



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

**«Έλεγχος ακρίβειας και ποιότητας ελεύθερης πρόσβασης Ψηφιακών
Μοντέλων Εδάφους – Εφαρμογή στην περιοχή Μεσογείων Αττικής»**

Διπλωματική Εργασία

Μαρίνα Μαριού

Επιβλέπων:

Χαράλαμπος Ιωαννίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2013

Αντί Προλόγου

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κλείνει και ένας σημαντικός κύκλος. Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλλαν, με τον δικό του τρόπο ο καθένας, στην ολοκλήρωση αυτού του κεφαλαίου στη ζωή μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χαράλαμπο Γωαννίδη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ανάθεση του θέματος, καθώς και για τη συνεργασία, τις γνώσεις, την καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, θερμές ευχαριστίες οφείλω στην κα. Σοφία Σοϊλέ, για την πολύτιμη βοήθειά της και το χρόνο που μου διέθεσε για τη λύση πρακτικών θεμάτων. Ακόμη, ευχαριστώ ιδιαίτερα την Ινώ Παπαγεωργάκη για τις συμβουλές της και το χρόνο της σε αντίστοιχα ζητήματα που προέκυπταν κατά την διάρκεια της εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης, τους κκ. Γιώργο Πηνιώτη και Βαγγέλη Ζαχαρή, για τη βοήθειά τους σε θέματα οργάνων για τις μετρήσεις υπαίθρου που απαιτήθηκαν, όπως και τα εργαστήρια Γενικής και Ανώτερης και Δορυφορικής Γεωδαισίας για τη διάθεση των οργάνων αυτών. Ευχαριστώ ακόμη τον κ. Νίκο Ζαρκαδούλα, για την διάθεση χρήσιμων πληροφοριών σχετικά με τοπογραφικές εφαρμογές.

Θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω, τις φίλες μου Αλίκη, Ιωάννα, Λίτσα και Χρυσή, οι οποίες είναι πάντα δίπλα μου, ακόμη και αν βρίσκονται πολύ μακριά. Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Γιώργο, για την σημαντική βοήθειά του σε πρακτικά θέματα της παρούσας εργασίας, αλλά και για την αμέριστη στήριξη του.

Για τη συνεχή εμπύχωση, αγάπη και υπομονή τους, οφείλω το λιγότερο ένα ευχαριστώ, στους γονείς μου Μανώλη και Μαρία και στα αδέρφια μου, οι οποίοι με στηρίζουν και με βοηθούν όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, την ευγνωμοσύνη μου θα ήθελα να εκφράσω στο θείο μου Συμεών, για τη σημαντική στήριξη που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, και συνεχίζει να μου προσφέρει.

Μαρίνα Μαριού

Αθήνα, Οκτώβριος 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους αποτελούν την ψηφιακή αναπαράσταση της φυσικής γήινης επιφάνειας και είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο σε πολλούς επιστημονικούς τομείς, αλλά και σε διάφορα είδη μελετών. Μερικά παραδείγματα χρήσης των μοντέλων αυτών είναι οι μελέτες οδοποιίας, υδρολογίας, χαρτογραφίας και τηλεπικοινωνιών.

Σημαντικός παράγοντας για τη χρήση των ψηφιακών μοντέλων εδάφους σε κάθε περίπτωση, είναι η γνώση της ποιότητας και της ακρίβειάς τους. Για κάθε εφαρμογή, πέρα από τη γνώση της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε για την παραγωγή των μοντέλων και κατά συνέπεια, της ακρίβειας που δίνει ο πάροχος, απαιτείται η πραγματοποίηση ελέγχων για την διαπίστωση της καταλληλότητας του προϊόντος. Η διακρίβωση αυτή είναι κάτι που έχει απασχολήσει έντονα στο παρελθόν και συνεχίζει να απασχολεί.

Στόχος της παρούσας εργασίας, ήταν η μελέτη της ποιότητας και της ακρίβειας των ψηφιακών μοντέλων εδάφους με εφαρμογή στην περιοχή των Μεσογείων, στην Αττική. Τα τέσσερα διαθέσιμα μοντέλα ελέγχθηκαν με στατιστικές μεθόδους με τη χρήση δεδομένων αναφοράς αλλά και με οπτικές μεθόδους. Στην πρώτη περίπτωση τα αποτελέσματα ήταν στατιστικά μεγέθη όπως τα σφάλματα και οι ακρίβειες του εκάστοτε μοντέλου, ενώ στη δεύτερη περίπτωση έγινε προσπάθεια οπτικού εντοπισμού αστοχιών και σφαλμάτων για το κάθε μοντέλο. Στη συνέχεια, αφού διαπιστώθηκαν αδυναμίες και πλεονεκτήματα, έγινε μια προσπάθεια προσδιορισμού του καταλληλότερου μοντέλου για την περιοχή, κάτι το οποίο δεν ήταν απόλυτα σαφές. Τέλος, έγιναν προτάσεις για περαιτέρω ανάλυση του θέματος αυτού.

National Technical University of Athens, Greece

School of Rural and Surveying Engineering

“Accuracy and quality control of free Digital Elevation Models – Application in Mesogeia region, Attica”

Diploma Thesis

Marina Mariou

October 2013

ABSTRACT

Digital Terrain Models constitute the digital representation of the terrestrial relief and therefore they are a useful tool to several scientific fields and studies, such as hydrology, cartography, telecommunications and studies of road design.

The proper use of the DTMs requires the determination of their precision and quality. The a priori knowledge of the model production methodology, and the precision provided by the model supplier, are usually not sufficient enough for each application. Therefore, a quality and precision control is required, in order to ascertain the suitability of the product, according to the demands and specifications of the application. The evaluation procedure of the DTMs has been discussed in many research studies in the past, but it is still an open subject, due to the increased use of the DTMs.

