχωριστούν και οι συντεταγμένες των σημείων σε τρεις διαφορετικούς πίνακες : X,Y και Z. Με δεδομένα λοιπόν τον πίνακα με τις τιμές NDVI όλων των σημείων του νέφους, τους τρεις πίνακες με τις φασματικές τιμές σε κάθε κανάλι και τους τρεις πίνακες με τις συντεταγμένες, πρέπει να γίνει διαγραφή των σημείων που ξεπερνούν το κατώφλι του NDVI που έχει τεθεί, το οποίο αναλύεται μετέπειτα στην ενότητα αυτή.

Για την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων σημείων, αλλά και την διατήρηση του χρώματος των εναπομεινάντων, πρέπει να δημιουργηθούν δύο tables, μία δομή που μοιάζει με πίνακες (arrays) στο MATLAB. Το ένα θα περιέχει σαν στήλες τις συντεταγμένες (X,Y,Z) και τον δείκτη NDVI (table(1) = X|Y|Z|NDVI) ενώ το δεύτερο τις φασματικές τιμές και τον δείκτη NDVI (table(2) = NIR|RED|GREEN|NDVI). Και τα δύο περιέχουν τον δείκτη διότι αποτελεί το κριτήριο βάσει του οποίου διαγράφονται τα σημεία από το νέφος. Έτσι λοιπόν δημιουργούνται δύο λογικές συνθήκες που εκφράζουν ότι σε όποια γραμμή των tables η τιμή στην στήλη NDVI ξεπερνάει το κατώφλι θα διαγράφεται. Με αυτό τον τρόπο για κάθε σημείο που διαγράφεται, διαγράφεται και το χρώμα του από τον πίνακα των φασματικών τιμών και έτσι διασφαλίζεται το χρώμα για τα εναπομεινάντα σημεία. Λόγω της πολυπλοκότητας της διαδικασίας, για να αποδοθεί ολοκληρωμένα, επισυνάπτεται ένα απόσπασμα από τον κώδικα στο MATLAB.

%ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

```
X = AL(:,1); %δημιουργία πίνακα με τις συν/νες X
Y = AL(:,2); %δημιουργία πίνακα με τις συν/νες Y
Z = AL(:,3); %δημιουργία πίνακα με τις συν/νες Z
ALTN = table(X,Y,Z,Index);%δημιουργία 1ου table
```

%ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΚΑΝΑΛΙΩΝ

```
NIR = AC(:,1);%δημιουργία πίνακα με τιμές στο NIR
RED = AC(:,2);%δημιουργία πίνακα με τιμές στο RED
GREEN = AC(:,3);%δημιουργία πίνακα με τιμές στο GREN
ACTN = table(NIR,RED,GREEN,Index);%δημιουργία 2ου table
```

%ΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΓΡΑΦΗ ΣΗΜΕΙΩΝ

```
toDelete = ALTN.Index>thr;
ALTN(toDelete,:) = [];
```

```
toDelete = ACTN.Index>thr;
ACTN(toDelete,:) = [];
```

Εικόνα 16: Απόσπασμα από τον κώδικα διαγραφής σημείων από το νέφος βάσει του δείκτη NDVI

Οι παραπάνω περιγραφές σχετίζονται με την λογική του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε για την απομάκρυνση σημείων από τα νέφη. Η διαγραφή όμως των σημείων γίνεται βάσει ενός κατωφλίου του δείκτη NDVI το οποίο εξυπηρετεί ανά περίπτωση και κάποιο διαφορετικό σκοπό. Στην προκειμένη περίπτωση σκοπός είναι η εύρεση του βέλτιστου κατωφλίου σύμφωνα με το οποίο θα αφαιρεθεί η βλάστηση και οι αδιαπέρατες επιφάνειες. Τελικός στόχος είναι να απομονωθούν τα σημεία που παριστάνουν το έδαφος και για αυτό αρχικά απομακρύνονται οι κατασκευές όπως κτίρια και στη συνέχεια αφαιρείται και η βλάστηση.

Ως πρώτος στόχος τέθηκε η απομάκρυνση των σημείων που αντιπροσωπεύουν τα κτίρια της περιοχής μελέτης. Έπειτα από πολλαπλές δοκιμές κατωφλίωσης προέκυψε ότι η βέλτιστη τιμή του NDVI για το σκοπό αυτό είναι το 0.098, δηλαδή ως αδιαπέραστες επιφάνειες θεωρήθηκαν τα σημεία που είχαν δείκτη μικρότερο από την τιμή αυτή. Είναι λογικό ότι εφόσον εντοπίζεται το εύρος των τιμών του δείκτη NDVI μέσα στο οποίο κινούνται τα σημεία των κτιρίων ($0 < NDVI < 0.098$) υπάρχει η δυνατότητα να διαγραφούν τα σημεία εκτός του εύρους ή τα σημεία εντός. Αυτό έχει συνέπεια την δημιουργία ενός νέφους αποτελούμενο μόνο από κτίρια και ενός νέφους απαλλαγμένο από αυτά αντίστοιχα. Για την λεπτομερή εξέταση του αποτελέσματος αυτού του κατωφλίου πραγματοποιήθηκαν και οι δύο ενέργειες.



Εικόνα 17: Νέφος 3 με αφαίρεση σημείων με τιμή NDVI > 0.098

Φαίνεται το κατώφλι αυτό να καταφέρνει να παρουσιάσει με επιτυχία τα κτίρια, τους δρόμους και γενικά τις κατασκευές της περιοχής μελέτης. Αυτό που είναι σημαντικό να αναφερθεί, γιατί δημιούργησε δυσκολίες και κατά την εξαγωγή του νέφους του εδάφους, είναι ότι κάποια κτίρια διέθεταν σκεπές από κεραμίδια και έτσι δεν συγκαταλέχθηκαν στο ίδιο εύρος τιμών NDVI με την πλειοψηφία των κτιρίων. Αυτό έχει να κάνει με τη διαφορετική φασματική συμπεριφορά των σκεπών από κεραμίδια και των σκεπών από πλάκες, όπως σχολιάστηκε και στην αρχή της ενότητας αυτής. Άρα λοιπόν, είναι πιο ορθό να διατυπωθεί ότι το εξαγόμενο νέφος περιέχει «κατά κύριο λόγο τις αδιαπέραστες επιφάνειες».

Επόμενος στόχος είναι η αφαίρεση της βλάστησης από τα νέφη που προέκυψαν αφαιρώντας τα κτίρια. Τα νέφη αυτά περιέχουν δηλαδή πλέον σημεία εδάφους, βλάστησης και κάποια σημεία κεραμοσκεπών. Ακολουθώντας τις διάφορες υποδείξεις της βιβλιογραφίας που θέτουν την τιμή του κατωφλίου του δείκτη για τη βλάστηση μεταξύ 0.3 και 0.8 αποφασίστηκε μία πρώτη κατωφλίωση στην τιμή 0.3. Επιλέχθηκε το χαμηλότερο όριο καθώς η περιοχή μελέτης δεν αποτελείται από πυκνή βλάστηση αλλά κατά κύριο λόγο από αραιή και χαμηλή, με αρκετή έκταση γυμνού εδάφους. Με κατώφλι λοιπόν το 0.3 αφαιρέθηκαν από το νέφη όλα τα σημεία που το υπερέβαιναν, θεωρούμενα ως βλάστηση, με στόχο να παραμείνουν τα σημεία του γυμνού εδάφους.

Έπειτα από αυτή τη διαγραφή παρατηρήθηκαν κάποια υπολείμματα σημείων σχετικά με κτίρια. Η πρώτη πηγή αυτών των υπολειμμάτων φάνηκε να οφείλεται σε μη επάρκεια του κατωφλίου που τέθηκε στο προηγούμενο βήμα, δηλαδή του κατωφλίου που αφορά στην αφαίρεση των κτιρίων. Όπως όμως φαίνεται και στην εικόνα [17], και ορισμένα σημεία σκεπών από κεραμίδια παραμένουν στο νέφος, γεγονός που σημαίνει ότι δεν έχουν τιμή NDVI μεγαλύτερη από 0.3. Προκύπτει λοιπόν ότι οι σκεπές των κτισμάτων παρουσιάζουν πολύ κοντινή τιμή του δείκτη NDVI με το έδαφος. Λόγω αυτού καμία επιλογή κατωφλίου δεν κατάφερε να δώσει ακριβές αποτέλεσμα, δηλαδή μόνο έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, ένα υψηλότερο κατώφλι συμπεριλάμβανε περισσότερα σημεία εδάφους αλλά και σκεπών ενώ ένα χαμηλότερο αφαιρούσε σημεία εδάφους αλλά και σκεπών. Δεδομένου λοιπόν ότι στην περιοχή μελέτης η έκταση γυμνού εδάφους είναι αρκετά μεγάλη ενώ οι σκεπές καταλαμβάνουν πολύ μικρότερο ποσοστό της περιοχής, επιλέχθηκε ένα χαμηλότερο κατώφλι που οδήγησε στην απομάκρυνση περισσότερων σημείων σκεπών. Η επιλογή αυτή βασίστηκε στη λογική να έχει το παραχθέν ΨΜΕ τη βέλτιστη ακρίβεια, με την έννοια ότι όσα περισσότερα σημεία σκεπών περιέχει το νέφος που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του ΨΜΕ, τόσο ελαττώνεται η ακρίβειά του.

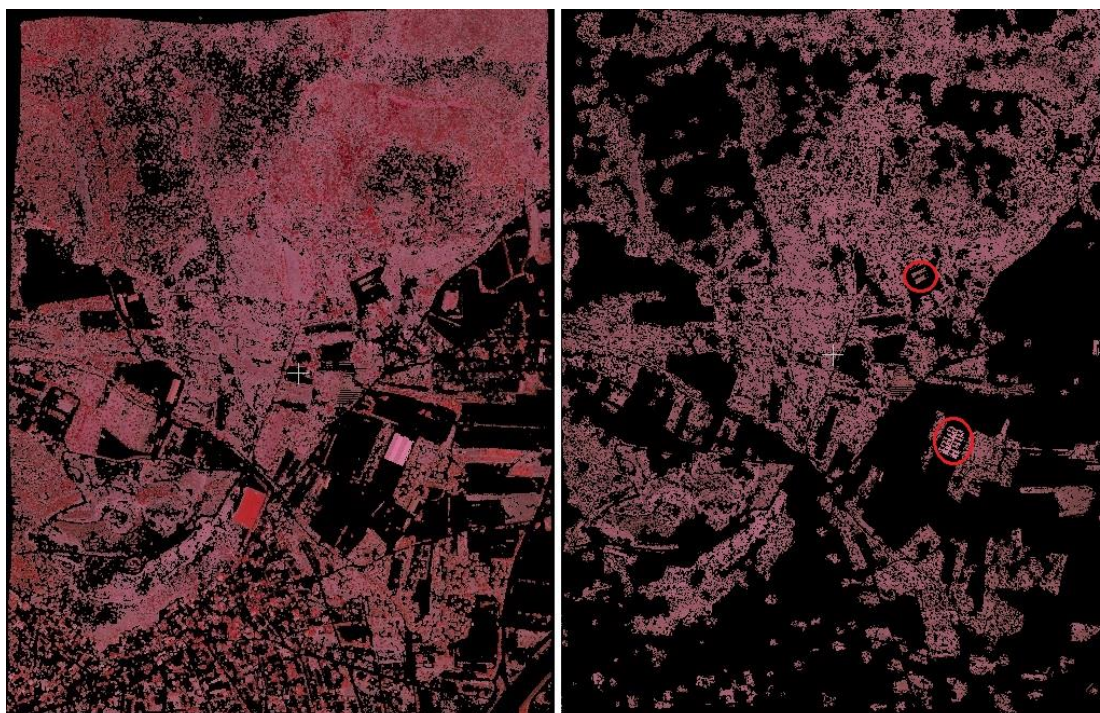
Για την αντιμετώπιση των δύο προβλημάτων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενα παράγραφο αποφασίστηκε αφενός να αυξηθεί το κατώφλι για τα κτίρια και αφετέρου να μειωθεί το κατώφλι για τη βλάστηση. Με αυτό τον τρόπο κρίθηκε ότι η αύξηση του πρώτο θα συμπεριλάμβανε τυχόν σημεία κτιρίων που δεν είχαν αφαιρεθεί στο πρώτο βήμα και ότι η μείωση του δεύτερου θα συμπεριλάμβανε και ορισμένα σημεία κεραμοσκεπών. Μετά από πολλαπλές δοκιμές αφαιρέθηκαν όλα τα σημεία που είχαν τιμή μικρότερη από 0.26 παράγοντας έτσι ένα νέφος βλάστησης και εδάφους κατά κύριο λόγο και στη συνέχεια το νέο αυτό νέφος κατωφλιώθηκε στο 0.27 ώστε να αφαιρεθεί η ψηλή βλάστηση και τυχόν σκεπές.

Επίσης, επειδή τα σημεία των σκεπών στο παραχθέν νέφος παρατηρήθηκαν να σχηματίζουν κατά πλειοψηφία αραιές συγκεντρώσεις, αποφασίστηκε να εφαρμοστεί και στο στάδιο αυτό αφαίρεση θορύβου με κριτήρια την περιοχή 80 γειτόνων και μέση απόσταση 0.7m. Στην προκειμένη περίπτωση ως θόρυβος θεωρήθηκαν τα υπολείμματα σκεπών και επειδή το νέφος είναι ήδη αραιό επιλέχθηκε μικρότερος αριθμός γειτόνων για τον υπολογισμό της μέσης απόστασης μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό προστατεύονται τα σημεία του εδάφους. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ τα απαλλαγμένα από θόρυβο νέφη περιείχαν πάνω από 10.000.000 σημεία, τα νέφη του εδάφους ήταν της τάξης των 350.000 σημείων περίπου. Επομένως το γυμνό έδαφος ολόκληρης της περιοχής απεικονίστηκε από περίπου 1.500.000 σημεία. Αναλυτικά το πλήθος των σημείων παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

<i>ΝΕΦΟΣ</i>	<i>ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΜΕ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ</i>	<i>ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ</i>	<i>ΧΡΟΝΟΣ</i>	<i>ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙ ΤΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ ΠΛΗΘΟΥΣ ΣΗΜΕΙΩΝ</i>
<i>1</i>	13.729.301	496.059	352	3.6 %
<i>2</i>	13.510.503	373.786	313	2.8 %
<i>3</i>	12.912.405	310.698	298	2.4 %
<i>4</i>	12.233.106	319.779	281	2.6 %
<i>Σύνολο</i>	52.385.315	1.500.322	--	2.9 %

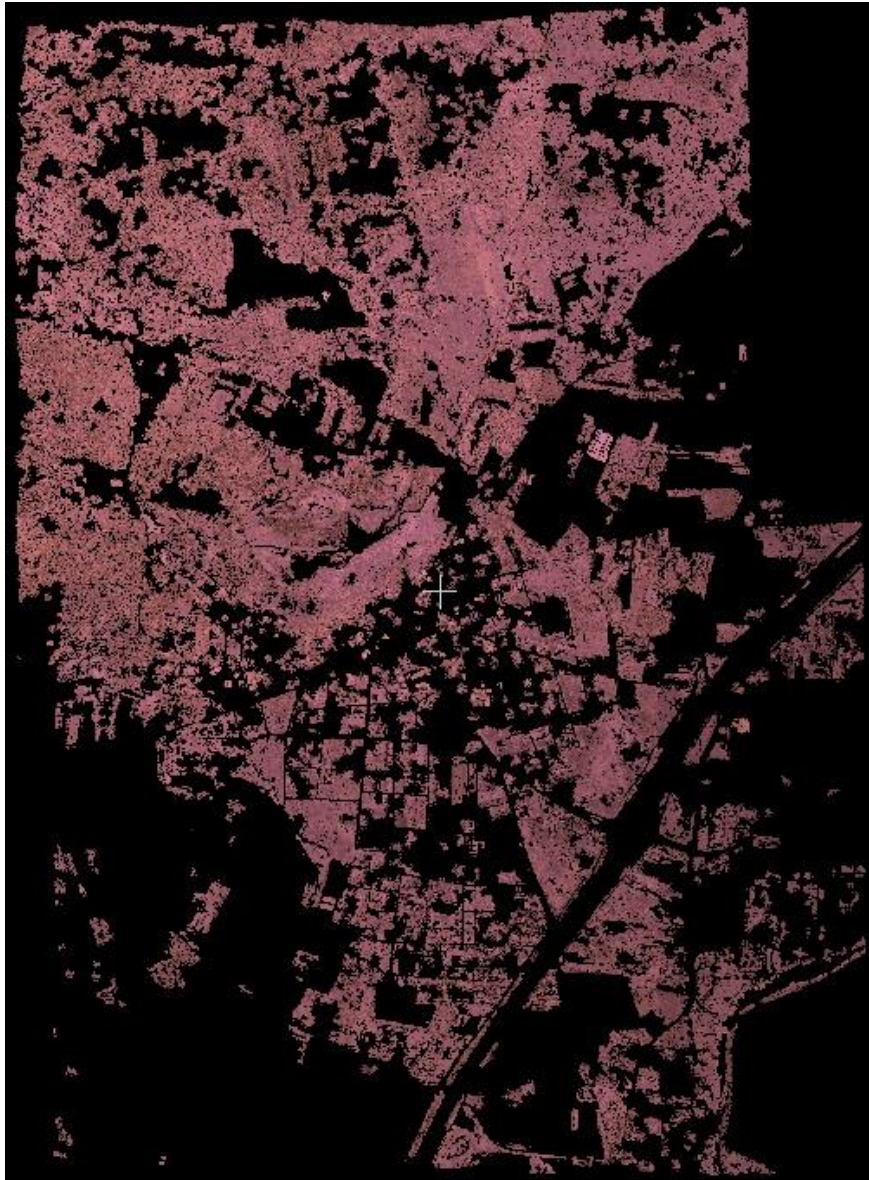
Πίνακας 4: Αποτελέσματα τελικής κατωφλίωσης για την δημιουργία νέφους εδάφους

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό των αρχικών νεφών μένουν μετά τη διαδικασία κατωφλίωσης βάσει το δείκτη NDVI, φαινόμενο που σχολιάζεται παρακάτω στο κείμενο. Ακόμα παρατηρείται ότι ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου, με τη χρήση του ίδιου ηλεκτρονικού υπολογιστή, είναι αρκετά μικρότερος από το χρόνο για την αφαίρεση του θορύβου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διαδικασία κατωφλίωσης ουσιαστικά εκφυλίζεται σε μία λογική πράξη ενώ η συνάρτηση για την απομάκρυνση του θορύβου απαιτεί τον υπολογισμό αποστάσεων μεταξύ σημείων του νέφους.