The subject of the current diploma thesis is the evaluation of DTMs, and specifically the control of digital terrain models in Mesogeia area in Attica, Greece. The four available DTMs of the area were tested with statistical methods using reference data, and with optical methods. The outcomes of the former are statistical measures, such as errors and precision of each model, while the latter's main target is to identify the faults and weaknesses of each model. Finally, an effort was made to determine the most appropriate model for the study area. Concluding in a single “proper” solution proved to be difficult, since each model has advantages and disadvantages. Nevertheless, a final ranking is attempted, based on the specifications of the models. Several suggestions for further analysis of the subject are finally considered.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε στη σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στο εργαστήριο Φωτογραμμετρίας. Σημαντικό κίνητρο για την επιλογή του συγκεκριμένου θέματος, αποτέλεσε η σημασία και το σημαντικό εύρος εφαρμογών των ψηφιακών μοντέλων εδάφους σε πολλούς τομείς. Επίσης, η ενασχόληση με το γνωστικό πεδίο της διακρίβωσης της ποιότητας ψηφιακών μοντέλων μέσω στατιστικών μεθόδων, ήταν ένα ακόμη κίνητρο.

Στόχος της εργασίας αυτής, ήταν η αξιολόγηση της ακρίβειας και της ποιότητας των ψηφιακών μοντέλων εδάφους, κάτι το οποίο απασχολεί εδώ και αρκετά χρόνια. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν ψηφιακά μοντέλα εδάφους της περιοχής των Μεσογείων τα οποία προέρχονται από τέσσερις διαφορετικές πηγές, δύο εθνικής εμβέλειας και δύο παγκόσμιας. Τα μοντέλα αυτά αξιολογήθηκαν τόσο με στατιστικές, όσο και με οπτικές μεθόδους για να διαπιστωθεί η προσαρμογή τους στο τοπικό ανάγλυφο.

Όσον αφορά στο στατιστικό έλεγχο, η αξιολόγηση των ψηφιακών μοντέλων εδάφους έγινε με τις μεθόδους “raster to raster” και “raster to point”, με χρήση δεδομένων αναφοράς, από τα αποτελέσματα των οποίων υπολογίστηκαν σημαντικά στατιστικά μεγέθη. Ο οπτικός έλεγχος των μοντέλων από την άλλη πλευρά, πραγματοποιήθηκε με τον υπολογισμό διαφόρων συνιστωσών και μέσω της οπτικοποίησής τους, αλλά και με τη σύγκρισή τους με το πραγματικό ανάγλυφο της περιοχής μέσω του ψηφιακού μοντέλου αναφοράς.

Πιο αναλυτικά, όσον αφορά στη δομή της εργασίας, τα τρία πρώτα κεφάλαια αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο το οποίο ήταν απαραίτητο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, ενώ τα υπόλοιπα τρία παρουσιάζουν τη διαδικασία που εφαρμόστηκε, τα αποτελέσματα και τα τελικά συμπεράσματα.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται μια γενική αναφορά στα Ψηφιακά Ύψομετρικά Μοντέλα (DEM). Συγκεκριμένα γίνεται μια σύντομη περιγραφή των Ύψομετρικών Μοντέλων Επιφάνειας (DSM), ενώ μια περισσότερο αναλυτική περιγραφή γίνεται για τα Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (ΨΜΕ - DTM), τα οποία είναι και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Ακολουθεί η αναφορά στις συνηθέστερες δομές των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τα ψηφιακά μοντέλα, ενώ στο τέλος παρουσιάζονται κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά που συμβάλλουν και αυτά στην απεικόνιση χωρικής πληροφορίας.

Το **δεύτερο κεφάλαιο**, αφιερώνεται στις μεθόδους παραγωγής των ΨΜΕ. Παρουσιάζονται οι έξι σημαντικότερες μέθοδοι, όπως είναι οι φωτογραμμετρικές, η μέθοδος της πυκνής συνταύτισης εικόνων και η χρήση δεδομένων LiDAR, ενώ σε κάθε περίπτωση, γίνεται αναφορά στον τρόπο λειτουργίας και συλλογής δεδομένων για την παραγωγή των ψηφιακών μοντέλων, στις υψομετρικές και οριζοντιογραφικές ακρίβειες που παρέχει κάθε μέθοδος, στις γενικές ακρίβειες των ΨΜΕ για

συγκεκριμένα επίπεδα εμπιστοσύνης, καθώς επίσης και στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε μεθόδου.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται τα παγκόσμια ψηφιακά μοντέλα εδάφους, SRTM και το GDEM του ASTER, καθώς δύο εκ των τεσσάρων ΨΜΕ που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Και σε αυτό το κεφάλαιο έγινε αναφορά στον τρόπο συλλογής των δεδομένων για τη δημιουργία των ψηφιακών μοντέλων, στη μεθοδολογία παραγωγής τους, στις προδιαγραφές κάθε μοντέλου, και στους ελέγχους που έχουν πραγματοποιηθεί για να πιστοποιηθεί η ακρίβεια και η ποιότητα τους.

Το **κεφάλαιο 4** αφορά στις μεθόδους αξιολόγησης των ψηφιακών μοντέλων εδάφους. Αρχικά παρουσιάζονται οι έννοιες της ακρίβειας, της ορθότητας και της ποιότητας. Στη συνέχεια, γίνεται μια βιβλιογραφική αναφορά σε διάφορες μεθόδους ελέγχου που έχουν εφαρμοστεί σε μελέτες και ακολουθεί η λεπτομερέστερη παρουσίαση των στατιστικών και οπτικών μεθόδων που εφαρμόστηκαν στην παρούσα εργασία.

Στο **κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται συνοπτικά η περιοχή εφαρμογής. Επίσης, περιγράφονται αναλυτικά τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν - τα δεδομένα αναφοράς και τα δεδομένα ελέγχου - τα χαρακτηριστικά τους, ο τρόπος απόκτησής τους και επεξεργασίας τους όπου αυτή ήταν απαραίτητη.

Το **έκτο κεφάλαιο** αφορά στην πρακτική εφαρμογή παρουσιάζοντας παράλληλα το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε. Αρχικά παρουσιάζονται διεξοδικά οι στατιστικοί έλεγχοι των ψηφιακών μοντέλων που εφαρμόστηκαν και τα αποτελέσματά τους, ενώ όμοια ακολουθούν οι οπτικοί. Σε όλες τις περιπτώσεις τα αποτελέσματα σχολιάζονται και εξάγονται αναλυτικά συμπεράσματα.

Τέλος, στο **κεφάλαιο 7**, συνοψίζοντας όλη τη διαδικασία που ακολουθήθηκε και τα αποτελέσματα κάθε ελέγχου, διατυπώνονται κάποια τελικά συμπεράσματα για το κάθε μοντέλο, σε σχέση πάντα με την προς εξέταση περιοχή. Επίσης, γίνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω μελέτη και εξέλιξη του συγκεκριμένου θέματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	ΨΗΦΙΑΚΑ ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	9
1.1	Ψηφιακά Μοντέλα Επιφάνειας – Digital Surface Models	10
1.2	Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους - Digital Terrain Models	10
1.3	Δομές Δεδομένων.....	11
1.3.1	Κανονικός ψηφιδωτός κάναβος (regular raster grid).....	11
1.3.2	Ακανόνιστο δίκτυο τριγώνων (TIN - Triangular Irregular Networks) ..	12
1.4	Άλλα Χαρακτηριστικά των Ψηφιακών Μοντέλων	13
1.4.1	Τυχαία σημεία (mass points)	13
1.4.2	Γραμμές ασυνέχειας (breaklines).....	13
1.4.3	Ισοϋψείς γραμμές.....	14
2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ	15
2.1	Ψηφιοποίηση Χαρτών	15
2.2	Επίγειες Τοπογραφικές Μετρήσεις	16
2.3	Φωτογραμμετρικές Μέθοδοι – Διεικονική Απόδοση	16
2.4	Μέθοδος Πυκνής Συνταύτισης Εικόνων (Dense image matching)	17
2.5	Δεδομένα LiDAR.....	19
2.5.1	Αρχή λειτουργίας	19
2.5.2	Παραγωγή ΨΜΕ	21
2.5.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου.....	22
2.5.4	Πηγές σφαλμάτων.....	22
2.6	Δεδομένα InSAR.....	23
2.6.1	Αρχή λειτουργίας SAR	23
2.6.2	Απεικονίσεις SAR.....	24
2.6.3	InSAR	25
2.6.4	Γεωμετρία συμβολομετρίας.....	26
2.6.5	Η συμβολομετρική διαδικασία	26
2.6.6	Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα μεθόδου	27
3	ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΨΗΦΙΑΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ (GDEM)	29
3.1	Δεδομένα ASTER	29
3.1.1	Ο δορυφόρος Terra	30

3.1.2	Παραγωγή παγκόσμιων ψηφιακών μοντέλων εδάφους (GDEM)	30
3.1.3	Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο GDEM V.1	31
3.1.4	Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο GDEM V.2	32
3.1.5	Έλεγχοι ακρίβειας GDEM	32
3.2	Δεδομένα Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)	38
3.2.1	Η αποστολή.....	38
3.2.2	Προδιαγραφές ακρίβειας δεδομένων	40
3.2.3	Πηγές σφαλμάτων.....	40
3.2.4	Εξάλειψη των σφαλμάτων	42
3.2.5	Υπολογισμός υψομετρικών σφαλμάτων.....	43
3.2.6	Έλεγχος δεδομένων SRTM.....	44
4	ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ	47
4.1	Σφάλματα Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους.....	47
4.2	Συνιστώσες Ελέγχου	48
4.2.1	Ορθότητα	48
4.2.2	Ακρίβεια.....	48
4.3	Εκτίμηση Υψομετρικών Δεδομένων για την Παραγωγή ΨΜΕ.....	49
4.4	Είδη Ελέγχων ΨΜΕ	50
4.4.1	Στατιστικοί έλεγχοι.....	50
4.4.2	Οπτικοί έλεγχοι.....	52
4.4.3	Άλλες μέθοδοι ελέγχου των ΨΜΕ.....	55
5	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ	59
5.1	Περιοχή Μελέτης	59
5.1.1	Ανάγλυφο.....	60
5.2	Δεδομένα Αναφοράς	60
5.3	Δεδομένα Ελέγχου	65
6	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΛΕΓΧΩΝ.....	67
6.1	Στατιστικοί Έλεγχοι	67
6.1.1	Έλεγχος raster – to – raster	67
6.1.2	Έλεγχος με τριγωνομετρικά σημεία	71
6.1.3	Έλεγχος με σημεία μετρημένα με GPS	76
6.1.4	Σύγκριση των ελέγχων με τριγωνομετρικά σημεία και σημεία GPS	80
6.2	Οπτικοί Έλεγχοι.....	81

6.2.1	Δημιουργία υψομετρικού προφίλ	81
6.2.2	Οπτικοποίηση υψομετρικών διαφορών	92
6.2.3	Σκίαση (Hillshade).....	93
6.2.4	Προσανατολισμός (aspect)	96
6.2.5	Κλίσεις (slope)	98
6.2.6	Ισοϋψείς καμπύλες (contours)	101
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	107
7.1	Ακρίβεια Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους της Κτηματολόγιο Α.Ε.....	107
7.2	Ακρίβεια Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους του ΟΚΧΕ ΟΕ.....	108
7.3	Ακρίβεια Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους SRTM.....	108
7.4	Ακρίβεια Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους ASTER v2	109
7.5	Συμπεράσματα για τα Παγκόσμια Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους.....	111
7.5.1	Ψηφιακό μοντέλο εδάφους SRTM	111
7.5.2	Ψηφιακό μοντέλο εδάφους ASTER GDEM v.2.....	112
7.6	Προτάσεις.....	113
	ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΦΟΡΩΝ.....	115