Εικόνα 18: Νέφος 1 με σημεία βλάστησης και εδάφους (αριστερά) και νέφος 1 με σημεία εδάφους και σημειωμένα υπολείμματα σκεπών (δεξιά)

Όπως εύκολα παρατηρεί κανείς από την παραπάνω εικόνα, νοτιοδυτικά στην περιοχή μελέτης, το νέφος σημείων που αντιπροσωπεύει το έδαφος παρουσιάζει την μεγαλύτερη έλλειψη δεδομένων. Αντίστοιχο κενό υπάρχει και νοτιοανατολικά, ενώ λίγο πιο βόρεια παρουσιάζεται μικρότερης κλίμακας έλλειψη. Η αιτία εντοπίζεται στο γεγονός ότι στις θέσεις αυτές υπάρχουν μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις και στην προηγούμενη διαδικασία κατωφλίωσης οι δομημένες επιφάνειες αφαιρέθηκαν προκειμένου να μείνει μόνο έδαφος. Απώτερος στόχος είναι η δημιουργία ενός ΨΜΕ της περιοχής μελέτης και όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 3 τα δεδομένα εισόδου για μια τέτοια διαδικασία πρέπει να καλύπτουν όλη την περιοχή και να παρουσιάζουν και μία ικανοποιητική πυκνότητα. Στις περιοχές βόρεια και δυτικά τα δεδομένα πληρούν τις προαναφερθέντες συνθήκες και αυτό γιατί αποτελούνται κυρίως από γυμνό έδαφος. Προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα των δεδομένων, δηλαδή του συνόλου των σημείων, είναι ανάγκη να γίνει παρεμβολή. Βέβαια η ίδια η διαδικασία της παρεμβολής εισάγει νέα σφάλματα καθώς παίρνει πληροφορία για τα υψόμετρα από τα άλλα σημεία της γύρω περιοχής.

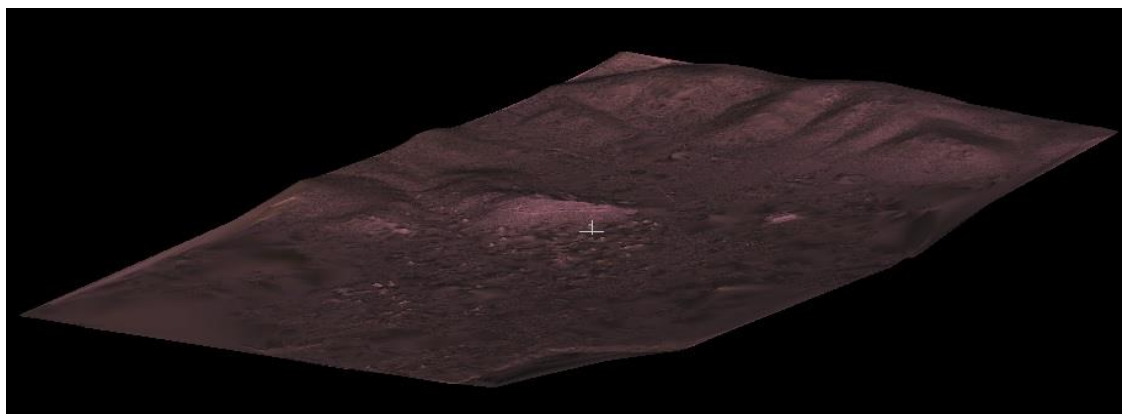


Εικόνα 19: Το νέφος σημείων εδάφους ολόκληρης της περιοχής μελέτης

4.6 Πύκνωση του νέφους των σημείων εδάφους

Χρησιμοποιώντας την ιδιότητα των TIN μοντέλων να μην παρεμβάλουν σημεία για τη δημιουργία των τριγώνων αλλά να αξιοποιούν μόνο όσα υπάρχουν εξαρχής στα δεδομένα εισόδου, δημιουργήθηκε ένα ψηφιακό μοντέλο TIN από τα δεδομένα σημεία, συμπεριλαμβανομένων των «κενών» περιοχών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το ανοιχτό λογισμικό Cloud Compare. Η μέθοδος που ακολουθεί είναι ο τριγωνισμός Delaunay που οδηγεί σε ένα μοντέλο 2.5D. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα, εκτός του απλού τριγωνισμού να εφαρμοστεί και μία παραλλαγή του, κατά την οποία το 3D νέφος προβάλλεται πρώτα στο επίπεδο που προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα (best fitting plane). Στη συνέχεια, στα δισδιάστατα πλέον σημεία γίνεται τριγωνισμός και δίνεται υψόμετρο στα σημεία. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα [20]. Είναι λογικό ότι στις περιοχές όπου υπήρχε έλλειψη δεδομένων δημιουργούνται μεγάλα τρίγωνα που υποβαθμίζουν την ποιότητα της

επιφάνειας. Όμως, οι σχηματισμοί των υψωμάτων και οι μισγάγγειες στα βόρειο κομμάτι της περιοχής απεικονίζονται με ευκρίνεια. Να σημειωθεί ακόμα ότι κάποιες μικρές εξάρσεις που διακρίνονται στην περιοχή του οικισμού οφείλονται σε κάποια υπολείμματα σκεπών, οι οποίες δεν μπόρεσαν να απομακρυνθούν εξολοκλήρου με την κατωφλίωση. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να γίνει μία εξομάλυνση της επιφάνειας στο ίδιο λογισμικό (Laplacian smoothing). Σύμφωνα με αυτόν τον αλγόριθμο για κάθε κορυφή των τριγώνων υπολογίζεται μία νέα θέση βάσει των γειτονικών.



Εικόνα 20: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης σε δομή TIN

Επόμενο βήμα ήταν η εισαγωγή της επιφάνειας που δημιουργήθηκε στο λογισμικό Geomagic Studio, το οποίο παρέχει την δυνατότητα εξαγωγής σημειακών οντοτήτων από μία ψηφιακή επιφάνεια. Με αυτό τον τρόπο έγινε πύκνωση των σημείων του νέφους και οι «κενές» περιοχές απέκτησαν δεδομένα. Συγκεκριμένα, ενώ ο αριθμός του συνολικού νέφους σημείων μετά την κατωφλίωση για την απεικόνιση του εδάφους ήταν 1.500.322, μετά από τη διαδικασία που περιγράφηκε αυξήθηκε στα 2.595.322.

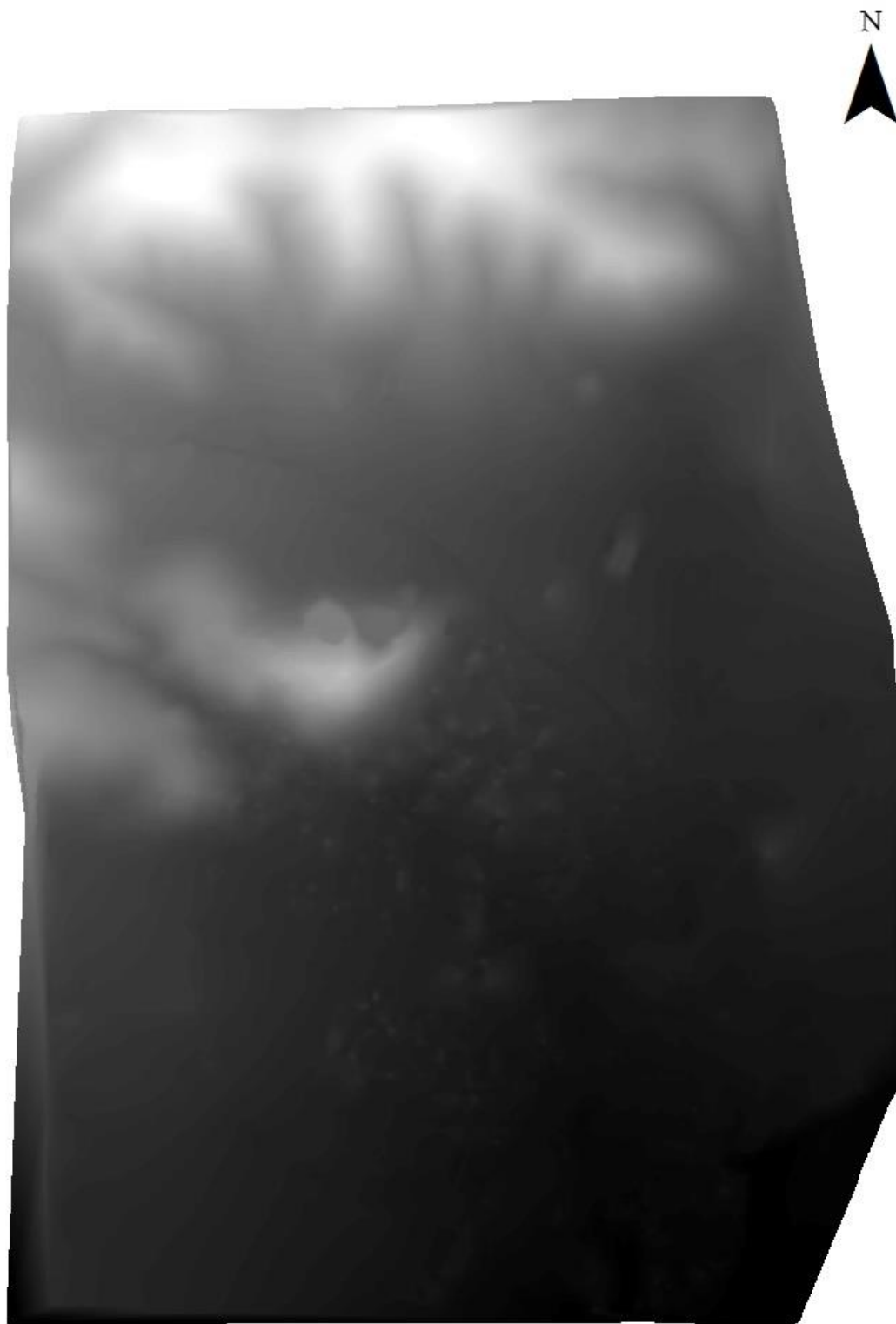
4.7 Δημιουργία μοντέλου εδάφους δομής RASTER

Το νέο λοιπόν νέφος σημείων που αντιπροσωπεύει το γυμνό έδαφος της περιοχής μελέτης αποτέλεσε το δεδομένο εισόδου για τη δημιουργία ενός κανονικοποιημένου ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Η διαδικασία έγινε αυτόματα στο λογισμικό ERDAS IMAGINE, στο οποίο έγινε και η ψηφιακή συνταύτιση εικόνων στην αρχή της εφαρμογής.

Ο χρήστης, εισάγοντας το αρχείο των σημείων, καλείται να επιλέξει κάποιες παραμέτρους. Πρώτη και πολύ βασική είναι η επιλογή του συστήματος αναφοράς. Το σύστημα που επιλέχθηκε είναι το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ 87) εφόσον αυτό είχε χρησιμοποιηθεί για την αποκατάσταση του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων. Επόμενη και εξίσου σημαντική παράμετρος είναι το μέγεθος του φατνίου του κανάβου ή αλλιώς η ανάλυση του μοντέλου. Η επιλογή του, όπως έχει εξηγηθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, σχετίζεται με την απόσταση μεταξύ των σημείων που θα χρησιμοποιηθούν, καθώς και με την τελική ακρίβεια που επιθυμεί ο χρήστης να πετύχει. Αν για παράδειγμα τα σημεία είναι αραιά με μέση απόσταση το ένα με το άλλο 1m, δεν έχει νόημα να επιλεγεί μέγεθος φατνίου 0.5m, αφού δεν υπάρχουν δεδομένα σε αυτή την απόσταση. Αυτό που θα συμβεί είναι να

γίνει παρεμβολή, μειώνοντας έτσι την ακρίβεια των αρχικών δεδομένων. Να τονιστεί ότι εξ ορισμού η δημιουργία ΨΜΕ με ψηφιδωτή δομή χρησιμοποιεί την μέθοδο της παρεμβολής, όμως μία προσεκτική επιλογή ανάλυσης μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερη αλλοίωση των δεδομένων και άρα σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Στην παρούσα εργασία, λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα του νέφους που προέκυψε αμέσως μετά την αφαίρεση θορύβου και του νέφους που προέκυψε μετά την κατωφλίωση, αλλά και την ανάλυση που έχει το μοντέλο αναφοράς το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για αξιολόγηση του αποτελέσματος, ως μέγεθος φατνίου επιλέχθηκαν τα 2m. Είναι σημαντικό, για το στάδιο της αξιολόγησης του ΨΜΕ, τα δύο μοντέλα που θα συγκριθούν να έχουν κοινή ανάλυση. Τέλος υπάρχει δυνατότητα επιλογής του τύπου αρχείου που θα αποθηκευτεί το μοντέλο. Για το σκοπό της εργασίας, ανάμεσα σε TIFF και IMG επιλέχθηκε το πρώτο, ώστε το εξαγόμενο μοντέλο να έχει γεωαναφορά.

Όπως εύκολα αντιλαμβάνεται κανείς από την εικόνα [21], το αποτέλεσμα που προέκυψε από την αυτόματη διαδικασία παρουσιάζει κάποιες ιδιαιτερότητες. Πιο συγκεκριμένα, σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις που έγιναν για το μοντέλο εδάφους σε δομή TIN, παρουσιάζονται και εδώ εξάρσεις του εδάφους στην τοποθεσία του οικισμού, γεγονός που όπως προαναφέρθηκε οφείλεται σε υπολείμματα σημείων από σκεπές. Εκτενέστερη αξιολόγηση του αποτελέσματος θα γίνει στο κεφάλαιο που ακολουθεί.



Εικόνα 21: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης σε δομή καννάβου

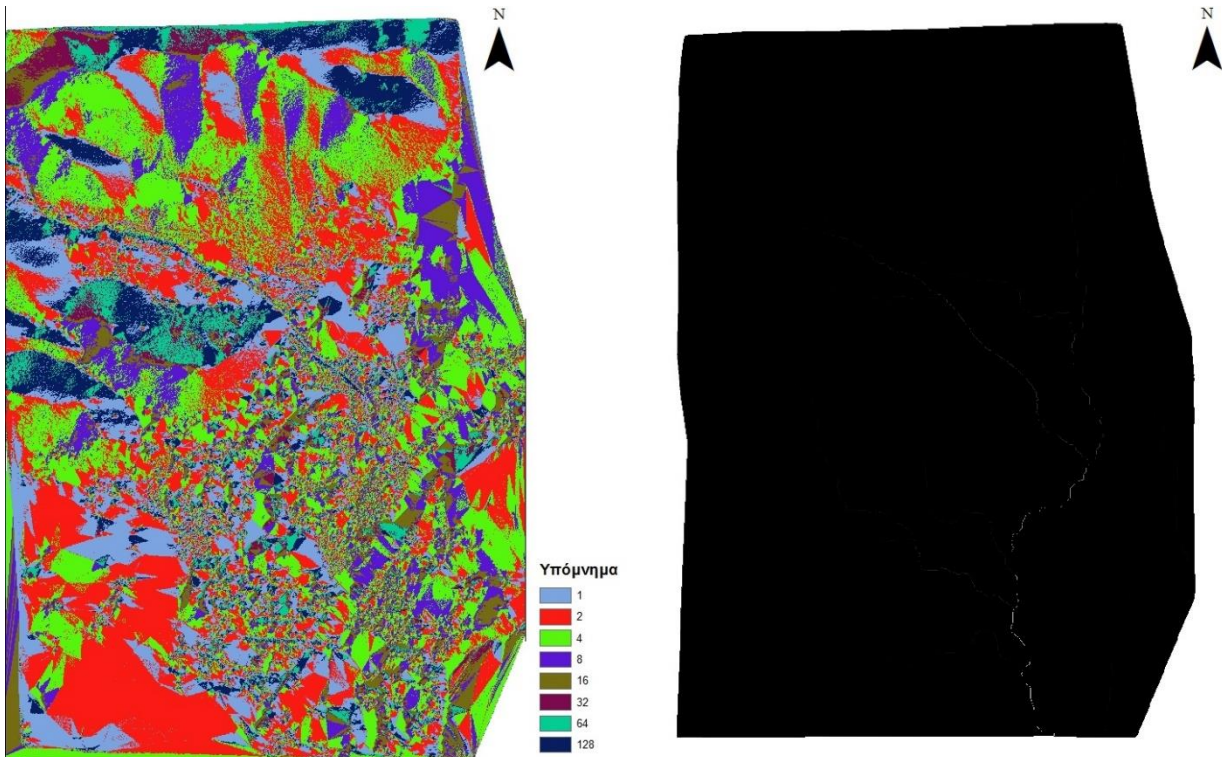
4.8 Εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου

Έχοντας πλέον διαθέσιμο το ψηφιακό μοντέλο εδάφους σε raster μορφή, επόμενο βήμα είναι η αυτόματη εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης. Για τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcMap 10.3 της εταιρίας ESRI. Το λογισμικό αυτό παρέχει στις εργαλειοθήκες του ειδικές εντολές για την εξαγωγή στοιχείων υδρολογικού ενδιαφέροντος μιας περιοχής, όπως τον ορισμό λεκάνης απορροής, τη συσσώρευση ροής και την εξαγωγή του δικτύου κ.α. (Spatial Analyst Tools > Hydrology).

Πρώτο βήμα είναι η εισαγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και η υδρολογική του διόρθωση. Με αυτό τον όρο εννοείται το “γέμισμα” των βυθισμάτων που τυχόν παρουσιάζει. Τα βυθίσματα αφορούν είτε σε μεμονωμένα εικονοστοιχεία είτε σε ομάδες που παρουσιάζουν μικρότερο υψόμετρο από αυτά που τα περιβάλλουν. Επειδή λοιπόν αυτού του είδους οι σχηματισμοί συνήθως δεν συναντιούνται στη φύση και επειδή εγκλωβίζουν το νερό μην επιτρέποντας τη συνέχιση της ροής του, θεωρούνται ως σφάλματα της διαδικασίας δημιουργίας του μοντέλου και διορθώνονται μέσω της απόδοσης κοινού υψομέτρου. Η εντολή με την οποία πραγματοποιείται αυτή η διόρθωση είναι «Fill». Σε αυτή την εφαρμογή το οπτικό αποτέλεσμα δεν διαφοροποιήθηκε, τουλάχιστον όχι αισθητά, άρα στο μοντέλο υπήρχαν μάλλον μόνο μεμονωμένα βυθίσματα εικονοψηφίδων.

Δεύτερο εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι ο υπολογισμός της διεύθυνσης ροής για κάθε εικονοστοιχείο με την εντολή «Flow Direction». Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για αυτή τη διαδικασία είναι αυτός της απορροής των 8 διευθύνσεων που αναπτύχθηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 2^ο. Δεδομένο εισόδου για το βήμα αυτό είναι το υδρολογικά διορθωμένο μοντέλο εδάφους. Το αποτέλεσμα είναι μία raster απεικόνιση με διαφορετική χρωματική απόδοση της κάθε διεύθυνσης, σύμφωνα με την κωδικοποίηση που επεξηγήθηκε στο κεφάλαιο 2^ο.

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της συσσώρευσης ροής. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται επίσης σε επίπεδο εικονοψηφίδας και έχει να κάνει με τον συνολικό αριθμό των εικονοστοιχείων που ρέουν σε κάθε εικονοστοιχείο. Είναι προφανές ότι σημεία με μεγάλο υψόμετρο, για παράδειγμα κοντά στις κορυφές βουνών, έχουν πολύ χαμηλή συσσώρευση ροής αφού δεν βρίσκονται πολλά σημεία ανάντη. Αντίστοιχα, σημεία με χαμηλό υψόμετρο συσσωρεύουν υψηλά επίπεδα ροής. Δεδομένο εισόδου σε αυτό το βήμα είναι το κανονικοποιημένο αρχείο που έχει προκύψει στο στάδιο της διεύθυνσης ροής. Η εντολή του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε στο σημείο αυτό είναι «Flow Accumulation». Το αποτέλεσμα είναι ένα raster αρχείο με χρωματική διαβάθμιση των εικονοστοιχείων ανάλογα με τη συσσώρευση ροής τους. Τα εικονοστοιχεία που έχουν μηδενική απεικονίζονται με μαύρο χρώμα και σταδιακά η ένταση αυξάνει ανάλογα με την αύξηση της συσσωρευμένης ροής. Τα αποτελέσματα από αυτό το στάδιο καθώς και από τον υπολογισμό της διεύθυνσης ροής φαίνονται στην εικόνα [22].

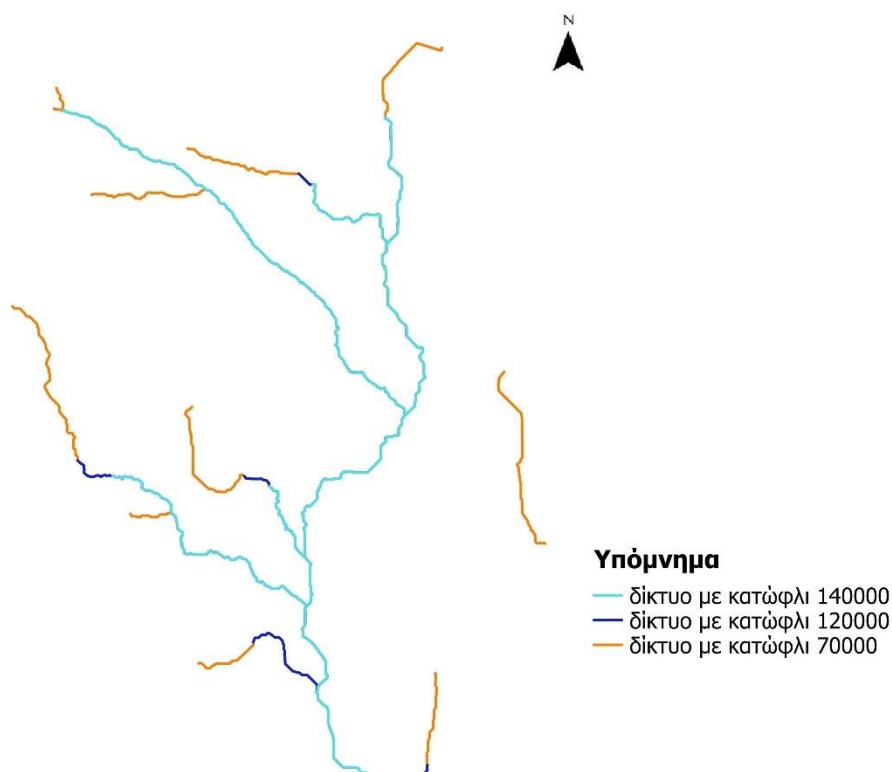


Εικόνα 22: Διεύθυνση ροής (αριστερά) και συσσώρευση ροής (δεξιά)

Μετά τη δημιουργία του αρχείου συσσώρευσης ροής είναι αναγκαίο να οριστεί ένα κατώφλι σύμφωνα με το οποίο θα καθορίζονται ποια εικονοστοιχεία αποτελούν τμήμα του υδρογραφικού δικτύου και ποια όχι. Συγκεκριμένα, όποιο εικονοστοιχείο εμφανίζει συσσώρευση ροής μεγαλύτερη από αυτό το κατώφλι θα θεωρείται μέρος του δικτύου. Πρόκειται για μία λογική πράξη, κατά την οποία ένα εικονοστοιχείο που πληροί την συνθήκη αποθηκεύεται με την τιμή 1 ενώ ένα που δεν την πληροί αποθηκεύεται με την τιμή 0. Πιο αναλυτικά, η συνθήκη που τέθηκε στην εργασία αυτή είναι η συσσώρευση ροής να είναι μεγαλύτερη από τον αριθμό 120.000 (κατώφλι) ώστε μία εικονοψηφίδα να θεωρηθεί μέρος του υδρογραφικού δικτύου. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την έκφραση αυτής της συνθήκης είναι το Raster Calculator.

Αυτό που έχει μεγάλη σημασία για την εξαγωγή του δικτύου ρεμάτων της περιοχής είναι ακριβώς αυτή η επιλογή του κατωφλίου. Ένα μικρό κατώφλι θα οδηγήσει σε ένα πυκνό δίκτυο καθώς τα εικονοστοιχεία που θα πληρούν τη συνθήκη θα είναι περισσότερα ενώ αντίστοιχα ένα υψηλό θα οδηγήσει σε πιο αραιό δίκτυο. Η επιλογή έγινε έπειτα από πολλές δοκιμές και λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη τιμή συσσώρευσης αλλά και μία άλλη μεταπτυχιακή εργασία (Παπαγεωργάκη, 2012) που βέβαια ασχολήθηκε με ολόκληρη τη λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου κι όχι με ένα μικρό μέρος της, όπως η παρούσα εργασία. Αυτό διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο αποτέλεσμα που προέκυψε, γεγονός που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Η τιμή του κατωφλίου τέθηκε τελικά στα 120.000. Έχει νόημα να διευκρινιστεί ότι μεταβάλλοντας τις τιμές του κατωφλίου η μορφή του δικτύου δεν αλλάζει ριζικά. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι σε κάποια παρακλάδια αυξάνεται ή ελαττώνεται το μήκος τους ανάλογα αν μειώνεται ή αυξάνεται το κατώφλι αντίστοιχα. Ακόμα είναι

πιθανό με μείωση του κατώφλιου να εμφανιστούν ρέματα 1^{ης} τάξης αποκομμένα από το υπόλοιπο δίκτυο. Όλα αυτά παρουσιάζονται στην εικόνα [23], όπου γίνεται μία παρουσίαση του εξαχθέντος δικτύου με χρήση διαφορετικών κατώφλιων.



Εικόνα 23: Παραχθέντα δίκτυα με διαφορετικό κατώφλι συσσώρευση ροής

Όπως φαίνεται στην εικόνα [23], το δίκτυο που προέκυψε χρησιμοποιώντας το μεγαλύτερο κατώφλι (γαλάζιο) αποτελείται από μικρότερους σε μήκος κλάδους και δεν παρουσιάζει καθόλου μεμονωμένους κλάδους. Το δίκτυο με το ενδιάμεσο κατώφλι (μπλε), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εργασία αυτή, εμφανίζει μεγαλύτερο μήκος κλάδων σε σχέση με το προηγούμενο ενώ μεμονωμένο κλάδο παρουσιάζει πολύ μικρό. Τέλος, το δίκτυο με το μικρότερο κατώφλι (πορτοκαλί) φαίνεται να είναι το μεγαλύτερο σε μήκος από τα τρία και το μόνο που παρουσιάζει δύο μεγάλα μεμονωμένα τμήματα.

Κεφάλαιο 5^ο: Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

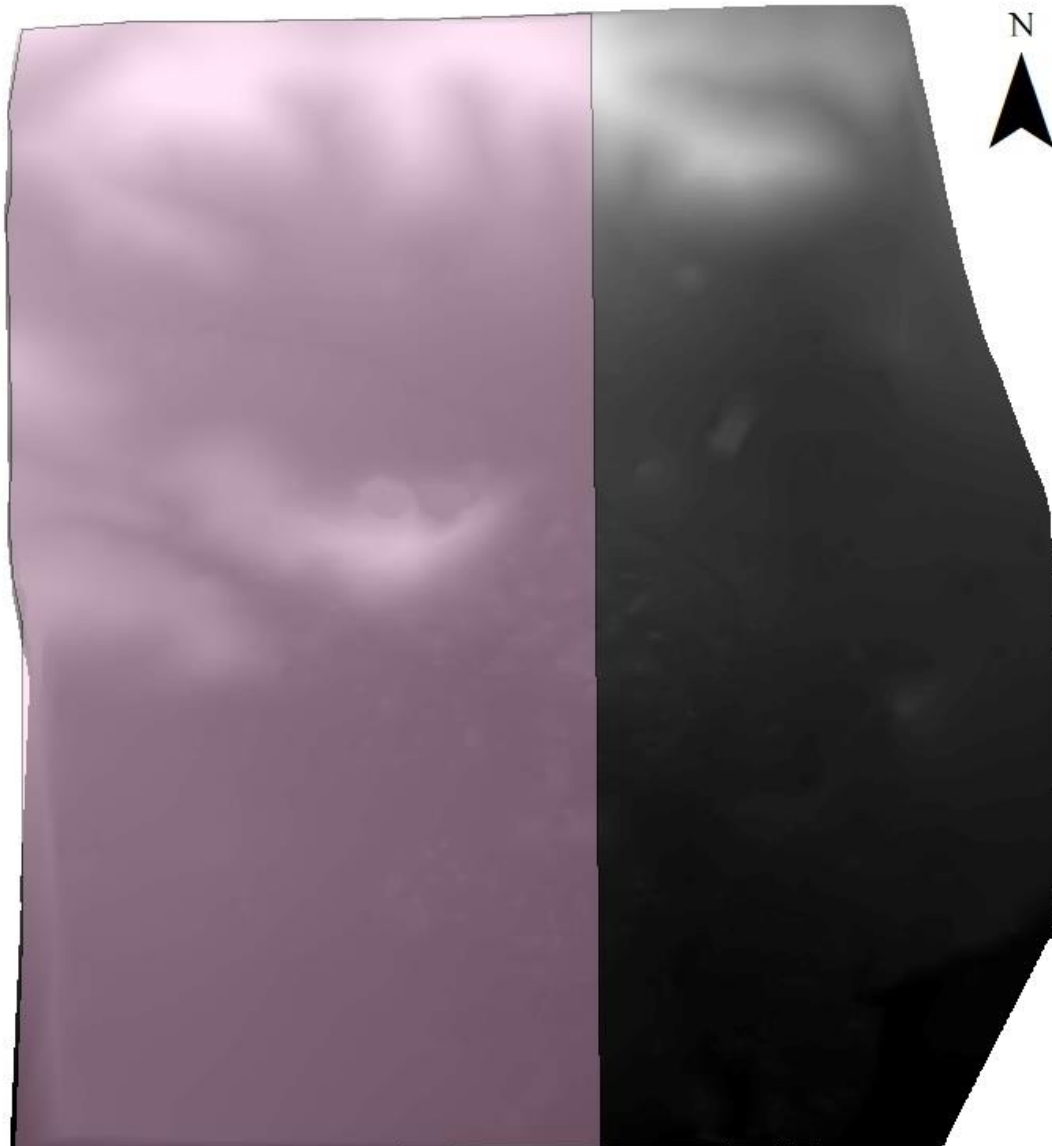
Στο κεφάλαιο αυτό αξιολογούνται τα αποτελέσματα των διαδικασιών για τη δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους και την εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η αξιολόγηση γίνεται βάσει κάποιων δεδομένων αναφοράς και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι είτε στατιστικά είτε η οπτική σύγκριση. Παράλληλα με την αξιολόγηση σχολιάζονται και οι αιτίες στις οποίες είναι πιθανό να οφείλονται ορισμένες αστοχίες των παραχθέντων προϊόντων.

5.1 Αξιολόγηση ψηφιακού μοντέλου εδάφους

5.1.1 Μοντέλο αναφοράς

Βασικό μέρος αυτής της εργασίας αποτέλεσε η διαδικασία παραγωγής ενός ΨΜΕ της περιοχής της Μαγούλας. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον σκοπό αυτό αποτελείται κατά κύριο λόγο από αυτόματες μεθόδους, με αρχική την ψηφιακή συνταύτιση εικόνων για την δημιουργία των νεφών σημείων, ύστερα την κατωφλίωση με χρήση του δείκτη NDVI για την απομόνωση των σημείων του εδάφους και τέλος τη δημιουργία raster μοντέλου βάσει των σημείων αυτών. Παρόλη την αυτοματοποίηση των διαδικασιών, οι παράμετροι που έχει τη δυνατότητα να ορίσει ο χρήστης σε κάθε μία από αυτές μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Παραδείγματος χάρη, στη συγκεκριμένη εργασία, η επιλογή διαφορετικών κατωφλίων NDVI για την απομόνωση σημείων του εδάφους θα είχε οδηγήσει σε διαφορετικό ΨΜΕ και άρα και σε διαφορετικό υδρογραφικό δίκτυο. Εκτός αυτού, μεγάλη σημασία έχει η πιστότητα με την οποία το μοντέλο αποδίδει το έδαφος. Θα ήταν ελλιπές λοιπόν να μην συμπεριληφθεί κάποια διαδικασία αξιολόγησης του αποτελέσματος. Για την ανάγκη αυτή έγινε σύγκριση του παραχθέντος μοντέλου με το αντίστοιχο ΨΜΕ από το «ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ».

Το μοντέλο από το «ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ» θα αναφέρεται στο εξής ως μοντέλο αναφοράς. Το μέγεθος της εικονοψηφίδας στο έδαφος είναι κοινό με αυτό του παραχθέντος μοντέλου και ισούνται με 2m. Να διευκρινιστεί ότι το μοντέλο αναφοράς που αντιστοιχεί στην περιοχή μελέτης δεν είναι ένα ενιαίο αρχείο, αλλά αποτελείται από τρία επιμέρους και επικαλυπτόμενα μοντέλα ίσων διαστάσεων και ανάλυσης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ακόμα ότι η περιοχή μελέτης δεν καλύπτεται πλήρως από τα μοντέλα αυτά αλλά μόνο κατά το ήμισυ. Για την πλήρη κατανόηση της γεωμετρικής σχέσης των δύο μοντέλων παρατίθεται η εικόνα [24].



Εικόνα 24: Απεικόνιση της επικάλυψης (ροζ) των μοντέλων αναφοράς και του μοντέλου προς αξιολόγηση

5.1.2 Αξιολόγηση του μοντέλου και σχολιασμός σφαλμάτων

Μία ποσοτική αξιολόγηση του μοντέλου μπορεί να προκύψει αν εξεταστούν τα στατιστικά μεγέθη των υψομετρικών διαφορών που παρουσιάζει σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς. Προκειμένου να δημιουργηθούν οι υψομετρικές διαφορές πρέπει να γίνει αφαίρεση μεταξύ των δύο μοντέλων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ξανά το λογισμικό ArcMap 10.3 της ESRI και συγκεκριμένα το εργαλείο Raster Calculator (Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator). Στο αναδυόμενο παράθυρο συντέθηκε η πράξη της αφαίρεσης, επιλέγοντας να αφαιρεθεί το προς αξιολόγηση μοντέλο από το μοντέλο αναφοράς ($Z_{\text{αναφοράς}} - Z_{\text{ελεγχόμενο}}$). Έτσι οι αρνητικές διαφορές δηλώνουν ότι το παραχθέν μοντέλο είναι ψηλότερα από το μοντέλο αναφοράς ενώ οι θετικές το αντίθετο. Με την εντολή αυτή η αφαίρεση γίνεται για το κοινό κομμάτι των αρχείων. Το αποτέλεσμα της αφαίρεσης με τη χρήση του Raster Calculator είναι τρία νέα raster αρχεία (όσα και τα μοντέλα

αναφοράς όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα), στα κελιά των οποίων είναι αποθηκευμένη η υψομετρική διαφορά των δύο μοντέλων. Προς διευκόλυνση τα τρία αυτά ψηφιδωτά αρχεία θα ονομαστούν βάσει της θέσης τους ως προς την περιοχή μελέτης: βόρειο τμήμα, κεντρικό και νότιο.