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1-DTM και DSM, Αδελαΐδα, Νότια Αυστραλία.....	9
Εικόνα 1.2-Δεδομένα απεικόνισης DSM (κόκκινο χρώμα) και DTM (πράσινο χρώμα).....	10
Εικόνα 1.3-Δομή δεδομένων σε πλέγμα και σε TIN.	12
Εικόνα 1.4-Γραμμή ασυνέχειας σε TIN μοντέλο.	13
Εικόνα 2.1-Προβλήματα κατά την ψηφιοποίηση χαρτών (μικρά διαστήματα μεταξύ των ισοϋψών και ασυνέχειες).	15
Εικόνα 2.2- Σύστημα LiDAR.	19
Εικόνα 2.3-Καταγραφή πολλαπλών επιστροφών από τα κλαδιά των δέντρων (πρώτη επιστροφή) και το έδαφος (τελευταία επιστροφή).....	20
Εικόνα 2.4-Νέφος σημείων από σύστημα LiDAR για την παραγωγή ΨΜΕ από DSM.	21
Εικόνα 2.5-Τυπική γεωμετρία SAR.....	23
Εικόνα 2.6-Αρχικά δεδομένα SAR (αριστερά) και η τελική εικόνα (δεξιά).	25
Εικόνα 3.1-Το ηφαίστειο της Έτνα.....	30
Εικόνα 3.2-Το δέλτα του Μισισσιπή	30
Εικόνα 3.3-Αποστολή SRTM.	39
Εικόνα 3.4-Γεωμετρία SRTM.....	39
Εικόνα 3.5-Τα βασικά μέρη του διαστημικού λεωφορείου.	40
Εικόνα 3.6-Υψομετρικά σφάλματα σημείων ελέγχου σε θάλασσα και ηπειρωτικό έδαφος πριν την εφαρμογή των διορθώσεων.....	42
Εικόνα 3.7- Υψομετρικά σφάλματα σημείων ελέγχου σε θάλασσα και ηπειρωτικό έδαφος μετά την εφαρμογή των διορθώσεων.	43
Εικόνα 4.1 -Σχέση ακρίβειας-ορθότητας.....	48
Εικόνα 5.1-Θέση της περιοχής μελέτης στο νομό Αττικής.	59
Εικόνα 5.2-Περιοχή μελέτης σε μεγέθυνση, οικισμοί που περιλαμβάνει και οικισμοί που την περιβάλλουν.	59
Εικόνα 5.3-Λατομεία Μαρκοπούλου, βόρεια του όρους Μερέντα.	60
Εικόνα 5.4-Κατανομή τριγωνομετρικών σημείων στην περιοχή (ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής).	61
Εικόνα 5.5-Κατανομή τριγωνομετρικών σημείων (GoogleEarth).	61
Εικόνα 5.6-Κατανομή των σημείων ελέγχου (ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής).63	
Εικόνα 5.7-Κατανομή σημείων ελέγχου (GoogleEarth)	63
Εικόνα 5.8-Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους της περιοχής, (α) Κτηματολόγιο Α.Ε., (β) ΟΚΧΕ ΟΕ, (γ) SRTM, (γ) ASTER GDEM v.2.	66
Εικόνα 6.1-Εντολή αφαίρεσης εικόνων στο ArcGIS.....	67
Εικόνα 6.2-Εντολή εξαγωγής υψομετρικής πληροφορίας σε συγκεκριμένες οριζοντιογραφικές θέσεις.....	71
Εικόνα 6.3-Διευθύνσεις δημιουργίας υψομετρικού προφίλ μέσω τομών του εδάφους	82

Εικόνα 6.4-Οπτικοποίηση των υψομετρικών διαφορών των ΨΜΕ με το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., (α) διαφορές με το ΨΜΕ ΟΚΧΕ, (β) διαφορές με το ΨΜΕ SRTM, (γ) διαφορές με το ΨΜΕ ASTERv2.	92
Εικόνα 6.5-Σκίαση αναγλύφου, (α) ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε., (β) ΨΜΕΟΚΧΕ, (γ) ΨΜΕSRTM, (δ) ΨΜΕ ASTER.	95
Εικόνα 6.6-Προσανατολισμός περιοχής, ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε.	97
Εικόνα 6.7-Προσανατολισμός περιοχής, ΨΜΕ ΟΚΧΕ.	97
Εικόνα 6.8-Προσανατολισμός περιοχής, ΨΜΕ SRTM.	98
Εικόνα 6.9-Προσανατολισμός περιοχής, ΨΜΕ ASTER.	98
Εικόνα 6.10-Κλίσεις περιοχής, ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε.	99
Εικόνα 6.11-Κλίσεις περιοχής, ΨΜΕ ΟΚΧΕ.	99
Εικόνα 6.12-Κλίσεις περιοχής, ΨΜΕ SRTM.	100
Εικόνα 6.13-Κλίσεις περιοχής, ΨΜΕ ASTER.	100
Εικόνα 6.14-Ισοϋψείς ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. (μπλε γραμμή) και ΨΜΕ ΟΚΧΕ (πράσινη γραμμή).	102
Εικόνα 6.15-Ισοϋψείς ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. (μπλε γραμμή) και ΨΜΕ SRTM (κόκκινη γραμμή).	103
Εικόνα 6.16- Ισοϋψείς ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. (μπλε γραμμή) και ΨΜΕ ASTER (γαλάζια γραμμή).	104