Τα στατιστικά μεγέθη που προέκυψαν αυτόματα στο λογισμικό από την αφαίρεση είναι η μέση τιμή, δηλαδή η μέση υψομετρική διαφορά, η τυπική απόκλιση καθώς και η μέγιστη και ελάχιστη τιμή και παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 5:

	ΜΕΣΗ ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ
ΒΟΡΕΙΟ	1,36 m	1,62 m	-7,75 m	40,23 m
ΚΕΝΤΡΙΚΟ	0,23 m	2,65 m	-27,07 m	24,81 m
ΝΟΤΙΟ	0,71 m	3,92 m	-11,05 m	34,51 m

Πίνακας 5: Αρχικά στατιστικά μεγέθη των υψομετρικών διαφορών μεταξύ των μοντέλων

Από τον παραπάνω πίνακα, οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές υποδηλώνουν την ύπαρξη χονδροειδών σφαλμάτων. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να απομακρυνθούν τα χονδροειδή αυτά σφάλματα και τα στατιστικά μεγέθη να υπολογιστούν εκ νέου. Για το σκοπό αυτό τα τρία (3) raster αρχεία των υψομετρικών διαφορών εξήχθησαν με τη χρήση του ArcMap (Conversion Tools > From Raster > Raster to ASCII) σε αρχεία κειμένου (.txt) για να επεξεργαστούν στο MATLAB. Τα .txt αρχεία περιέχουν τις υψομετρικές διαφορές σε μορφή κειμένου και εισήχθησαν στο περιβάλλον του MATLAB σε μορφή πινάκων. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν για κάθε αρχείο τα όρια $\mu-3\sigma$ και $\mu+3\sigma$ και όσες τιμές βρίσκονταν εκτός αυτών αφαιρέθηκαν θεωρούμενες ως χονδροειδή σφάλματα. Αφού αφαιρέθηκαν υπολογίστηκαν τα νέα στατιστικά μεγέθη τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα παρακάτω :

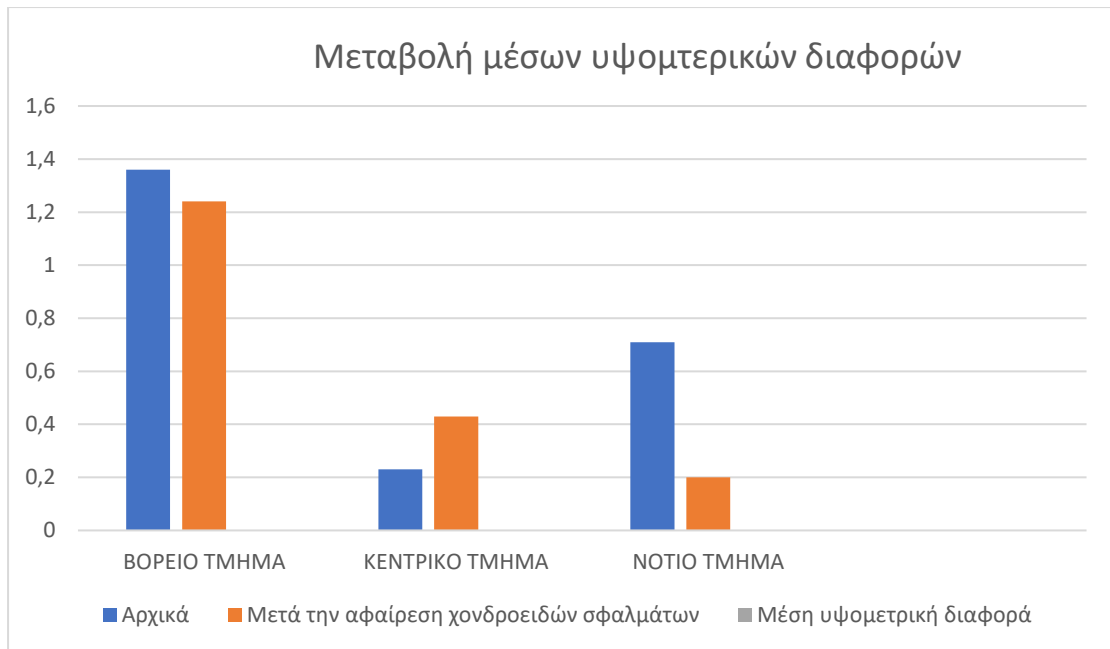
	ΜΕΣΗ ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ
ΒΟΡΕΙΟ	1,24 m	0,67 m	-3,50 m	6,22 m
ΚΕΝΤΡΙΚΟ	0,43 m	1,63 m	-7,72 m	8,18 m
ΝΟΤΙΟ	0,20 m	2,22 m	-10,27 m	12,46 m

Πίνακας 6: Στατιστικά μεγέθη μετά την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων

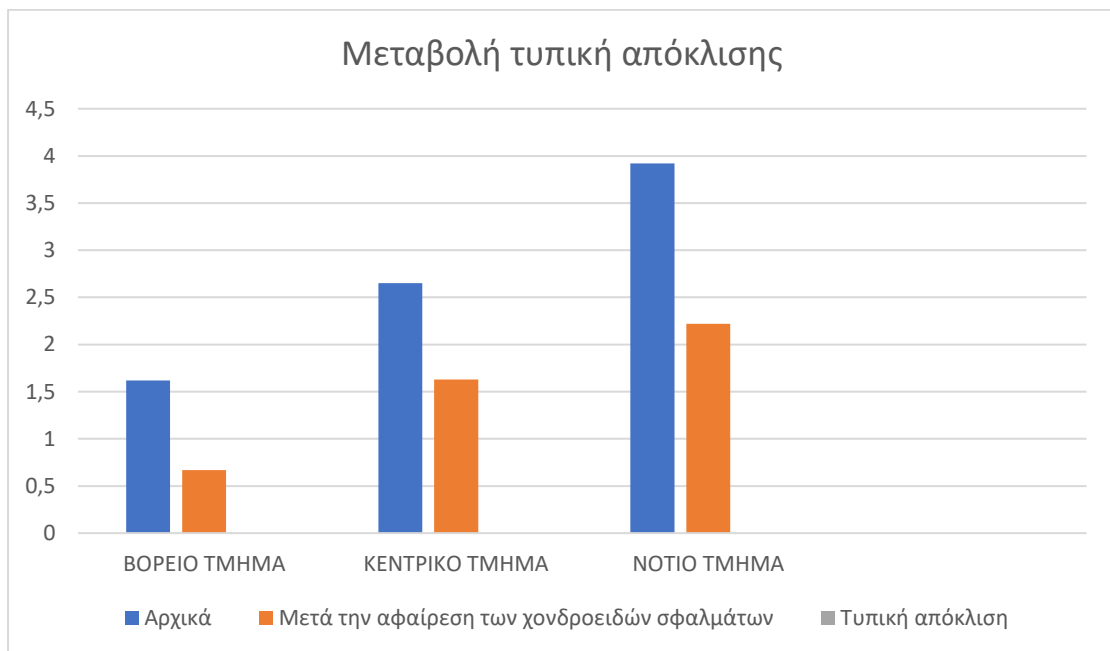
Με βάση λοιπόν τους δύο τελευταίους πίνακες προκύπτουν τα εξής :

- Η μέση τιμή για το βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης δεν μειώθηκε σημαντικά παρά το γεγονός ότι μετά την απομάκρυνση των χονδροειδών σφαλμάτων, η ελάχιστη τιμή αυξήθηκε κατά το ήμισυ και η μέγιστη μειώθηκε κατά 34 m. Ο συνδυασμός αυτών των δύο γεγονότων μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι σε αυτό το κομμάτι του παραχθέντος μοντέλου υπάρχει συστηματική μετατόπιση προς τα κάτω, δηλαδή τα υψόμετρα που έχουν εκτιμηθεί είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα στο μοντέλο αναφοράς. Να αναφερθεί όμως, ότι η ίδια η υψομετρική ακρίβεια του μοντέλου αναφοράς είναι περίπου 1m, οπότε μία μέση υψομετρική διαφορά κοντά στο 1m δεν θεωρείται κρίσιμη.
- Η μέση τιμή για το κεντρικό τμήμα παρουσίασε αύξηση μετά την απομάκρυνση των χονδροειδών σφαλμάτων, συγκεκριμένα από 0,23m έφτασε στα 0,43m. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη περισσότερων αρνητικών χονδροειδών σφαλμάτων ώστε όταν αυτά απομακρύνθηκαν προκάλεσαν την άνοδο της μέσης τιμής. Ωστόσο η τιμή 0,43m βρίσκεται εντός της αβεβαιότητας των μεθόδων και έτσι δεν προκύπτει σαφής συστηματική διαφορά μεταξύ των μοντέλων στο τμήμα αυτό.
- Η μέση υψομετρική διαφορά στο νότιο τμήμα παρουσίασε σημαντική μείωση. Συγκεκριμένα από 0,71m μειώθηκε στα 0,20m. Και σε αυτό το τμήμα, όπως και στο κεντρικό, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει συστηματική μετατόπιση μεταξύ των μοντέλων.
- Οι τυπικές αποκλίσεις για όλα τα τμήματα της περιοχής μελέτης μειώθηκαν τουλάχιστον κατά 1m γεγονός λογικό αφού και οι ακραίες τιμές τους, πλην της ελάχιστης για το νότιο τμήμα, μειώθηκαν σημαντικά μετά την απομάκρυνση των χονδροειδών σφαλμάτων.

Παράλληλα με την απομάκρυνση των χονδροειδών σφαλμάτων και τους υπολογισμούς των νέων στατιστικών μεγεθών έγινε και καταμέτρησή του πλήθους τους χρησιμοποιώντας το περιβάλλον του MATLAB και προέκυψε ότι το 4% των εικονοστοιχείων του παραχθέντος μοντέλου αποτελούσαν χονδροειδές σφάλμα. Ακόμα κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν σε γραφήματα οι μεταβολές των μέσων υψομετρικών διαφορών και των τυπικών αποκλίσεων, τα οποία και ακολουθούν στη συνέχεια.



Γράφημα 2: Τιμές μέσης υψομετρικής διαφοράς ανά τμήμα πριν και μετά την αφαίρεση των χονδροειδών σφαλμάτων

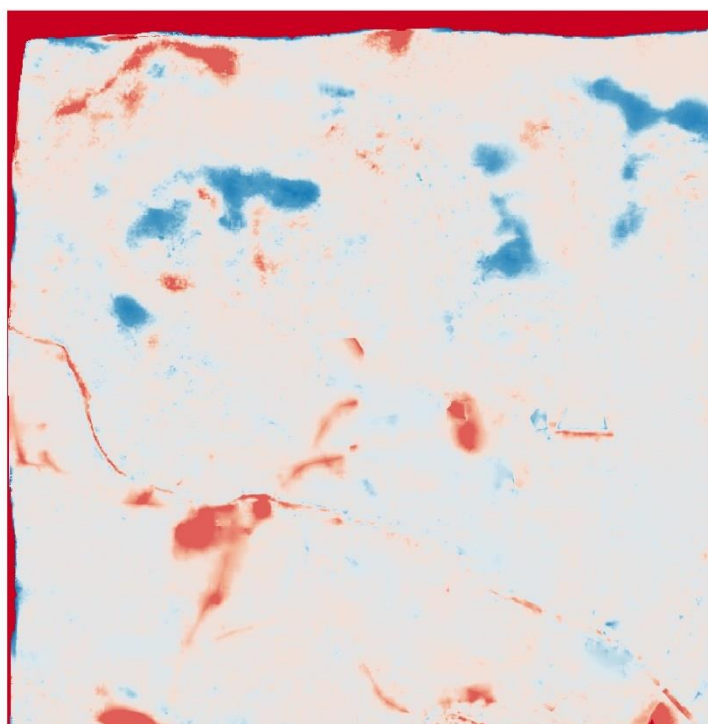


Γράφημα 3: Τιμές τυπικής απόκλισης ανά τμήμα πριν και μετά την αφαίρεση των χονδροειδών σφαλμάτων

Αυτό που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι η διερεύνηση της αιτίας εμφάνισης των τόσο ακραίων υψομετρικών διαφορών πριν την απομάκρυνση των χονδροειδών σφαλμάτων. Ένας βασικός παράγοντας είναι το σχήμα της περιοχής. Επεξηγηματικά, η περιοχή μελέτης δεν αποτελεί ένα σαφώς καθορισμένο ορθογώνιο σχήμα, αλλά όπως φαίνεται και στο νέφος σημείων (εικόνα [14]) στις άκρες τις παρατηρούνται “σπασίματα”. Το παραχθέν ΨΜΕ όμως, που προέκυψε βάσει του νέφους αυτού, έχει «γεμίσει» αυτά τα σπασίματα. Φαίνεται λοιπόν ότι κατά τη διαδικασία αυτόματης δημιουργίας του ψηφιακού μοντέλου εδάφους TIN, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για

την παραγωγή του τελικού ψηφιδωτού μοντέλου, τα ακραία σημεία του περιγράμματος του νέφους ενώθηκαν, δημιουργώντας τρίγωνα για κάποιες περιοχές που δεν υπήρχαν καθόλου σημεία. Προφανώς το γεγονός αυτό εισήγαγε σημαντικά σφάλματα στο νέφος που προέκυψε μετά την διαδικασία πύκνωσης. Αυτό οδήγησε στην αλλοίωση της ποιότητας του raster μοντέλου κυρίως στο περίγραμμα της περιοχής όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες.

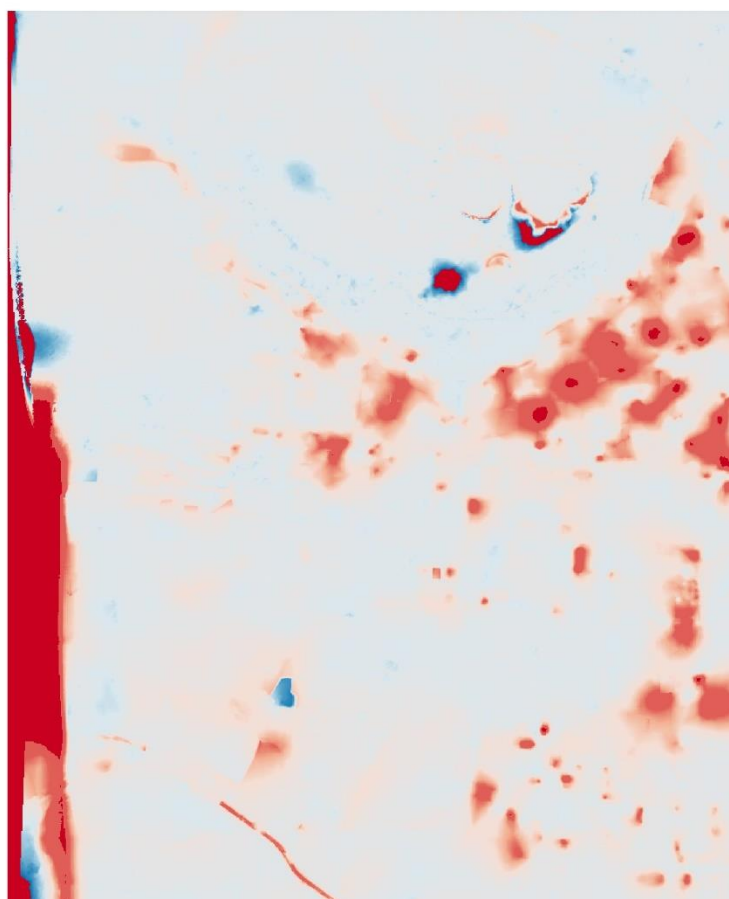
Αν παρατηρήσει κανείς τους παραπάνω πίνακες και τις παρακάτω εικόνες είναι εμφανής η ύπαρξη κάποιων σημαντικών υψομετρικών διαφορών ακόμα και μετά την αφαίρεση των χονδροειδών σφαλμάτων. Αυτές, εκτός των αρνητικών που οφείλονται κυρίως στην αστοχία δημιουργίας νέφους σημείων αποτελούμενο αυστηρά μόνο από σημεία εδάφους, προέρχονται από την εισαγωγή σφαλμάτων στα διάφορα στάδια που μεσολάβησαν για την παραγωγή του μοντέλου εδάφους. Αναλυτικά, τα σφάλματα του αεροτριγωνισμού αλλά και εσφαλμένες ομολογίες που μπορούν να προκύψουν κατά τη διαδικασία της αυτόματης συνταύτισης, εισάγουν σφάλματα από τα πρώτα κίολας βήματα της διαδικασίας παραγωγής ΨΜΕ. Η διαδικασία πύκνωσης του νέφους των σημείων εδάφους που ακολουθήθηκε δημιούργησε κάποια σημεία σε περιοχές του νέφους που δεν υπήρχαν δεδομένα μειώνοντας έτσι προφανώς την ακρίβεια των δεδομένων. Τέλος, η ίδια η διαδικασία της αυτόματης παραγωγής ψηφιδωτού μοντέλου χρησιμοποιεί μεθόδους παρεμβολής ώστε να αποδώσει υψόμετρα στις κορυφές του κανάβου.



Εικόνα 25: Ανάδειξη χονδροειδών σφαλμάτων και χρωματική απόδοση υψομετρικών διαφορών βόρειου τμήματος περιοχής μελέτης σύμφωνα με τα στατιστικά μεγέθη μετά την αφαίρεση των χονδροειδών σφαλμάτων

Στις εικόνες [25],[26] και [27] αποδίδονται με χρωματική κλίμακα οι υψομετρικές διαφορές για το ήμισυ της περιοχής όπως προέκυψαν από την αφαίρεση του παραχθέντος μοντέλου από το μοντέλο αναφοράς. Οι κλάσεις βάσει των οποίων

απεικονίζονται οι διαφορές δεν είναι αυθαίρετες αλλά βασίζονται στο εύρος των τιμών στις οποίες εντοπίστηκαν τα χονδροειδή σφάλματα στο προηγούμενο βήμα, στις τιμές $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ και $\mu \pm 3\sigma$, όπου μ είναι η μέση υψομετρική διαφορά και σ η τυπική απόκλιση που προέκυψαν μετά την απομάκρυνση των χονδροειδών σφαλμάτων. Με αυτή την απεικόνιση είναι εμφανές ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των χονδροειδών σφαλμάτων βρίσκεται γενικά στα όρια της περιοχής και ιδίως στη νοτιοδυτική πλευρά της περιοχής, εκεί ακριβώς δηλαδή που υπήρχε έλλειψη δεδομένων. Ένα μικρότερο ποσοστό αυτών προκύπτει ότι βρίσκεται σε περιοχές όπου υπάρχουν κτίσματα, κυρίως στο κεντρικό τμήμα (εικόνα [26]).



Υπόμνημα

υψομετρικές διαφορές

■	χονδροειδή σφάλματα
■	-7,72 ως και -4,45
■	-4,44 ως και -2,82
■	-2,81 ως και -1,19
■	-1,18 ως και 2,06
■	2,07 ως και 3,69
■	3,70 ως και 5,32
■	5,33 ως και 8,18

Εικόνα 26: Ανάδειξη χονδροειδών σφαλμάτων και χρωματική απόδοση υψομετρικών διαφορών κεντρικού τμήματος περιοχής μελέτης σύμφωνα με τα στατιστικά μεγέθη μετά την αφαίρεση των χονδροειδών σφαλμάτων



Υπόμνημα

υψομετρικές διαφορές

■ χονδροειδή σφάλματα

■ -10,27 ως και -6,48

■ - 6,47 ως και -4,25

■ - 4,25 ως και -2,03

■ - 2,02 ως και 2,42

■ 2,43 ως και 4,65

■ 4,66 ως και 6,87

■ 6,88 ως και 12,46

Εικόνα 27: Ανάδειξη χονδροειδών σφαλμάτων και χρωματική απόδοση υψομετρικών διαφορών νότιου τμήματος περιοχής μελέτης σύμφωνα με τα στατιστικά μεγέθη μετά την αφαίρεση των χονδροειδών σφαλμάτων

Όσον αφορά στις αρνητικές υψομετρικές διαφορές αυτές υποδηλώνουν ότι το παραχθέν ΨΜΕ, στα σημεία που αυτές εντοπίζονται, έχει μεγαλύτερο υψόμετρο από αυτό του μοντέλου αναφοράς. Οι περιοχές που συγκεντρώνονται οι διαφορές αυτές, εκτός το περιγράμματος που σχολιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, είναι κατά κύριο λόγο περιοχές με κτίρια, για παράδειγμα στην περιοχή του οικισμού (εικόνα [26]). Αυτό έρχεται σε συμφωνία με όσα έχουν προαναφερθεί για τα υπολείμματα σημείων από σκεπές στο στάδιο επεξεργασίας των νεφών σημείων. Υπενθυμίζεται ότι κατά το στάδιο αυτό υπήρξε αστοχία ως προς την πλήρη απαλοιφή των κτιρίων για την δημιουργία ενός νέφους αποτελούμενο μόνο από σημεία εδάφους. Έτσι, στο νέφος που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του μοντέλου υπήρχαν σημεία σκεπών, τα οποία, σύμφωνα με την παραδοχή ότι ένας όροφος είναι περίπου 3 m, βρίσκονται τουλάχιστον 3 m ψηλότερα από το έδαφος. Προφανώς πολλά από αυτά τα κτίρια είναι πιθανό να έχουν περισσότερους από έναν ορόφους, δηλαδή να ξεπερνούν το ύψος των 3m, δημιουργώντας έτσι τις μεγάλες αρνητικές διαφορές. Οι αρνητικές διαφορές που προέκυψαν μετά την αφαίρεση των χονδροειδών σφαλμάτων ταιριάζουν με ύψη κτιρίων, αφού η ελάχιστη αρνητική διαφορά είναι -10,27 m.

Από την εικόνα [25] φαίνεται ότι στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης εμφανίζεται σημαντικό ποσοστό θετικών υψομετρικών διαφορών, γεγονός που δικαιολογεί την αυξημένη, συγκριτικά με τα άλλα δύο τμήματα, μέση υψομετρική διαφορά (πίνακας 6).

Από την εικόνα [27] γίνεται εμφανής η ύπαρξη ενός γραμμικού τμήματος κατά μήκος του οποίου έχουν προκύψει αρνητικές υψομετρικές διαφορές. Η περιοχή στην οποία εντοπίζεται το φαινόμενο αυτό πρόκειται για περιοχή με πολλά μεγάλα βιομηχανικά κτίρια, τα οποία κατά την διαδικασία κατωφλίωσης με τον δείκτη NDVI αφαιρέθηκαν αφήνοντας μία μεγάλη επιφάνεια με ελάχιστα σημεία εδάφους. Έτσι, το νέφος εδάφους σε αυτό το κομμάτι της περιοχής χαρακτηρίζεται από έλλειψη υψομετρικής πληροφορίας και ως εκ τούτου, κατά τη διαδικασία παραγωγής του μοντέλου τα παρεμβαλλόμενα υψόμετρα έχουν σημαντική απόκλιση από τα πραγματικά. Παρακάτω διαπιστώνεται ότι το γραμμικό αυτό τμήμα πρόκειται για το ρέμα Σούρες.

Συνοψίζοντας λοιπόν, αναφορικά με την ποιότητα του παραχθέντος μοντέλου εδάφους, αυτή κρίνεται ικανοποιητική με μέση υψομετρική διαφορά, για τα τρία τμήματα συνολικά, μικρότερη του ενός μέτρου. Οι κύριες πηγές σφαλμάτων εντοπίζονται στην ίδια τη διαδικασία παραγωγής του μοντέλου, η οποία όπως φαίνεται έχει ενώσει τα ακραία σημεία της περιοχής μελέτης και έχει «εμφανίσει» δεδομένα εκεί που δεν υπήρχαν, αλλά και η διαδικασία κατωφλίωσης βάσει του NDVI κατά την οποία δημιουργήθηκαν κενές επιφάνειες. Ακόμα, σχετικό με την κατωφλίωση είναι και το γεγονός ότι το νέφος που λειτούργησε ως δεδομένο εισόδου για την δημιουργία του μοντέλου περιείχε και κάποια σημεία σκεπών, επιδρώντας και αυτό αρνητικά στην ποιότητα του τελικού μοντέλου.

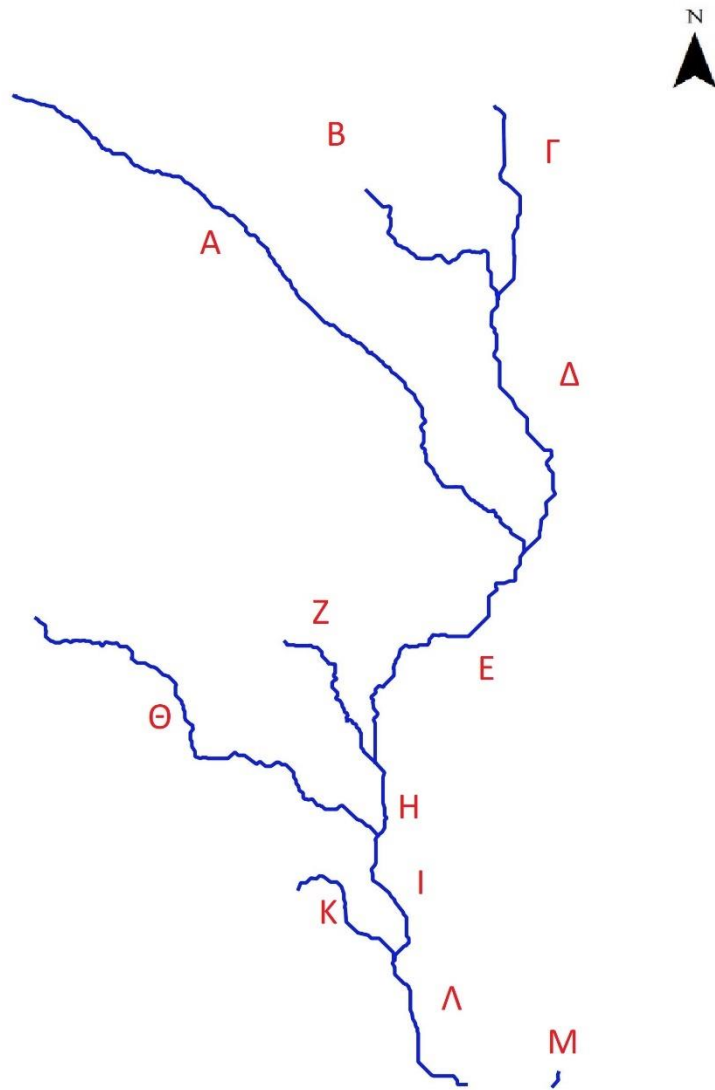
5.2 Αξιολόγηση του εξαχθέντος υδρογραφικού δικτύου

5.2.1 Δίκτυα αναφοράς

Όπως αξιολογήθηκε η ποιότητα του εξαχθέντος ψηφιακού μοντέλου, έτσι κρίνεται αναγκαίο να αξιολογηθεί και η ποιότητα του υδρογραφικού δικτύου που προέκυψε από αυτό, δηλαδή η πιστότητα με την οποία αποδίδει το πραγματικό δίκτυο. Προς διευκόλυνση της αξιολόγησης έγινε μία αυθαίρετη αρίθμηση των κλάδων του παραχθέντος δικτύου η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα [28]. Στην περίπτωση αυτή όμως, η αξιολόγηση είναι πιο περίπλοκη. Αυτό συμβαίνει γιατί αφενός δεν εξετάζονται αμιγώς αριθμητικά στοιχεία, όπως στην περίπτωση των υψομετρικών διαφορών, και αφετέρου γιατί τα δύο διαθέσιμα δίκτυα αναφοράς δεν μπορούν να θεωρηθούν ακριβώς αντίστοιχα του εξαχθέντος δικτύου.

Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο (δίκτυο αναφοράς Α), το οποίο έχει εξαχθεί κατά την εκπόνηση μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας για το πρόγραμμα «ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ» (Παπαγεωργάκη, 2012), αφορά σε ολόκληρη την έκταση της λεκάνης απορροής του ποταμού Σαρανταπόταμου. Από την άλλη, το δίκτυο που παράχθηκε για την παρούσα εργασία αφορά σε ένα υποσύνολο της λεκάνης αυτής με πολύ μικρότερη έκταση και χαμηλότερα υψόμετρα. Αυτό, όπως θα σχολιασθεί αναλυτικότερα και παρακάτω, οδηγεί σε διαφοροποιημένα αποτελέσματα. Να αναφερθεί ότι και αυτό το δίκτυο αναφοράς παράχθηκε με αυτόματη μέθοδο βάσει του ψηφιακού μοντέλου της περιοχής, το οποίο όμως είχε μέγεθος κανάβου στο έδαφος 5m σε αντίθεση με το παραχθέν αυτής της εργασίας που είχε 2m.

Το άλλο δίκτυο που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση (δίκτυο αναφοράς Β) είναι το αποτέλεσμα της ψηφιοποίησης των ρεμάτων από τον σαρωμένο χάρτη της Γ.Υ.Σ., ο οποίος χρονολογείται στο τέλος της δεκαετίας 1960. Η σύνταξή του έγινε με τη διαδικασία στερεοαπόδοσης και έτσι η απεικόνιση των ρεμάτων θεωρείται καλύτερης ακρίβειας από αυτή των αυτόματων μεθόδων. Η κλίμακά του είναι 1:5000. Ο χρονικός παράγοντας μπορεί να μην επηρεάζει τους βασικούς κλάδους του δικτύου, όμως κάποια πιο μικρά παρακλάδια είτε μπορεί να μην υπάρχουν πια λόγω έργων διευθέτησης είτε λόγω αυθαίρετων παρεμβάσεων.



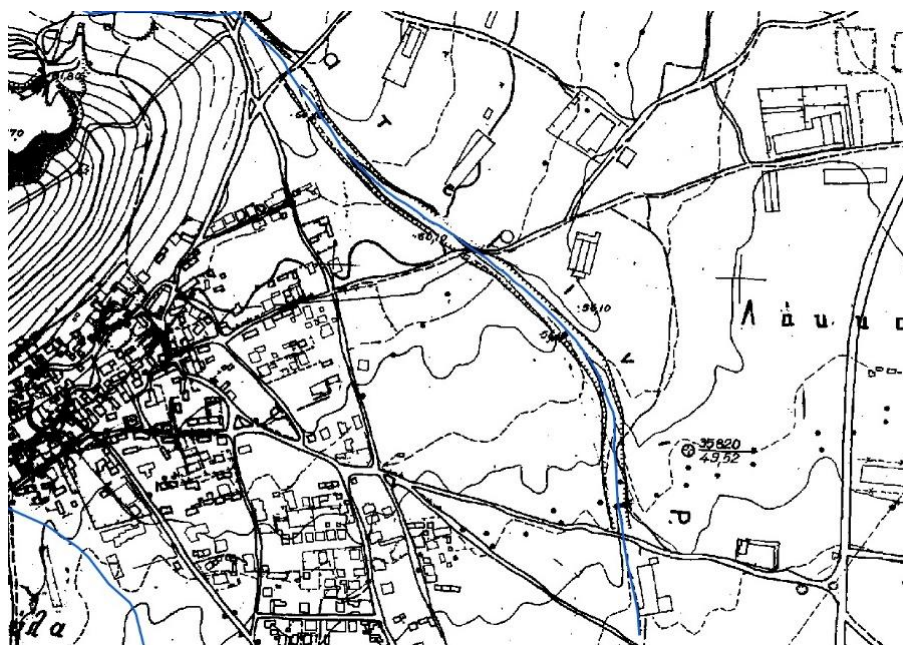
Εικόνα 28: Αυθαίρετη αρίθμηση κλάδων παραχθέντος υδρογραφικού δικτύου

Η ψηφιοποίηση των ρεμάτων του χάρτη έγινε στο περιβάλλον του QGIS, ένα ελεύθερο λογισμικό GIS. Η διαδικασία της ψηφιοποίησης μπορεί να είναι τριών ειδών: χειροκίνητη, αυτόματη διανυσματοποίηση ή ημιαυτόματη διανυσματοποίηση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η μέθοδος που ακολουθήθηκε είναι αυτή της χειροκίνητης, σύμφωνα με την οποία επιλέχθηκαν οι χωρικές οντότητες προς καταγραφή, τα ρέματα δηλαδή, από όλες τις άλλες χωρικές οντότητες που ήταν καταγεγραμμένες στον αναλογικό χάρτη. Η μέθοδος αυτή υποστηρίζει την καταγραφή όλων των κατηγοριών γεωμετρίας χωρικών οντοτήτων (σημειακές, γραμμικές, επιφανειακές) και ως αποτέλεσμα έχει τη δημιουργία αρχείων διανυσματικής δομής (Τσούλος, και συν., 2015).

Η ακρίβεια της καταγραφής αυτών των οντοτήτων εξαρτάται από την κλίμακα του χάρτη-πηγή, από την ακρίβεια της γεωαναφοράς αλλά και από την ίδια τη διαδικασία της ψηφιοποίησης. Ο χρήστης καλείται να καταγράψει τη θέση των σημειακών χαρτογραφικών στοιχείων στο γεωμετρικό κέντρο του σημειακού συμβόλου, ενώ η θέση των γραμμικών στοιχείων ψηφιοποιείται με βάση τον άξονα συμμετρίας του

αντίστοιχου συμβόλου, καθώς αυτοί είναι οι τρόποι εφαρμογής των συμβόλων κατά τη σύνθεση του χάρτη. Για τα επιφανειακά χωρικά στοιχεία, καταγράφεται η θέση του περιγράμματός τους, το οποίο υλοποιείται με ένα γραμμικό σύμβολο, οπότε ακολουθείται η ίδια πρακτική με εκείνη των γραμμικών χωρικών στοιχείων (Τσούλος, και συν., 2015).

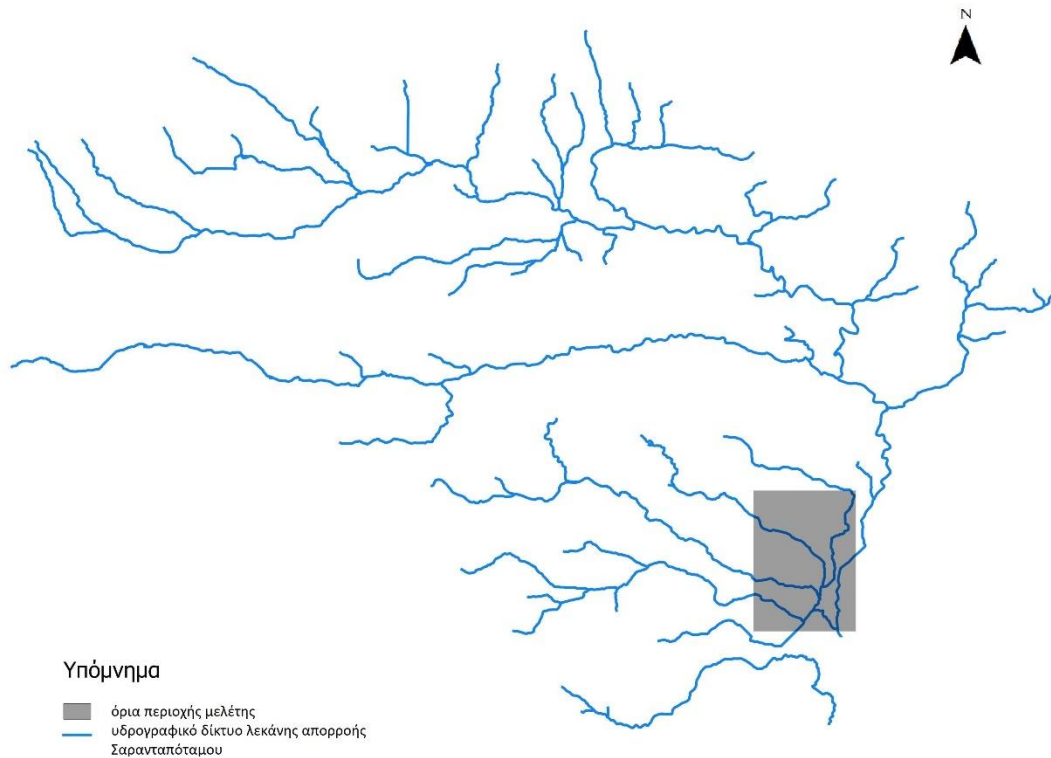
Οι δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν στο στάδιο αυτό αφορούν κυρίως στο διαχωρισμό των οντοτήτων προς καταγραφή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κάποια ρέματα σταματούσαν ξαφνικά ή σταματούσαν κοντά στη συμβολή δρόμων και δεν ήταν ξεκάθαρο αν σταματούν ή αν απλά έχουν την ίδια διεύθυνση ροής με αυτούς. Ακόμα οι διάφοροι συμβολισμοί των δρόμων ανάλογα με την κατηγορία τους προκαλούσαν και αυτοί δυσκολία στη διάκριση του υδρογραφικού δικτύου. Για τους λόγους αυτούς επιλέχθηκαν να ψηφιοποιηθούν μόνο τα ρέματα που είχαν ξεκάθαρη απεικόνιση προς αποφυγή λανθασμένων αποτελεσμάτων.



Εικόνα 29: Απόσπασμα χάρτη Γ.Υ.Σ. με ψηφιοποιημένο το ρέμα Αγ. Αικατερίνη

5.2.2 Σύγκριση με το δίκτυο αναφοράς (A)

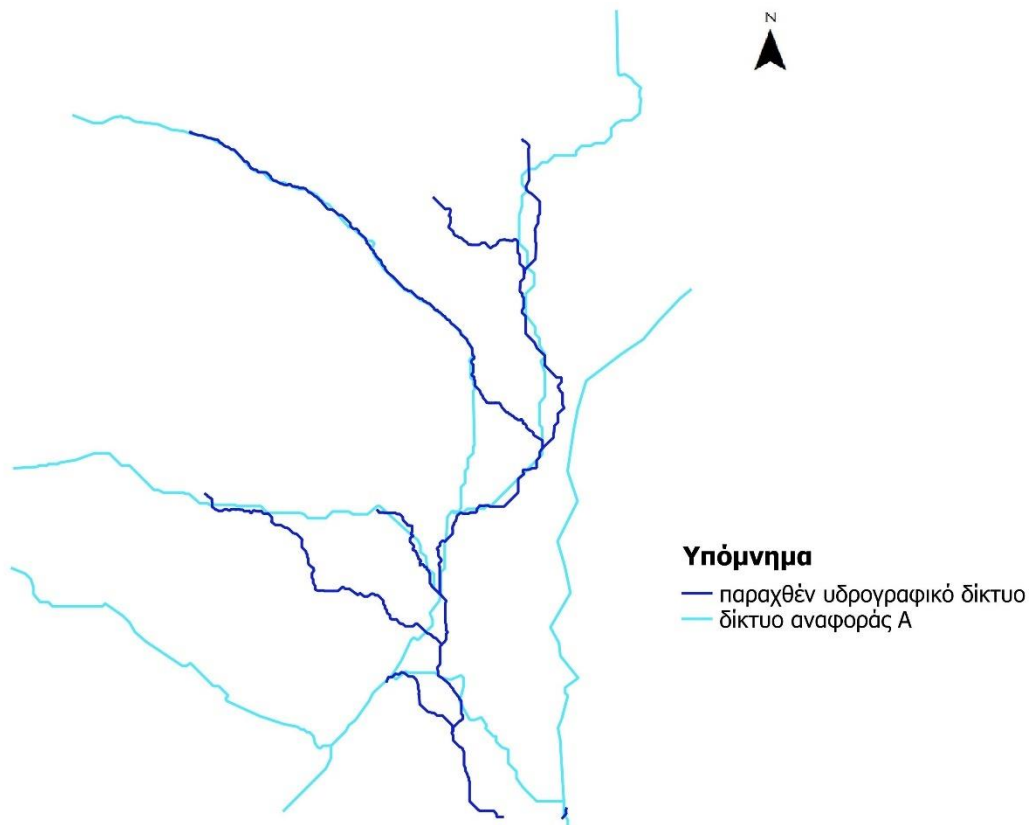
Το δίκτυο της λεκάνης απορροής του Σαρανταπόταμου ήταν προφανώς κατά πολύ μεγαλύτερο από το παραχθέν, οπότε πρώτο βήμα ήταν η απομόνωση του μέρους εκείνου που καλύπτει την περιοχή μελέτης. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το δίκτυο ολόκληρης της λεκάνης και το δίκτυο που καλύπτει μόνο την περιοχή μελέτης.