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1-Συγκριτικός πίνακας μεθόδων παραγωγής ΨΜΕ.	28
Πίνακας 3.1-Αποτελέσματα ελέγχου ΨΜΕ με σημεία GPS.....	33
Πίνακας 3.2-Στατιστικά μεγέθη GDEM v.2 ανά χρήσεις γης στην Ιαπωνία	34
Πίνακας 3.3-Στατιστικά μεγέθη υψομετρικών διαφορών GDEM ICESat	34
Πίνακας 3.4-Υψομετρικές διαφορές GDEM2 με το ΨΜΕ αναφοράς.....	35
Πίνακας 3.5-Στατιστικά μεγέθη ελέγχου GDEM2 και ΨΜΕ αναφοράς με σημεία ελέγχου.....	36
Πίνακας 3.6-Στατιστικά στοιχεία υψομετρικών διαφορών των δύο εκδόσεων GDEM με δεδομένα αναφοράς DTED2 σε 20 περιοχές	36
Πίνακας 3.7-Οριζοντιογραφική ακρίβεια των δύο εκδόσεων συγκριτικά με το DTED2 (arcsec).....	37
Πίνακας 3.8-Αποτελέσματα αξιολόγησης των δύο εκδόσεων από την Ιαπωνική μελέτη.	37
Πίνακας 3.9-Υψομετρικά σφάλματα SRTM σε μέτρα από τον έλεγχο με υψομετρικά σημεία, για επίπεδο εμπιστοσύνης 90%.	43
Πίνακας 3.10-Στατιστικά μεγέθη των υψομετρικών διαφορών μεταξύ SRTM και σημείων GPS, για κάθε ήπειρο σε μέτρα.....	44
Πίνακας 3.11-Στατιστικά μεγέθη της σύγκρισης των δεδομένων SRTM με τα δεδομένα DTED σε μέτρα.	45
Πίνακας 3.12-Στατιστικά μεγέθη της σύγκρισης των δεδομένων SRTM με αυτά των Height Patches.	45
Πίνακας 5.1-Βασικά χαρακτηριστικά των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων της Κτηματολόγιο Α.Ε.	61
Πίνακας 5.2-Συντεταγμένες τριγωνομετρικών σημείων περιοχής.	62
Πίνακας 5.3-Συντεταγμένες σημείων ελέγχου περιοχής.	64
Πίνακας 6.1-Στατιστικά μεγέθη σε μέτρα, ΨΜΕ αναφοράς-ΨΜΕ ελέγχου.	68
Πίνακας 6.2-Στατιστικά μεγέθη σε μέτρα, Ζτριγωνομετρικό-ΖΨΜΕ.....	72
Πίνακας 6.3-Στατιστικά μεγέθη σε μέτρα, Ζσ.ε.-ΖΨΜΕ.	76
Πίνακας 6.4-Συγκριτικός πίνακας ελέγχων με τριγωνομετρικά σημεία και σημεία GPS	80
Πίνακας 7.1-Συγκεντρωτικός πίνακας συμπεριφοράς ακρίβειας ΨΜΕ σε κάθε έλεγχο.	110
Πίνακας 7.2-Συγκεντρωτικός πίνακας στατιστικών μεγεθών σε μέτρα της πιστοποίησης του ΨΜΕ SRTM και των ελέγχων στα Μεσόγεια Αττικής.....	112
Πίνακας 7.3-Συγκεντρωτικός πίνακας στατιστικών μεγεθών σε μέτρα της πιστοποίησης του ΨΜΕ ASTER και των ελέγχων στα Μεσόγεια Αττικής.....	113

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 6.1 –Στατιστικά μεγέθη ελέγχου με ΨΜΕ αναφοράς.	68
Διάγραμμα 6.2-Ιστόγραμμα συχνοτήτων υψομετρικών διαφορών ΨΜΕ OKXE με ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε.	70
Διάγραμμα 6.3-Ιστόγραμμα συχνοτήτων υψομετρικών διαφορών ΨΜΕ SRTM με ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε.	70
Διάγραμμα 6.4-Ιστόγραμμα συχνοτήτων υψομετρικών διαφορών ΨΜΕ ASTER με ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε.	70
Διάγραμμα 6.5-Στατιστικά μεγέθη ελέγχου με τριγωνομετρικά σημεία.	72
Διάγραμμα 6.6-Κατανομή υψομετρικών διαφορών τριγωνομετρικών σημείων με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της Κτηματολόγιο Α.Ε., σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους.	74
Διάγραμμα 6.7-Κατανομή υψομετρικών διαφορών τριγωνομετρικών σημείων με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του OKXE, σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους.	74
Διάγραμμα 6.8-Κατανομή υψομετρικών διαφορών τριγωνομετρικών σημείων με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους SRTM, σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους.	75
Διάγραμμα 6.9-Κατανομή υψομετρικών διαφορών τριγωνομετρικών σημείων με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους SRTM, σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους.	75
Διάγραμμα 6.10-Στατιστικά μεγέθη με σημεία ελέγχου.	76
Διάγραμμα 6.11-Κατανομή υψομετρικών διαφορών σημείων ελέγχου με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της Κτηματολόγιο Α.Ε., σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους.	78
Διάγραμμα 6.12-Κατανομή υψομετρικών διαφορών σημείων ελέγχου με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του OKXE, σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους.	79
Διάγραμμα 6.13-Κατανομή υψομετρικών διαφορών σημείων ελέγχου με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του SRTM, σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους.	79
Διάγραμμα 6.14- Κατανομή υψομετρικών διαφορών σημείων ελέγχου με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του ASTER, σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους.	80
Διάγραμμα 6.15-Σύγκριση υψομετρικών προφίλ, ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. και ΨΜΕ OKXE, στη διεύθυνση Δ-Α.	83
Διάγραμμα 6.16-Σύγκριση υψομετρικών προφίλ ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. και ΨΜΕ SRTM, στη διεύθυνση Δ-Α.	84
Διάγραμμα 6.17-Σύγκριση υψομετρικών προφίλ ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. και ΨΜΕ ASTER, στη διεύθυνση Δ-Α.	85
Διάγραμμα 6.18-Σύγκριση υψομετρικών προφίλ ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. με ΨΜΕ OKXE, στη διεύθυνση Α-Δ.	87
Διάγραμμα 6.19-Σύγκριση υψομετρικών προφίλ ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. και ΨΜΕ SRTM, στη διεύθυνση Α-Δ.	88
Διάγραμμα 6.20-Σύγκριση υψομετρικών προφίλ ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. και ΨΜΕ ASTER, στη διεύθυνση Α-Δ.	89
Διάγραμμα 6.21-Σύγκριση υψομετρικών προφίλ, στο ρέμα νότια του αεροδρομίου, για όλα τα ΨΜΕ.	90

Κεφάλαιο 1

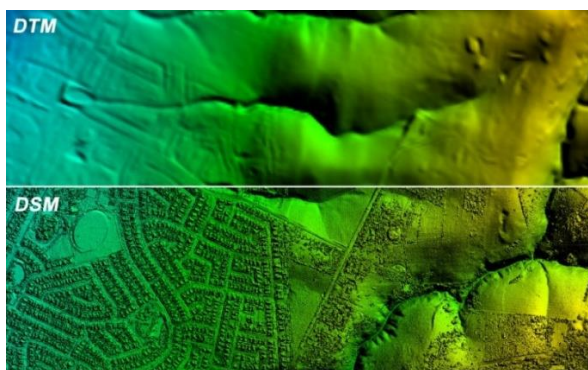
ΨΗΦΙΑΚΑ ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Η ψηφιακή αναπαράσταση της φυσικής γήινης επιφάνειας είναι ένα χρήσιμο εργαλείο σε πολλούς επιστημονικούς τομείς και σε πρακτικές εφαρμογές. Ο συνηθέστερος τρόπος αναπαράστασης της επιφάνειας αυτής είναι τα Ψηφιακά Υψομετρικά Μοντέλα, τα οποία συμβάλλουν στην εξαγωγή χωρικών πληροφοριών.