Εικόνα 30: Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του Σαρανταπόταμου (Παπαγεωργάκη, 2012) και όρια περιοχής μελέτης της παρούσας εργασίας

Αφού λοιπόν απομονώθηκε το μέρος του δικτύου που αφορά στην παρούσα εργασία, έγινε οπτική σύγκριση με το παραχθέν, η οποία φαίνεται στην εικόνα [31].

Ξεκινώντας από το βόρειο κομμάτι των δικτύων, φαίνεται να υπάρχει σημαντική ομοιότητα μεταξύ τους. Οι δυτικοί κλάδοι των δύο δικτύων (Α στο παραχθέν), δηλαδή το ρέμα μικρό Αικατερίνη, ταυτίζονται στο μεγαλύτερο μέρος τους, ενώ και οι άλλοι κλάδοι που βρίσκονται ανατολικότερα (Γ και Δ στο παραχθέν) παρουσιάζουν σχετικά μικρή απόκλιση μεταξύ των δικτύων. Ανάμεσά τους, στο παραχθέν δίκτυο υπάρχει ακόμα ένας κλάδος (Β) που στο δίκτυο αναφοράς δεν υπάρχει. Στο κεντρικό τμήμα, στα δυτικά υπάρχουν ο κλάδος (Ζ) του παραχθέντος υδρογραφικού δικτύου σχεδόν επικαλύπτει τον αντίστοιχο κλάδο του δικτύου αναφοράς και ο (Θ) που επικαλύπτει σε ένα μικρό τμήμα τον ίδιο κλάδο. Ο κλάδος (Ε) του παραχθέντος δικτύου σχεδόν ταυτίζεται με το αντίστοιχο τμήμα του δικτύου αναφοράς ενώ ο κλάδος (Η) αποκλίνει αισθητά από δίκτυο αναφοράς. Ακόμα, το μέρος του Σαρανταπόταμου που φαίνεται στο δίκτυο αναφοράς δεν εμφανίζεται καθόλου στο παραχθέν δίκτυο παρά μόνο ένα πολύ μικρό τμήμα στο τέλος του (Μ), γεγονός λογικό αφού μόνο πολύ μικρό μέρος του εμπεριέχεται στην περιοχή. Τέλος, στο νότιο κομμάτι του δικτύου εμφανίζονται οι σημαντικότερες αποκλίσεις αφού ένας ολόκληρος κλάδος του δικτύου αναφοράς, το ρέμα Σούρες (δυτικά), δεν εμφανίζεται στο παραχθέν δίκτυο και οι κοινί αντίστοιχοι κλάδοι παρουσιάζουν μικρές επικαλύψεις (Ι, Κ και Λ). Αξίζει να αναφερθεί ότι το συνολικό μήκος του παραχθέντος δικτύου είναι 8.056m ενώ το μήκος του δικτύου αναφοράς Α είναι 13.146 m. Είναι αναμενόμενο το παραχθέν δίκτυο να είναι μικρότερο κατά μήκος, αφού για την εξαγωγή του ορίστηκε ψηλότερο κατώφλι συσσώρευσης ροής από αυτό του δικτύου αναφοράς Α.



Εικόνα 31: Παραχθέν υδρογραφικό δίκτυο και δίκτυο αναφοράς A

Μετά τον οπτικό έλεγχο θεωρήθηκε σημαντικό να γίνει και μία ποσοτική σύγκριση μεταξύ των δύο υδρογραφικών δικτύων. Η μέθοδος που επιλέχθηκε για το σκοπό αυτό είναι η μετατροπή των διανυσματικών οντοτήτων σε raster δομή και η εξαγωγή του ποσοστού επικάλυψης που παρουσιάζουν τα εικονοστοιχεία των δύο δικτύων μεταξύ τους. Η μετατροπή από διανυσματικά αρχεία σε κανονικοποιημένα παρέχεται από πολλά λογισμικά GIS και στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε για ακόμη μια φορά το ArcMap 10.3. Σημαντική παράμετρος αυτής της διαδικασίας είναι η επιλογή του μεγέθους του φατνίου στο έδαφος. Το λογισμικό, ανάλογα με κάποια χαρακτηριστικά του διανυσματικού αρχείου προτείνει ένα μέγεθος. Για την περίπτωση του δικτύου αναφοράς το προεπιλεγμένο μέγεθος ήταν 10m ενώ για το παραχθέν δίκτυο ήταν 5,5m κι έτσι επιλέχθηκε το πιο αδρό από τα δύο, τα 10m.

Επόμενο βήμα της μετατροπής ήταν η αφαίρεση του προς αξιολόγηση δικτύου από το δίκτυο αναφοράς A. Αυτό έγινε με τη χρήση του εργαλείου Raster Calculator, όπως και στην αφαίρεση των ψηφιακών μοντέλων. Αυτό που προκύπτει είναι ένα raster αρχείο μόνο με τα εικονοστοιχεία των δύο δικτύων που ήταν κοινά. Ο αριθμός των εικονοστοιχείων κάθε δικτύου, όπως και του κοινού δικτύου που προέκυψε από την αφαίρεση, χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία ενός δείκτη. Ο δείκτης αυτός στην ουσία αποτελεί το ποσοστό των κοινών εικονοστοιχείων επί του συνολικού αριθμού εικονοστοιχείων του δικτύου αναφοράς.

$\Delta = N_K / N_{\Delta.A.}$ (%) όπου N_K ο αριθμός των κοινών εικονοστοιχείων και $N_{\Delta.A}$ ο αριθμός των εικονοστοιχείων του δικτύου αναφοράς.

Αριθμός εικονοστοιχείων δικτύου αναφοράς	1611
Αριθμός εικονοστοιχείων παραγόμενου δικτύου	933
Αριθμός κοινών εικονοστοιχείων	233
Δείκτης (%)	14.5 %

Πίνακας 7: Ποσοτική σύγκριση παραχθέντος δικτύου και δικτύου αναφοράς Α

Αυτό που προκύπτει λοιπόν είναι ότι το 14.5% του δικτύου αναφοράς ταυτίζεται με το υδρογραφικό δίκτυο που παράχθηκε στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής. Το υπόλοιπο παραγόμενο δίκτυο παρουσιάζει αποκλίσεις από το δίκτυο αναφοράς, με τις μεγαλύτερες να εντοπίζονται στο νότιο τμήμα όπως σχολιάστηκε κατά τον οπτικό έλεγχο. Υπολογίστηκε ακόμα ότι το 25% του παραχθέντος υδρογραφικού δικτύου ταυτίζεται με το δίκτυο αναφοράς Α.

Πέραν του εντοπισμού των αποκλίσεων και της ποσοτικοποίησής τους έχει σημασία να αναζητηθούν οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτές. Έχει τονιστεί σε διάφορα σημεία της εργασίας αυτής η στενή σχέση μεταξύ του εδάφους και της επιφανειακής απορροής και άρα κατ' επέκταση του μοντέλου εδάφους και της αυτόματης εξαγωγής υδρογραφικού δικτύου. Έτσι λοιπόν, οι αιτίες για τα σφάλματα του υδρογραφικού δικτύου εντοπίζονται κυρίως στα σφάλματα του παραγόμενου ΨΜΕ. Αν αναλογιστεί κανείς ότι η διεύθυνση ροής υπολογίζεται σε επίπεδο εικονοψηφίδας, από τα μεγαλύτερα υψόμετρα προς τα μικρότερα, είναι λογικό που το βόρειο τμήμα του υδρογραφικού δικτύου έχει αποτυπωθεί καλύτερα, αφού όπως φαίνεται και από το παραχθέν ΨΜΕ στην εικόνα [21], οι πιο «ορεινοί» όγκοι της περιοχής μελέτης έχουν αποτυπωθεί ικανοποιητικά. Όταν τα ρέματα που ξεκινούν από το βόρειο κομμάτι της περιοχής μελέτης συναντούν στο κέντρο της εξάρσεις του εδάφους (λόγων σκεπών) είναι επίσης λογικό η πορεία τους να επηρεάζεται από αυτές. Λόγω λοιπόν του ότι οι εδαφικές αυτές εξάρσεις του ΨΜΕ αποτελούν σφάλματα, όπως έχει αναλυθεί στην προηγούμενη ενότητα, το δίκτυο αποκλίνει από το δίκτυο αναφοράς στις περιοχές αυτές. Όπως αναφέρθηκε και κατά την αξιολόγηση του ΨΜΕ, περιοχές με βιομηχανικού τύπου κτίρια κατά την αφαίρεσή τους από τα νέφη για την απομόνωση σημείων εδάφους, δημιούργησαν κενές από σημεία επιφάνειες, εισάγοντας έτσι σημαντικές αποκλίσεις από την πραγματική μορφή του εδάφους.

Επίσης, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει το γεγονός ότι το ΨΜΕ βάσει του οποίου δημιουργήθηκε το δίκτυο αναφοράς αφορούσε σε πολύ μεγαλύτερη περιοχή από την περιοχή μελέτης. Η περιοχή του δικτύου αναφοράς εκτείνεται δυτικά της περιοχής μελέτης και περιλαμβάνει μέχρι και 4 φορές μεγαλύτερα υψόμετρα (Παπαγεωργάκη, 2012). Αντίθετα, η περιοχή μελέτης, εκτός από τους λόφους βόρεια και τον λόφο του προφήτη Ηλία στο κέντρο της περίπου, αποτελείται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από σχεδόν επίπεδη έκταση, γεγονός που δυσχεραίνει την εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου. Όπως φαίνεται και στην εικόνα [30], τα περισσότερα ρέματα του νότιου τμήματος ξεκινούν δυτικά της περιοχής μελέτης κι έτσι δεν στάθηκε εφικτό να

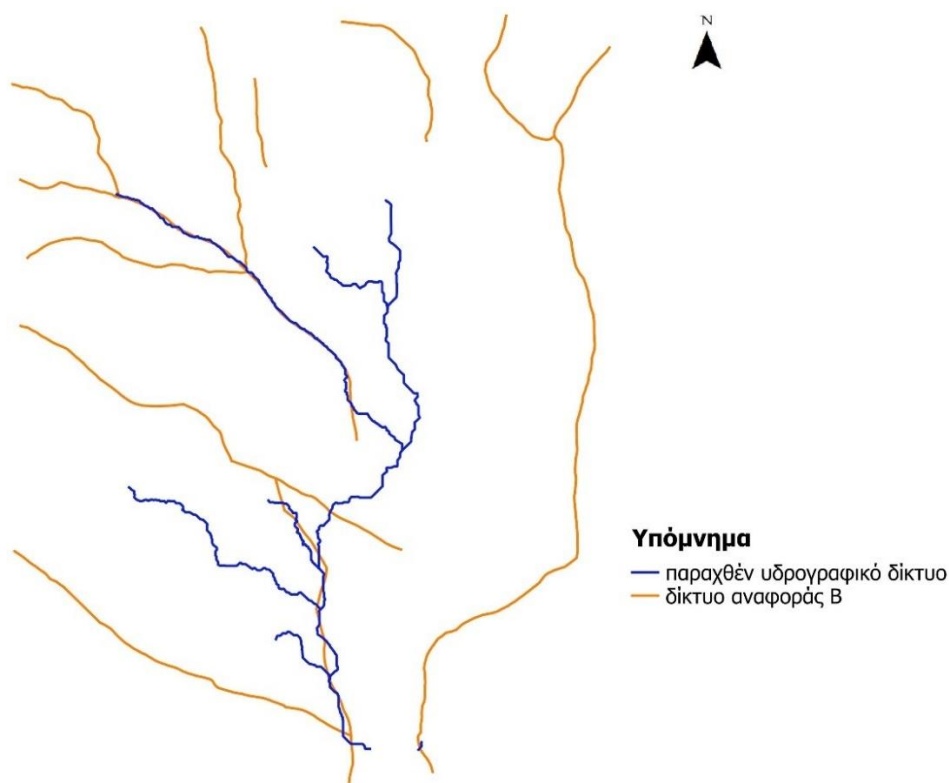
απεικονιστούν ικανοποιητικά στο παραχθέν δίκτυο, αφού στην περιοχή μελέτης το έδαφος στο νότιο κομμάτι δεν παρουσιάζει σημαντικές κλίσεις.

Τέλος, δεν θα μπορούσε να μην αναφερθεί η σημασία του διαφορετικού κατωφλίου που έχει χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή των δύο αυτών δικτύων καθώς και το διαφορετικό μέγεθος του φατνίου στο έδαφος. Αναλυτικότερα, το ΨΜΕ που χρησιμοποιήθηκε για το δίκτυο αναφοράς Α έχει μέγεθος φατνίου 5m ενώ το ΨΜΕ της περιοχής μελέτης 2m. Αυτό επιδρά στις τιμές των υψομέτρων και άρα στην αυτόματη διεξαγωγή της διεύθυνσης ροής του δικτύου.

5.2.3 Σύγκριση με το δίκτυο αναφοράς (B)

Πρώτο βήμα και αυτής της σύγκρισης είναι ο οπτικός έλεγχος των δύο δικτύων. Θα ακολουθηθεί και εδώ ένας νοητός διαχωρισμός της περιοχής μελέτης σε βόρειο, κεντρικό και νότιο τμήμα προκειμένου να υπάρχει μία συνοχή μεταξύ των δύο συγκρίσεων. Να ληφθεί υπόψη ότι ο ανατολικότερος κλάδος του ψηφιοποιημένου δικτύου (εικόνα 32) απεικονίζει τον Σαρανταπόταμο, ο οποίος, πέρα από ένα μικρό τμήμα του, δεν εμπεριέχεται στην περιοχή μελέτης. Παρ' όλα αυτά επιλέχθηκε να απεικονιστεί καθώς αποτελεί το σημαντικότερο υδάτινο όγκο του δικτύου.

Στο βόρειο τμήμα του δικτύου αναφοράς Β εντοπίζονται κάποιοι κλάδοι 1^{ης} τάξης οι οποίοι δεν απεικονίζονται στο παραχθέν δίκτυο. Πρόκεινται για κλάδους που ψηφιοποιήθηκαν με βάση των σχηματισμό των ισοϋψών καμπυλών (μισγάγγειες) και πιθανή αιτία για τη μη εξαγωγή τους στο δίκτυο είναι να παρουσίασαν μικρότερη συσσώρευση ροής από το κατώφλι που τέθηκε (120.000), αφού οι μισγάγγειες στο ΨΜΕ έχουν αποδοθεί ικανοποιητικά. Ένα βασικό τμήμα του δικτύου, το ρέμα μικρό Αικατερίνη (Α στο παραχθέν), στο μεγαλύτερο μέρος του ταυτίζεται με το αντίστοιχο στο δίκτυο αναφοράς Β. Ακόμα, τρεις κλάδοι του παραχθέντος δικτύου (Β, Γ και Δ) δεν εμφανίζονται στο δίκτυο αναφοράς. Στο κεντρικό τμήμα της περιοχής τα δίκτυα παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις καθώς στο παραχθέν δίκτυο υπάρχουν κλάδοι (Ε και Θ) που δεν παρουσιάζονται στο δίκτυο αναφοράς. Από την άλλη, οι κλάδοι (Ζ και Η) του παραχθέντος δικτύου σχεδόν ταυτίζονται με τα αντίστοιχα τμήματα του δικτύου αναφοράς. Τέλος, στο νότιο τμήμα φαίνεται να υπάρχει μικρή απόκλιση ως προς τον κεντρικό κλάδο μεταξύ των δύο δικτύων (Ι και Λ στο παραχθέν), όμως δυτικά, και εδώ γίνεται φανερή η παράλειψη του ρέματος Σούρες από το παραχθέν δίκτυο. Ο Σαρανταπόταμος εμφανίζει μόνο ένα μικρό τμήμα του (Μ στο παραχθέν) αφού, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη σύγκριση, βρίσκεται κατά πλειοψηφία εκτός περιοχής μελέτης. Το μήκος του δικτύου που προέκυψε από την ψηφιοποίηση είναι 12.672 m.



Εικόνα 32: Παραχθέν υδρογραφικό δίκτυο και δίκτυο αναφοράς B

Μετά τον οπτικό έλεγχο εφαρμόστηκε και σε αυτή τη σύγκριση η ίδια μέθοδος για ποσοτικοποίηση της. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Αριθμός εικονοστοιχείων δικτύου αναφοράς	1609
Αριθμός εικονοστοιχείων παραγόμενου δικτύου	933
Αριθμός κοινών εικονοστοιχείων	166
Δείκτης (%)	10.3 %

Πίνακας 8: Ποσοτική σύγκριση παραχθέντος δικτύου και δικτύου αναφοράς B

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι 10.3% του δικτύου αναφοράς B ταυτίζεται με το παραγόμενο δίκτυο. Το ποσοστό αυτό είναι μικρότερο από αυτό του δικτύου αναφοράς A (14,5%). Οι αποκλίσεις από το δίκτυο αναφοράς B μπορούν να αιτιολογηθούν, όπως και στην προηγούμενη σύγκριση, από τις αστοχίες του παραγόμενου ΨΜΕ, από την ίδια την περιοχή μελέτης, από τη χρήση ψηλού κατωφλίου αλλά και από τη διαδικασία ψηφιοποίησης. Υπολογίστηκε ακόμα ότι το 17.8% του παραχθέντος υδρογραφικού δικτύου ταυτίζεται με το δίκτυο αναφοράς B.