Γενικά τα Ψηφιακά Μοντέλα χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση συνεχούς πληροφορίας με ψηφιακό τρόπο και με πεπερασμένο αριθμό σημείων. Συνήθως αυτή η πληροφορία αφορά τη γήινη επιφάνεια, αλλά όχι μόνο.

Τα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα είναι μαθηματικές και ψηφιακές απεικονίσεις ενός πραγματικού ή εικονικού αντικειμένου και του περιβάλλοντός του (Maune, 2007). Τα μοντέλα αυτά μπορεί να αναφέρονται τόσο σε υψόμετρο επί του εδάφους, όσο και σε κάποιο αντικείμενο πάνω από αυτό, όπως είναι η βλάστηση ή και κάποια κατασκευή.

Ο όρος DEM είναι γενικός και αφορά κυρίως ψηφιακά τοπογραφικά αλλά και βυθομετρικά δεδομένα κάτι που δε θα απασχολήσει αυτή την εργασία. Μοντέλα ονομάζονται λόγω της δυνατότητας χρήσης τέτοιων δεδομένων από Η/Υ και της αυτόματης τρισδιάστατης ανάλυσης της τοπογραφίας της γήινης επιφάνειας, χωρίς σημαντική συμβολή ανθρώπινης εργασίας.



Εικόνα 1.1-DTM και DSM, Αδελαΐδα, Νότια Αυστραλία.

Πηγή: <http://aerometrex.com.au/blog/?p=89>

Από χαρτογραφική άποψη, το DEM είναι η ψηφιακή χαρτογραφική απεικόνιση της υψομετρικής πληροφορίας του εδάφους, κατά x και y, σε κάρναβο, με χρήση τιμών κατά τον άξονα z, που αναφέρονται σε ένα σύστημα αναφοράς.

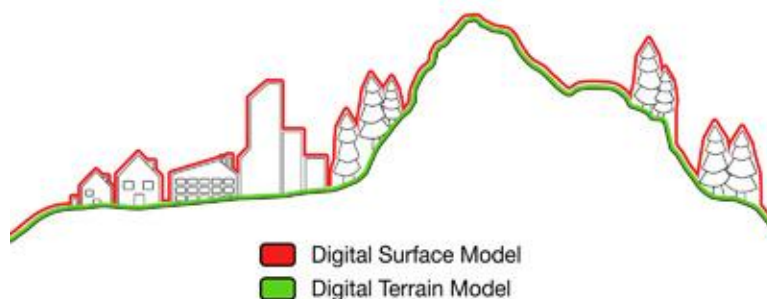
1.1 Ψηφιακά Μοντέλα Επιφάνειας – Digital Surface Models

Τα ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας συνήθως παρουσιάζουν τη γήινη επιφάνεια με ό, τι αυτή περιλαμβάνει. Τα DSM απεικονίζουν τα υψόμετρα των περισσότερων υψηλών σημείων των επιφανειών των κατασκευών, της βλάστησης και οποιονδήποτε άλλων χαρακτηριστικών βρίσκονται πάνω από το έδαφος. Με άλλα λόγια, παρέχουν την πληροφορία για το μέγιστο υψόμετρο κάθε σημείου. Τα DSM χρησιμοποιούνται κυρίως στις τηλεπικοινωνίες, για τρισδιάστατες προσομοιώσεις, στην εναέρια ασφάλεια, στη διαχείριση των δασικών εκτάσεων και στις πτήσεις.

1.2 Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους - Digital Terrain Models

Ένα άλλο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο είναι αυτό που αφορά στη γυμνή επιφάνεια του εδάφους. Η ιδέα των ψηφιακών μοντέλων εδάφους προτάθηκε πρώτη φορά από τον C. Miller, στο τεχνολογικό ίδρυμα της Μασαχουσέτης, πριν από περίπου 50 χρόνια. Από τότε μέχρι και σήμερα ερευνώνται μέθοδοι και τεχνολογίες απόκτησης δεδομένων για τη δημιουργία ΨΜΕ και για την επεξεργασία τους.

Για την αναπαράσταση της γεωμετρικής μορφής του εδάφους με τρόπο ψηφιακό, αλλά και με πεπερασμένο αριθμό σημείων, χρησιμοποιούνται τα Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους. Το έδαφος γενικά είναι μια επιφάνεια συνεχής, η οποία περιγράφεται από άπειρα σημεία, κάτι το οποίο όμως δεν είναι το ζητούμενο σε ψηφιακές αναπαραστάσεις και γι' αυτόν ακριβώς το λόγο είναι πολύ χρήσιμα τα ΨΜΕ.



Εικόνα 1.2-Δεδομένα απεικόνισης DSM (κόκκινο χρώμα) και DTM (πράσινο χρώμα).

Πηγή: <http://www.computamaps.com/newsletter/3-3/newsletter3-3.html>

Όπως φαίνεται από τα προηγούμενα το ΨΜΕ είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση της φυσικής γήινης επιφάνειας, η οποία αποτελείται από ένα σύνολο σημείων X , Y , Z στον τρισδιάστατο χώρο, και προσεγγίζει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την πραγματική επιφάνεια του εδάφους. Συγκεκριμένα είναι μια 2.5D αναπαράσταση του εδάφους, κάτι το οποίο σημαίνει ότι σε κάθε (X, Y) σημείο αντιστοιχεί μόνο μια τιμή υψόμετρου ή πιο γενικά σημαίνει ότι η επιφάνεια του ΨΜΕ περιγράφεται από μια 3D μαθηματική συνάρτηση της μορφής $z = f(x, y)$ (Kasser & Egels, 2002).

Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους είναι ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας τα οποία όμως παρέχουν υψομετρική πληροφορία μόνο για σημεία που ανήκουν στο έδαφος και σε υδάτινες επιφάνειες, χωρίς να περιλαμβάνονται σε αυτό κατασκευές, βλάστηση ή άλλα χαρακτηριστικά που βρίσκονται πάνω από αυτό, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 1.2.

Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους αποτελούν πρωταρχικής σημασίας δεδομένα, τα οποία είναι αναγκαία στη λήψη σημαντικών αποφάσεων για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε τομείς όπως ο έλεγχος πλημμυρών, οι υδραυλικές μελέτες, η ενέργεια, το περιβάλλον, οι μελέτες τεχνικών έργων και σε πληθώρα άλλων εφαρμογών.

1.3 Δομές Δεδομένων

Τα ψηφιακά μοντέλα και η πληροφορία που περιέχουν δομούνται σε διάφορες μορφές. Οι πιο διαδεδομένες και εύχρηστες μορφές είναι ο κανονικός ράστερ κανάβος και τα ακανόνιστα δίκτυα τριγώνων (TIN). Κάθε μια από αυτές έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, ενώ παρέχει διαφορετικές δυνατότητες στο χρήστη, ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζονται και την απαιτούμενη ακρίβεια.

1.3.1 Κανονικός ψηφιδωτός κανάβος (regular raster grid)

Ο ψηφιδωτός κανάβος έχει τη γεωμετρία εικόνας, όπου τα εικονοστοιχεία του αντιστοιχούν στις κορυφές του. Στις εικόνες αυτές, το υψόμετρο αναπαριστάται με τιμές του γκρι στο κάθε εικονοστοιχείο. Ο κανάβος αυτός αποτελείται από ένα σύνολο σημείων τα οποία είναι κατανεμημένα σε ίσα διαστήματα στις κορυφές του.

Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται με τη χρήση ψηφιδωτών εικόνων είναι ότι οι τιμές του μεγέθους που αναπαριστούν, όπως για παράδειγμα το υψόμετρο, αναφέρονται στους κόμβους του, είναι δηλαδή σημειακές. Για τον προσδιορισμό του υψομέτρου σε σημεία που βρίσκονται ανάμεσα στις κορυφές του κανάβου, εφαρμόζεται κάποια μέθοδος παρεμβολής.

Ένα επιπλέον μειονέκτημα είναι ότι ο ψηφιδωτός κανάβος έχει κανονικό βήμα με αποτέλεσμα τα χαρακτηριστικά του εδάφους που έχουν μικρό μέγεθος και δε συμπίπτουν με το βήμα του κανάβου να μην απεικονίζονται σωστά, να ομαλοποιούνται ή ακόμη και να παραλείπονται. Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η προσθήκη σημείων ή η αλλαγή διάστασης του κανάβου.

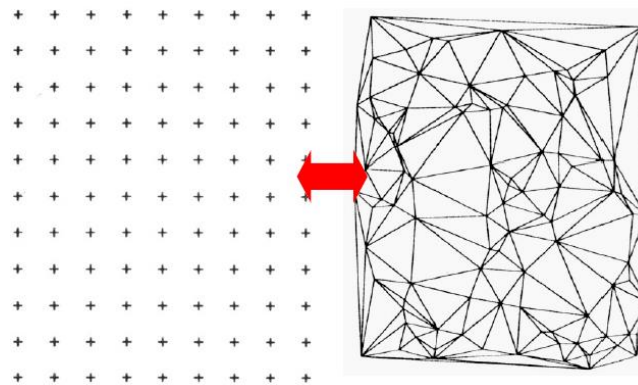
Επίσης, ένα σημαντικό ζήτημα των ΨΜΕ αυτής της μορφής, είναι η απόσταση μεταξύ των γνωστών σημείων, δηλαδή το μέγεθος κελιού (cell size), που ουσιαστικά προσδιορίζει την ανάλυσή τους και εξαρτάται από την πυκνότητα των σημείων.

Το πλεονέκτημα από την άλλη είναι ότι αυτές οι δομές δεδομένων επιτρέπουν στατιστικές και χωρικές αναλύσεις, ενώ παρέχουν τη δυνατότητα παραγωγής ψευδο – εικόνων, όπως είναι οι σκιασμένες επιφάνειες.

Γενικά οι ράστερ εικόνες προσαρμόζονται ικανοποιητικά σε επιφάνειες 2.5D, που όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι και τα ΨΜΕ.

1.3.2 Ακανόνιστο δίκτυο τριγώνων (TIN - Triangular Irregular Networks)

Η περιγραφή της συνεχούς επιφάνειας μέσω τριγώνων (TIN), ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματικότητα σε σχέση με τον ψηφιδωτό κάναβο, καθώς το μοντέλο προσαρμόζεται πλήρως στα σημεία τα οποία έχουν συλλεχθεί. Τα τρίγωνα αυτά δημιουργούνται από τα υπάρχοντα μετρημένα με τυχαίο τρόπο σημεία, τα οποία χρησιμοποιούνται ως κορυφές τους.



Εικόνα 1.3-Δομή δεδομένων σε πλέγμα και σε TIN.

Πηγή: http://portal.survey.ntua.gr/main/courses/geoinfo/admcarto/lecture_notes/dtm%27s/dtm%27s.pdf

Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτών των μοντέλων είναι ότι δέχονται κανονικά και ακανόνιστα κατανομημένα σημεία, όπως και σημειακά χαρακτηριστικά, ενώ προσαρμόζονται στο γήινο ανάγλυφο διαφοροποιώντας το μέγεθος των τριγώνων.

Τα TIN μοντέλα κατασκευάζονται με τον 2D τριγωνισμό Delaunay στην περίπτωση των 2.5D μοντέλων, ενώ στην περίπτωση των 3D μοντέλων με μια πιο περίπλοκη μέθοδο τριγωνισμού Delaunay.

Με τα τρίγωνα αυτά δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης σύνθετων αλλά και απλών τοπολογικών σχέσεων, όπως είναι για παράδειγμα η αποθήκευση για κάθε τρίγωνο, του δείκτη των τριών παρακείμενων τριγώνων, με αποτέλεσμα την μείωση των τριγώνων που αναλύονται κάθε φορά (Kasser, Egels, 2002). Ένα μειονέκτημα αυτής της μορφής απεικόνισης των ΨΜΕ, είναι ότι η κλίση είναι ίδια σε όλη την επιφάνεια του τριγώνου, ενώ παρατηρούνται ασυνέχειες στις κλίσεις μεταξύ των γειτονικών τριγώνων. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη γνώση επιπλέον παραμέτρων, τη χρήση συναρτήσεων (πχ. bicubic splines) και με την υπόθεση ομαλής επιφάνειας.