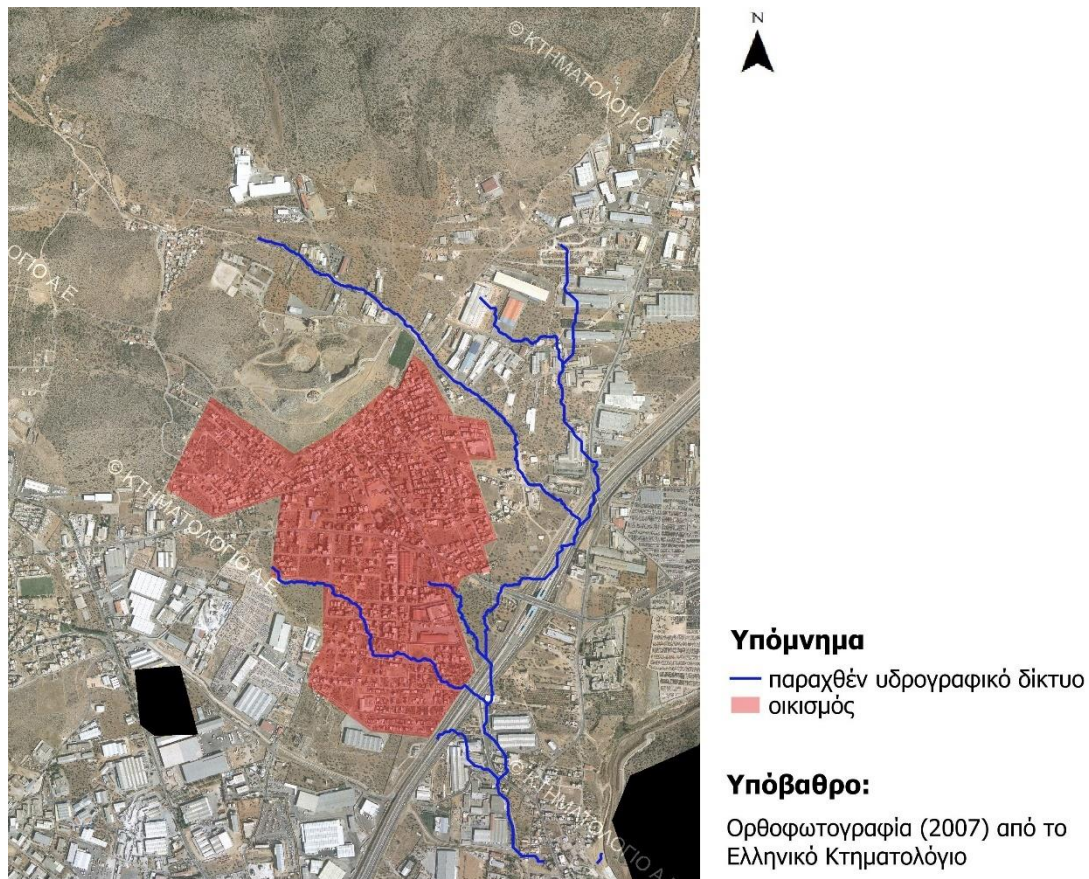
Στην προκειμένη όμως περίπτωση προστίθεται ακόμα ένας παράγοντας, ο οποίος είναι σχετικός με την χρονολογική διαφορά που έχουν ο χάρτης της Γ.Υ.Σ. (τέλη δεκαετίας 1960) και οι αεροφωτογραφίες που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του ΨΜΕ της περιοχής μελέτης. Ο οικισμός της Μαγούλας μέσα σε αυτά τα χρόνια έχει γνωρίσει σημαντική επέκταση, τα βιομηχανικά κτίρια έχουν πληθύνει και έτσι είναι πιθανό είτε λόγω διευθετήσεων ρεμάτων είτε αυθαίρετων ανθρώπινων παρεμβάσεων, το υδρογραφικό δίκτυο να έχει μεταβληθεί ελαφρώς.

Λόγω της πολύπλοκης φύσης της διαδικασίας της οπτικής σύγκρισης των δικτύων, κρίνεται σκόπιμο στο τέλος αυτών των δύο ενοτήτων να γίνει μία συνοπτική παρουσίαση των σημαντικότερων σημείων ως προς την αξιολόγηση του παραχθέντος υδρογραφικού δικτύου:

1. Το ρέμα μικρό Αικατερίνη έχει αποδοθεί πιστά στο παραχθέν δίκτυο.
2. Το ρέμα Σούρες παραλείπεται στο παραχθέν δίκτυο.
3. Τα υπόλοιπα τμήμα παρουσιάζουν σε κάποιες περιοχές μικρές και σε άλλες μεγάλες αποκλίσεις από τα δεδομένα αναφοράς, οι οποίες οφείλονται σε διάφορους παράγοντες όπως το κατώφλι συσσώρευσης ροής, η ποιότητα του ΨΜΕ, η περιοχή μελέτης αλλά και η ίδια η διαδικασία αυτόματης εξαγωγής του δικτύου.

5.2.4 Έλεγχος του παραχθέντος δικτύου σε σχέση με το δομημένο περιβάλλον

Μετά τη σύγκριση του παραχθέντος δικτύου με τα δύο δίκτυα αναφοράς θεωρήθηκε σημαντικό να αναδειχθεί το πρώτο σε σχέση με το δομημένο περιβάλλον. Η ανάδειξη αυτή αποσκοπεί στον εντοπισμό αστοχιών κατά την αυτόματη διαδικασία για την εξαγωγή του δικτύου. Παράλληλα έγινε και στερεοσκοπική παρατήρηση της περιοχής για έλεγχο της μορφής του εδάφους σε σημεία που εμφανώς απεικονίζουν στρεβλά την πραγματική μορφή του δικτύου, όπως κάποιοι κλάδοι που τέμνουν μεγάλους οδικούς άξονες. Στο πλαίσιο αυτό, έχει δημιουργηθεί μία απεικόνιση του δικτύου με υπόβαθρο ορθοφωτογραφία της περιοχής μελέτης, στην οποία έχει δημιουργηθεί το περίγραμμα του οικισμού.



Εικόνα 33: Απεικόνιση του παραχθέντος υδρογραφικού δικτύου με υπόβαθρο ορθοφωτογραφία της περιοχής μελέτης

Από την παραπάνω εικόνα φαίνεται οι κλάδοι Β, Γ και Δ να διασχίζουν βιομηχανική περιοχή. Προφανώς η πηγή των κλάδων αυτών δεν είναι στο σημείο που φαίνεται, δηλαδή μέσα στην βιομηχανική περιοχή, αλλά η κατωφλίωση για τη συσσώρευση ροής δεν εμφανίζει τα πρώτα τμήματα τους. Επεξηγηματικά, τόσο από το ΨΜΕ όσο και από στερεοσκοπική παρατήρηση, φαίνεται οι σχηματισμοί που παρατηρούνται βορειότερα των κλάδων αυτών να δικαιολογούν την ύπαρξή τους. Πέραν όμως των σχηματισμών αυτών, οι περιοχές που διασχίζουν είναι κατά κύριο λόγο επίπεδες. Άρα λοιπόν, φαίνεται να είναι εφήμεροι κλάδοι που προκύπτουν από την αυτόματη εξαγωγή λόγω της ευαισθησίας του αλγορίθμου στις υψομετρικές διαφορές.

Όσον αφορά στο ρέμα μικρό Αικατερίνη, δηλαδή τον κλάδο Α και Β, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του έχει αποδοθεί πιστά, στο στη συμβολή με τον κλάδο Δ φαίνεται να τέμνει την Αττική Οδό, πράγμα αδύνατο. Έπειτα από στερεοσκοπική παρατήρηση κατά μήκος του ρέματος φάνηκε ότι σε ένα σημείο η κοίτη του είτε διακόπτεται είτε συνεχίζει υπόγεια. Στο σημείο αυτό αλλάζει μάλιστα αισθητά και η διεύθυνση ροής του ρέματος στο εξαχθέν δίκτυο. Οι πιθανές εξηγήσεις για αυτή την αστοχία του δικτύου είναι δύο. Η πρώτη είναι να οφείλεται σε αστοχία του μοντέλου εδάφους, λόγω εσφαλμένων ομολογιών στο σημείο που παρατηρείται η διακοπή ή η υπογειοποίηση του ρέματος. Η δεύτερη αφορά στη διαδικασία αυτόματης εξαγωγής του δικτύου όπου στο πρώτο βήμα γίνεται υδρολογική διόρθωση των μοντέλων, δηλαδή εντοπίζονται σημεία που περιβάλλονται από μεγαλύτερα υψόμετρα και

αποδίδεται σε αυτά υψόμετρο σύμφωνα με τα γειτονικά του ώστε να μην εγκλωβίζεται το νερό.

Οι κλάδος Z, αν και έπειτα από στερεοσκοπική παρατήρηση φαίνεται να δικαιολογείται η ύπαρξή του, και αυτός στο τέλος του τέμνει την Αττική Οδό. Αυτή η περίπτωση είναι παρόμοια με αυτή των κλάδων Β και Γ, δηλαδή η μορφή του εδάφους ανάντη δικαιολογεί την έναρξη ροής, όμως από ένα σημείο και μετά η περιοχή είναι επίπεδη οπότε η συνέχισή του οφείλεται πιθανότατα στην ευαισθησία του αλγορίθμου αυτόματης εξαγωγής.

Ο κλάδος Κ και αυτός εμφανίζεται να τέμνει την Αττική Οδό, όμως παρατηρώντας στερεοσκοπικά την ευρύτερη περιοχή που φαίνεται να διασχίζει, παράλληλα με επισκόπηση του παραχθέντος μοντέλου, δεν συμπεραίνεται ότι πρόκειται για κλάδο του αληθινού δικτύου. Πιθανή αιτία εμφάνισής του είναι ο συνδυασμός αστοχίας του μοντέλου εδάφους και ευαισθησίας του αλγορίθμου αυτόματης εξαγωγής υδρογραφικού δικτύου.

Κεφάλαιο 6^ο: Συμπεράσματα και δυνατότητες βελτίωσης

Στο κεφάλαιο αυτό, βάσει όσων προέκυψαν από τις διαδικασίες σύγκρισης και ελέγχου, γίνεται μία επισήμανση των παραγόντων που είχαν καθοριστικό ρόλο στα διάφορα στάδια και παράλληλα συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν σχετικά με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Επίσης, προτείνονται εναλλακτικές για βελτίωση των αποτελεσμάτων.

Μετά την ολοκλήρωση των διαδικασιών της δημιουργία ΨΜΕ, της εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου και της σύγκρισής τους με κάποια δεδομένα αναφοράς, είναι σημαντική μία συνολική αποτίμηση αυτών. Με την έννοια αποτίμηση εννοείται η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη μεθοδολογία και τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν, αλλά και προτάσεις για βελτίωση των αποτελεσμάτων.

Προτιμήθηκε η αποτίμηση αυτή να ακολουθεί τη χρονολογική σειρά των διαδικασιών, γι' αυτό και πρώτα θα αναφερθούν τα συμπεράσματα ως προς την διαδικασία παραγωγής ψηφιακού μοντέλου εδάφους, περιλαμβάνοντας όλα τα στάδια για την ολοκλήρωσή της, όπως η ψηφιακή συνταύτιση και η επεξεργασία των νεφών. Στην επόμενη ενότητα θα αναφερθούν τα συμπεράσματα σχετικά με την διαδικασία αυτόματης εξαγωγής υδρογραφικού δικτύου μαζί με ό,τι αυτή περιλαμβάνει.

6.1 Συμπεράσματα σχετικά με την παραγωγή ΨΜΕ

Τα στάδια για την παραγωγή κανονικοποιημένου ΨΜΕ στην εργασία αυτή ήταν συνοπτικά η ψηφιακή συνταύτιση των εικόνων, η επεξεργασία των νεφών και τέλος η αυτόματη παραγωγή του μοντέλου βάσει των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τα προαναφερθέντα στάδια. Έτσι, για κάθε ένα από αυτά κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία αποτίμηση.

Σημασία περιοχής μελέτης

Κατά την διαδικασία αξιολόγησης του παραχθέντος ΨΜΕ έγινε αντιληπτή η αρνητική επίδραση του σχήματος της περιοχής μελέτης στο τελικό αποτέλεσμα. Πιο συγκεκριμένα, τα όριά της δεν είναι ορθογώνια, αλλά σχηματίζουν ένα ακανόνιστο πολύγωνο, γεγονός το οποίο κατά τις αυτόματες διαδικασίες δημιουργίας μοντέλων γεννά λανθασμένα δεδομένα στο περίγραμμα της περιοχής. Βελτιωμένα αποτελέσματα θα μπορούσαν να προκύψουν αν επιλεγόταν μία περιοχή με ορθογώνιο σχήμα, καθώς θα αποφεύγονταν η εισαγωγή σημαντικών σφαλμάτων στα υψομετρικά δεδομένα του μοντέλου.

Διαδικασία ψηφιακής συνταύτισης

Η εξαγωγή τρισδιάστατης πληροφορίας από αεροφωτογραφίες, μέσω της πυκνής συνταύτισης σημείων, αποτελεί έναν οικονομικό, σχετικά απλό τρόπο και τα αποτελέσματά της μπορούν να είναι υψηλής ακρίβειας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για μικρές είτε για μεγάλες εκτάσεις. Η δημιουργία όμως μοντέλου εδάφους, μέσω ψηφιακής συνταύτισης, απαιτεί την απομάκρυνση της βλάστησης και των κτιρίων στην περίπτωση κατοικημένης περιοχής. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να

συνοδεύεται και από κατάλληλη ραδιομετρική πληροφορία. Για παράδειγμα, η ύπαρξη του εγγύς υπέρυθρου καναλιού στις λήψεις των αεροφωτογραφιών που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα εργασία διευκόλυναν τον διαχωρισμό των κτιρίων, της βλάστησης και του εδάφους προκειμένου να δημιουργηθεί ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Μέσω της ανίχνευσης της ακτινοβολίας στο εγγύς υπέρυθρο δημιουργήθηκε ο δείκτης NDVI ο οποίος είχε καταλυτικό ρόλο στην εξαγωγή του ΨΜΕ. Άρα λοιπόν, είναι αναγκαίο για τη δημιουργία ΨΜΕ μέσω συνταύτισης εικόνων να υπάρχει κατάλληλη ραδιομετρική πληροφορία, ανάλογα με την εκάστοτε περιοχή μελέτης, που να διευκολύνει την ταξινόμηση των στοιχείων που απεικονίζονται. Οι δορυφορικές εικόνες στην πλειοψηφία τους παρέχουν πληθώρα φασματικών πληροφοριών όπου στις μηχανές δεν συναντώνται εύκολα.

Ως προς την ακρίβεια των υψομετρικών δεδομένων που προκύπτουν από διαδικασίες συνταύτισης, αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού καθώς και από την εικονιζόμενη σκηνή. Επεξηγηματικά, ο ημικαθολικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε, αλλά και το σύνολο των καθολικών αλγορίθμων εν γένει, για την εύρεση των ομολογιών χρησιμοποιεί το μέγεθος της παράλλαξης x , το οποίο επηρεάζεται άμεσα με την αποκατάσταση των προσανατολισμών που αναφέρθηκαν. Όσον αφορά στην εικονιζόμενη σκηνή εννοείται η ύπαρξη υψής, καθώς η συνταύτιση σε περιοχές με χαμηλή υψή μπορεί να οδηγήσει σε αποτελέσματα χαμηλής ποιότητας. Έτσι λοιπόν είναι σημαντικό όταν χρησιμοποιείται ψηφιακή συνταύτιση για την παραγωγή ΨΜΕ να έχουν επιτευχθεί μεγάλες ακρίβειες κατά την αποκατάσταση των προσανατολισμών και η περιοχή να ενδείκνυται για το σκοπό αυτό.

Νέφη σημείων: θόρυβος και ταξινόμηση

Το αποτέλεσμα της διαδικασίας συνταύτισης είναι νέφη σημείων ανά επικαλυπτόμενο ζεύγος φωτογραφιών. Τα νέφη αυτά περιλαμβάνουν συνήθως και σημεία εσφαλμένων ομολογιών, τα οποία γίνονται αντιληπτά επειδή δημιουργούν συγκεντρώσεις εκτός των νοητών ορίων της περιοχής. Προφανώς είναι πιθανό να υπάρχουν και εσφαλμένες ομολογίες εντός των ορίων, οι οποίες όμως δεν γίνονται εύκολα αντιληπτές. Ως εκ τούτου, πρώτο βήμα πριν την ταξινόμηση για την απομόνωση σημείων εδάφους πρέπει να είναι η εφαρμογή κάποιου αλγορίθμου απομάκρυνσης των εμφανώς εσφαλμένων σημείων, ή αλλιώς του θορύβου όπως συχνά αυτά ονομάζονται. Μόνο αφού ολοκληρωθεί η αφαίρεση του θορύβου μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία ταξινόμησης των οντοτήτων βάσει των φασματικών τους ιδιοτήτων.

Στην προκειμένη εργασία η ταξινόμηση έγινε βάσει του δείκτη NDVI και είχε στόχο την δημιουργία ενός νέφους με σημεία του εδάφους. Αυτό που έγινε εμφανές μέσα από την εργασία αυτή είναι ότι οι τιμές κατωφλίωσης του δείκτη αυτού για την κατηγοριοποίηση διαφόρων οντοτήτων μπορούν να διαφέρουν ανάλογα με την περιοχή για την οποία εφαρμόζονται. Η ύπαρξη σκεπών από κεραμίδια σε συνδυασμό με μεγάλες εκτάσεις γυμνού εδάφους και χαμηλής βλάστησης είναι πιθανό να δυσχεραίνουν την απομόνωση του εδάφους, καθώς εμφανίζουν παρόμοιες τιμές δείκτη NDVI. Για την αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων είναι σκόπιμο είτε να διατίθενται και άλλοι δείκτες είτε να γίνονται πολλαπλές

δοκιμές κατωφλίων, ώστε να επιλέγεται αυτό που προσφέρει το βέλτιστο αποτέλεσμα για τον εκάστοτε στόχο, παραδείγματος χάρη τη δημιουργία μοντέλου εδάφους.

Η διαδικασία ταξινόμησης των αντικειμένων που απεικονίζονται στο νέφος, εκτός από τα υπολείμματα σκεπών, παρουσίασε και ακόμα μία σημαντική αστοχία σε σχέση με την μετέπειτα δημιουργία του ΨΜΕ. Κατά την αφαίρεση των κτιρίων στις θέσεις τους χανόταν η οριζοντιογραφική αλλά και η υψομετρική πληροφορία όπως είναι λογικό. Έτσι, δημιουργήθηκαν μεγάλες επιφάνειες του νέφους σημείων εδάφους χωρίς δεδομένα, εισάγοντας σφάλματα στο παραχθέν μοντέλο εδάφους. Για την αντιμετώπιση αυτών των κενών προτείνεται ο συνδυασμός επίγειων μετρήσεων σε τέτοια τμήματα, δηλαδή που περιέχουν πολλά κτίρια ή ακόμα και η χρήση συστήματος LiDAR.

Δημιουργία μοντέλου σε δομή κανάβου

Σημαντικό ρόλο για την παραγωγή του ΨΜΕ έχει, εκτός του τρόπου συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων, και η επιλογή των παραμέτρων. Το μέγεθος του φατνίου στο έδαφος αποτελεί βασική παράμετρο και η επιλογή του πρέπει να γίνεται προσεκτικά. Αναλυτικότερα, έχει να κάνει με την πυκνότητα των σημείων, την μορφολογία του εδάφους προς απεικόνιση αλλά και την ακρίβεια που θέλει να πετύχει ο χρήστης. Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η παραγωγή κανονικοποιημένου μοντέλου χρησιμοποιεί τη μέθοδο της παρεμβολής για να «δημιουργήσει» δεδομένα στα απαιτούμενα σημεία και αυτό οδηγεί σε μείωση της αρχικής ακρίβειας των δεδομένων. Ως εκ τούτου είναι σκόπιμο να επιδιώκεται η συλλογή του μέγιστου δυνατού αριθμού σημείων, έτσι ώστε τα παρεμβαλλόμενα σημεία να είναι καλής ακρίβειας. Επεξηγηματικά, όταν υπάρχουν μεγάλες κενές επιφάνειες στα δεδομένα εισόδου, τότε υπάρχει σημαντική έλλειψη πληροφορίας και έτσι τα παρεμβαλλόμενα σημεία σε αυτές θα είναι χαμηλής ακρίβειας. Αντίθετα, η ύπαρξη πληθώρας σημείων επιτρέπει τη χρήση έγκυρης πληροφορίας από γειτονικά σημεία που οδηγεί σε παρεμβολή καλύτερης ακρίβειας.

6.2 Συμπεράσματα σχετικά με την αυτόματη εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου

Όπως έχει αναφερθεί ξανά, ο αλγόριθμος αυτόματης εξαγωγής υδρογραφικού δικτύου που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται στον αλγόριθμο απορροής 8 διευθύνσεων. Το μόνο δεδομένο εισόδου που δέχεται είναι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και ένα κατώφλι για τον ορισμό του δικτύου. Επομένως, τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από την εφαρμογή του σχετίζονται με την καταλληλότητα ή όχι της περιοχής εφαρμογής, το μοντέλο εδάφους, το κατώφλι αλλά και με τον αλγόριθμο αυτό καθαυτό.

Σημασία περιοχής μελέτης

Κατά την αξιολόγηση του παραχθέντος δικτύου υπογραμμίστηκε η αστοχία της μεθόδου να αποδώσει το ρέμα Σούρες, το οποίο είναι ένα από τα βασικότερα της ευρύτερης περιοχής. Η αιτία αυτής της αστοχίας εντοπίζεται τόσο σε ένα

μειονέκτημα της περιοχής που επιλέχθηκε για εφαρμογή της μεθόδου όσο και στη διαδικασία απομόνωσης σημείων του εδάφους βάσει του NDVI.

Αναλυτικότερα, το βασικό αυτό μειονέκτημα αφορά στην μικρή έκτασή της αλλά και στη μορφολογία του εδάφους της. Επεξηγηματικά, ο οικισμός της Μαγούλας και η ευρύτερη περιοχή που επιλέχθηκε γύρω από αυτόν αποτελούν ένα μικρό μέρος μίας ευρύτερης λεκάνης απορροής στη Δυτική Αττική. Εξαιτίας λοιπόν του μικρού αυτού μεγέθους δεν συμπεριλαμβάνονται σημαντικοί ορεινοί όγκοι που υπάρχουν στην εγγύς περιοχή και οι οποίοι καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το υδρογραφικό δίκτυο. Εν αντιθέσει, κατά ένα μεγάλο μέρος αποτελείται από επίπεδες εκτάσεις, με εξαίρεση το βόρειο τμήμα που απαρτίζεται από λόφους με υψόμετρο ως 180 m και τον λόφο του Προφήτη Ηλία, ο οποίος καταλαμβάνει μικρή έκταση στο κέντρο της, με υψόμετρο ως 120 m. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το νερό στην επιφάνεια του εδάφους ρέει από τα μεγαλύτερα υψόμετρα προς τα μικρότερα, δέσμευση την οποία χρησιμοποιεί και ο αλγόριθμος 8 διευθύνσεων, η διαδικασία ορθής εξαγωγής ρεμάτων σε επίπεδες σχετικά περιοχές δυσχεραίνεται. Η έκταση δυτικά της περιοχής μελέτης περιλαμβάνει υψόμετρα ως και τέσσερις φορές μεγαλύτερα, από τα οποία όπως είναι λογικό ξεκινούν ρέματα, ένα από τα οποία είναι και το ρέμα Σούρες, που εκτείνονται ως και την περιοχή μελέτης. Αυτή όμως η σημαντική υψομετρική πληροφορία παραλείπεται από το υποσύνολο της περιοχής που επιλέχθηκε, δημιουργώντας ελλείψεις στο τελικό αποτέλεσμα του υδρογραφικού δικτύου. Με λίγα λόγια θα έλεγε κανείς ότι η περιοχή που επιλέχθηκε για την εφαρμογή χαρακτηρίζεται από έλλειψη σημαντικής υψομετρικής πληροφορίας. Με βάση τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι για την επιτυχή εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου μέσω αυτόματων διαδικασιών έχει μεγάλη σημασία η περιοχή η οποία ερευνάται. Μία περιοχή μελέτης που αντιπροσωπεύει ολόκληρη τη λεκάνη απορροής θα αποδώσει ακριβέστερα αποτελέσματα και για αυτό προτείνεται η χρήση τέτοιων. Βέβαια αν η περιοχή μελέτης δεν αποτελεί ολόκληρη λεκάνη απορροής, αλλά εμπεριέχονται σε αυτή οι βασικοί ορεινοί όγκοι της, τότε πάλι θα προκύψουν πιο ακριβή αποτελέσματα.

Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

Η διαδικασία απομόνωσης σημείων εδάφους του νέφους για την παραγωγή του μοντέλου εδάφους βάσει του οποίου εξήχθη και το υδρογραφικό δίκτυο, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, δημιούργησε κενές περιοχές. Η παρεμβολή των σημείων κατά την παραγωγή του ψηφιδωτού μοντέλου δεν κατάφερε να δημιουργήσει δεδομένα ψηλής ακρίβειας για τις κενές περιοχές, καθώς η πληροφορία ήταν ελάχιστη. Αυτό με τη σειρά του επηρέασε την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου.

Αλγόριθμος Απορροής 8 Διευθύνσεων

Ένα άλλο γεγονός που υποβαθμίζει την ποιότητα του δικτύου που παράχθηκε με αυτόματη μέθοδο είναι η εμφάνιση ρεμάτων που δεν υπάρχουν στην πραγματικότητα. Ευθύνη για το φαινόμενο αυτό, στο στάδιο της αξιολόγησης στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποδίδεται στην ευαισθησία του αλγορίθμου της απορροής 8 διευθύνσεων. Με την λέξη ευαισθησία υπονοείται η ευκολία με την οποία ο αλγόριθμος αυτός ορίζει τις διευθύνσεις ροής και παράλληλα την τάση του να μην

διακόπτει τα ρέματα. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται το υψόμετρο κάθε εικονοστοιχείου του μοντέλου εδάφους και ορίζεται ως διεύθυνση ροής του η διεύθυνση μέγιστης κλίσης, χωρίς να τίθεται κάποιο κατώφλι για αυτή την κλίση. Επεξηγηματικά, ακόμα και αν η μέγιστη κλίση βασίζεται σε υψομετρική διαφορά λίγων εκατοστών θα θεωρηθεί διεύθυνση ροής. Λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα των μεθόδων συλλογής υψομετρικών δεδομένων, όπου ακόμα και για τις πιο ακριβείς μεθόδους είναι της τάξης των εκατοστών, κάτι τέτοιο μπορεί εύκολα να οδηγήσει στην “γέννηση” νέων κλάδων κατά την αυτόματη εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου. Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων προτείνεται η χρήση των μεθόδων αυτόματης εξαγωγής υδρογραφικού δικτύου να συνοδεύεται από ΨΜΕ πολύ υψηλής ακρίβειας. Η πιθανότητα όμως “γέννησης” λανθασμένων δικτύων δεν εξελίσσεται για αυτό και προτείνεται ο έλεγχος τυχόν αμφίβολων αποτελεσμάτων με στερεοσκοπική παρατήρηση της περιοχής ή με επιτόπιες μετρήσεις.

Κατώφλι για την εξαγωγή του δικτύου

Το κατώφλι συσσώρευσης ροής που καλείται να ορίσει ο χρήστης ώστε να κατηγοριοποιηθούν τα εικονοστοιχεία του μοντέλου ως μέρος του υδρογραφικού δικτύου ή όχι, κατέχει σημαντικό ρόλο στο τελικό προϊόν. Αναδείχθηκε μέσω της εργασίας (βλέπε ενότητα 4.8) ότι η τιμή του δεν επηρεάζει τη διεύθυνση ροής των ρεμάτων αλλά το μήκος τους και την πυκνότητά τους. Με αυτό εννοείται ότι με τον ορισμό ενός υψηλού κατωφλίου τότε οι κλάδοι 1^{ης} τάξης που θα προκύψουν θα είναι μικρότεροι σε μήκος από ότι αυτοί που θα προκύψουν με ένα χαμηλότερο. Επίσης είναι πιθανό κάποιοι κλάδοι 1^{ης} τάξης να μην εμφανίζονται κιάλας, οδηγώντας στη δημιουργία ενός πιο αραιού δικτύου. Αντίθετα, η χρήση ενός χαμηλού κατωφλίου μπορεί να οδηγήσει στην εξαγωγή ρεμάτων που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Κατά την επιλογή του κατωφλίου πρέπει να συνυπολογίζονται ο σκοπός απεικόνισης του δικτύου, το μέγεθος εδαφοψηφίδας του μοντέλου και η ακρίβειά του καθώς και η περιοχή εφαρμογής. Όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος της εδαφοψηφίδας στο έδαφος τόσο μεγαλύτερη η τιμή του κατωφλίου και αντίστροφα. Αυτό είναι λογικό καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η εδαφοψηφίδα τόσο μεγαλύτερη επιφάνεια του εδάφους εξετάζει ο αλγόριθμος για την εξαγωγή του δικτύου, αφού ο τελευταίος βασίζεται στα εικονοστοιχεία του μοντέλου.

Τέλος, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά και με επιγραμματικό τρόπο οι μεταβολές στα δεδομένα και τις διαδικασίες, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε βελτιωμένα αποτελέσματα τόσο ως προς το μοντέλο εδάφους όσο και ως προς εξαχθέν υδρογραφικό δίκτυο.

- Ως προς τη δημιουργία μοντέλου εδάφους, ο συνδυασμός επίγειων μετρήσεων ή καταγραφές με συστήματα LiDAR και ψηφιακής συνταύτισης μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία ακριβέστερου μοντέλου, το οποίο είναι απαραίτητο για τη χρήση του αλγορίθμου αυτόματης εξαγωγής υδρογραφικού δικτύου. Ειδικά τα συστήματα LiDAR μπορούν να προσφέρουν και εύκολη ταξινόμηση για την απομόνωση σημείων εδάφους. Ακόμα η περιοχή εφαρμογής προτείνεται να έχει σαφή ορθογώνια όρια.

- Ως προς την ταξινόμηση νεφών σημείων προτείνεται η χρήση διαφόρων δεικτών για τον ευκολότερο εντοπισμό των αντικειμένων της σκηνής. Για το σκοπό αυτό απαιτείται φασματική πληροφορία πέραν του ορατού φάσματος. Αυτή η δυνατότητα παρέχεται εύκολα κυρίως από δορυφορικές εικόνες, καθώς παρέχουν εύρος φασματικής κάλυψης.
- Ως προς την αυτόματη εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου προτείνεται η περιοχή μελέτης να αποτελεί όλη την έκταση της εκάστοτε λεκάνης απορροής και όχι ένα μικρό τμήμα της.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Bhowmik Avit K, Schäfer Ralf Bernhard and Metz Markus An automated, objective and open source tool for stream threshold selection and upstream riparian corridor delineation [Article] // Environmental Modelling and Software. - 2015. - pp. 240-250.

Gehrke S. [et al.] SEMI-GLOBAL MATCHING: AN ALTERNATIVE TO LIDAR FOR DSM GENERATION? [Article].

Haala Norbert and Brenner Claus Extraction of buildings and trees in urban environments [Article] // ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. - 1999. - pp. 130-137.

Hirschmuller Heiko Semi-Global Matching - Motivation, Developments and Applications [Article].

Jenson S.K. Domingue J.O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis [Article] // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. - 1988.

Karel W., Pfeifer N. and Briese C. DTM QUALITY ASSESSMENT [Article]. - 2006.

Li Jing Wong David Effects of DEM sources on hydrologic applications [Article] // Computers, Environment and Urban Systems. - 2009. - pp. 251-261.

Murphy Paul N. C. Ogilvie Jae, Meng Fan-Rui, Arp Paul Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification [Article] // Hydrological Processes. - 2008. - pp. 1747-1754.

Nikolakopoulos K., Kamaratakis E. and Chrysoulakis N. SRTM vs ASTER elevation products comparison for two regions in Crete, Greece [Article] // International Journal of Remote Sensing. - 2006. - pp. 4819-4838.

Nikolakopoulos Konstantinos, Tsombos Panagiotis and Zervakou Alexandra Evaluating SRTM and ASTER DEM accuracy for the broader area of Sparti, Greece [Article]. - 2007.

Sefercik Umut Gunes [et al.] Contribution of Normalised DSM to Automatic Building Extraction from HR Mono Optical Satellite Imagery [Article] // European Journal of Remote Sensing. - 2014. - pp. 575-591.

Ελληνική βιβλιογραφία

Αδάμ Κατερίνα Γεωμετρία του στερεοζεύγους από βαθμονομημένες και από μη βαθμονομημένες μηχανές [Διπλωματική εργασία]. - Αθήνα : ΕΜΠ, 2011.

Αρβανίτης Χρήστος Μέθοδοι Όρασης Υπολογιστών για Επαυξημένη Πραγματικότητα [Διπλωματική Εργασία]. -Αθήνα: ΕΜΠ, 2012.

Αρώνη Ευγενία-Νεκταρία ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΜΕ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΣΕ ΠΥΚΝΗ ΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ [Διπλωματική εργασία]. - Αθήνα : ΕΜΠ, 2018.

Ζαρκαδούλας Θεόδωρος-Πατάπιος Ανάπτυξη μοντέλου υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης στη χειμαρρική λεκάνη του Σαρανταπόταμου [Διπλωματική εργασία]. - Αθήνα : ΕΜΠ, 2014.

Καλησπεράκης Ηλίας Η ΕΠΙΠΟΛΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΤΟΝ ΠΡΟΒΟΛΙΚΟ ΚΑΙ ΤΟΝ ΕΥΚΛΕΙΔΕΙΟ ΧΩΡΟ [Διδακτορική διατριβή]. - Αθήνα : ΕΜΠ, 2010.

Καρκάλου Έλλη ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟ-ΣΥΝΟΛΗΣ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗΣ ΕΙΚΟΝΩΝ (SEMI-GLOBAL MATCHING) [Διπλωματική εργασία]. - Αθήνα : ΕΜΠ, 2015.

Κυπαρίσση Βάλια ΣΥΝΕΝΩΣΗ ΝΕΦΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΑΠΟ ΟΜΟΛΟΓΙΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ [Διπλωματική εργασία]. - Αθήνα : ΕΜΠ, 2011.

Κύρκου Αθανασία ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΗΜΙ-ΚΑΘΟΛΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΥΚΝΗΣ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ ΚΑΙ ΟΡΘΟΕΙΚΟΝΑΣ [Διπλωματική εργασία]. - Αθήνα : ΕΜΠ, 2015.

Λαμπράκης Νικόλαος, Νικολακόπουλος Κωνσταντίνος and Κατσάνου Κωνσταντίνα Υδρολογία με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και δεδομένων Τηλεπισκόπησης [Βιβλίο]. - Αθήνα : Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, 2015.

Μαλτζός Ευάγγελος ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΙΝΑΚΩΝ ΑΝΟΜΟΙΟΤΗΤΩΝ ΒΑΘΟΥΣ ΑΠΟ ΕΝΑΕΡΙΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΜΕΣΩ ΠΥΚΝΗΣ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗΣ ΣΗΜΕΙΩΝ [Διπλωματική εργασία]. - Αθήνα : ΕΜΠ, 2013.

Μαριού Μαρίνα Έλεγχος ακρίβειας και ποιότητας ελεύθερης πρόσβασης ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους - Εφαρμογή στην περιοχή Μεσογείων Αττικής [Διπλωματική εργασία]. - 2013.

Μιχαηλίδου Σταματία ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΑΝΙΧΝΕΣΗ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΚΤΙΣΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΑΣΤΙΚΟ ΧΩΡΟ ΑΠΟ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΗΣ ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕΣΩ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΑΣΑΦΟΥΣ ΒΑΣΗΣ ΓΝΩΣΗΣ ΣΕ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΣΤΡΑΦΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΙΚΟΝΩΝ [Διπλωματική εργασία]. - Αθήνα : ΕΜΠ, 2011.

Νάκος Βύρωνας ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΑ [Σημειώσεις μαθήματος]. - ΑΘΗΝΑ : ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, 2011.

Ξενούλης Μιχαήλ Χαρτογράφηση της αναβλάστησης του φυσικού οικοσυστήματος της περιοχής Πάρνηθας Αττικής με χρήση δορυφορικών παρατηρήσεων και γεωγραφικών πληροφοριακών συστημάτων [Μεταπτυχιακή εργασία]. - Αθήνα : Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2011. .

Παπαγεωργάκη Ινώ Ταξινόμηση του ανάγλυφου με υδρολογικά κριτήρια: εφαρμογή σε λεκάνες απορροής της Αττικής [Μεταπτυχιακή εργασία]. - 2012.

Πατιάς Πέτρος Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία [Βιβλίο]. - Θεσσαλονίκη : ΖΗΤΗ, 1991.

Πέτσα Έλλη Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας - Αθήνα : Σημειώσεις ΤΕΙ Αθήνας, Τμήμα Τοπογραφίας, 2000.

Πραστάκος Π., Prinnet V. and Houndry P. Συστήματα λήψης αποφάσεων για πλημμύρες σε ποτάμια (ANFAS) [Άρθρο].

Ράμμος Αθανάσιος Αυτόματος εντοπισμός κτιρίων σε ψηφιακές εικόνες [Διπλωματική εργασία]. - 2008.

Τσούλος Λύσανδρος, Σκοπελίτη Ανδριανή and Στάμου Λήδα Χαρτογραφική Σύνθεση & Απόδοση σε Ψηφιακό Περιβάλλον [Βιβλίο]. - Αθήνα : Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, 2015.

Φλωρίδη Βασιλική ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ, ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΠΥΚΝΗΣ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΣΕ ΣΤΕΡΕΟΖΕΥΓΗ [Διπλωματική εργασία]. - Αθήνα : ΕΜΠ, 2013.