Τα TIN μοντέλα προτιμώνται στις περιπτώσεις που είναι απαραίτητη η ακριβής απεικόνιση μικρών επιφανειακών χαρακτηριστικών του εδάφους, όπως είναι τα αναχώματα, μεμονωμένες κορυφές κ.α.

1.4 Άλλα Χαρακτηριστικά των Ψηφιακών Μοντέλων

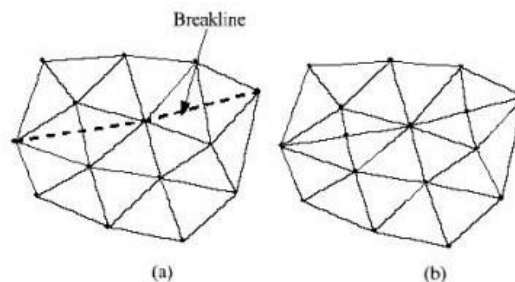
Πέρα από τον ψηφιδωτό κάνναβο και τα μοντέλα TIN, υπάρχουν και άλλα χαρακτηριστικά που λειτουργούν υποστηρικτικά σε αυτά τα δύο μοντέλα και συμβάλλουν στην απεικόνιση χωρικής πληροφορίας και στην αναπαράσταση του αναγλύφου του εδάφους. Μία συνοπτική αναφορά γίνεται παρακάτω.

1.4.1 Τυχαία σημεία (mass points)

Τα τυχαία σημεία είναι τα σημεία που έχουν μετρηθεί και τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως για τη δημιουργία των TIN κυρίως μοντέλων. Τα διαστήματα μεταξύ αυτών των σημείων είναι τυχαία, ενώ κάθε ένα από αυτά έχει γνωστή οριζοντιογραφική θέση και γνωστή τιμή κατά τον z άξονα. Παράγονται με αυτοματοποιημένες μεθόδους, κυρίως από InSAR, LiDAR και φωτογραμμετρικές τεχνικές, και το διάστημα μεταξύ τους εξαρτάται από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την απόκτησή τους.

1.4.2 Γραμμές ασυνέχειας (breaklines)

Οι γραμμές ασυνέχειας χρησιμοποιούνται κυρίως στα TIN μοντέλα και περιγράφουν αλλαγές κλίσης, συνέχειας και ομαλότητας ενώ τα τρίγωνα προσαρμόζονται σε αυτές (Εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.4-Γραμμή ασυνέχειας σε TIN μοντέλο.

Πηγή: http://www.ems-i.com/wms/help/Terrain_Data/TIN/Triangles/Breaklines.htm

Οι γραμμές ασυνέχειας είναι δύο ειδών, οι ομαλές και οι «σκληρές»:

- Οι ομαλές γραμμές δε χρησιμεύουν για τον καθορισμό ασυνεχειών και αλλαγής ομαλότητας σε μια επιφάνεια. Βασικός τους ρόλος είναι η εξασφάλιση της διατήρησης των γνωστών τιμών κατά τον άξονα z στο μήκος των γραμμικών χαρακτηριστικών, καθώς επίσης και των ακμών των πολυγώνων σε ένα μοντέλο TIN, επιβάλλοντας τις γραμμές ασυνέχειας ως πλευρές των τριγώνων. Οι γραμμές αυτές απεικονίζονται με τρισδιάστατες συντεταγμένες x, y, z.
- Οι «σκληρές» γραμμές, σε αντίθεση με τις προηγούμενες, χρησιμεύουν στον καθορισμό της διακοπής και των ασυνεχειών της επιφάνειας. Ουσιαστικά ορίζουν ακτές, κορυφογραμμές, ρέματα κ.α. Οι γραμμές αυτές συνήθως

απεικονίζονται σε δισδιάστατη μορφή, λόγω του ότι και τα αντικείμενα που ορίζουν είναι σε τέτοια μορφή χωρίς να περιλαμβάνουν υψομετρική πληροφορία.

1.4.3 Ισοϋψείς γραμμές

Οι ισοϋψείς, όπως είναι γνωστό, είναι γραμμές που ενώνουν σημεία με το ίδιο υψόμετρο, ενώ η ισοδιάσταση εξαρτάται από το σκοπό χρήσης τους, και την ακρίβεια των αρχικών δεδομένων. Και οι ισοϋψείς με τη σειρά τους, χρησιμεύουν στην αναπαράσταση χωρικής πληροφορίας του τρισδιάστατου γήινου αναγλύφου και συγκεκριμένα του υψομέτρου.

Το πλεονέκτημα αυτών των κατά τα άλλα απλών γραμμών, είναι ότι συμβάλλουν στην εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών για τη μορφή του αναγλύφου, όπως είναι η ύπαρξη κορυφογραμμών, κοιλάδων, η σχετική κλίση, ο προσανατολισμός της επιφάνειας του εδάφους, και λοιπών χαρακτηριστικών, τα οποία κάποιες φορές δεν εξάγονται από τα TIN μοντέλα και τους ράστερ κανάβους.

Υπάρχουν δύο είδη ισοϋψών, οι χαρτογραφικές και αυτές που χρησιμοποιούνται από μηχανικούς. Οι πρώτες είναι αυτές που χρησιμοποιούνται στους χάρτες και είναι περισσότερο ομαλές, φτιάχνονται από χαρτογράφους ανάλογα με την αισθητική και τις γνώσεις τους, ώστε να ανταποκρίνονται στην κλίμακα του χάρτη. Οι ισοϋψείς αυτές μπορούν να προσαρμοστούν κατάλληλα σε χαρακτηριστικά που απεικονίζονται, και μάλιστα με περισσότερη λεπτομέρεια από αυτή που επιτρέπει η αρχική επιφάνεια.

Οι ισοϋψείς που χρησιμοποιούν οι μηχανικοί είναι ακριβής και πιστή αναπαράσταση των μοντέλων TIN ή και των ψηφιδωτών κανάβων από τα οποία προέρχονται. Συνήθως δεν γενικεύονται, δεν ομαλοποιούνται, έχουν έντονες γωνίες και είναι χρήσιμες για περαιτέρω ανάλυση, είτε οπτική είτε υπολογιστική.

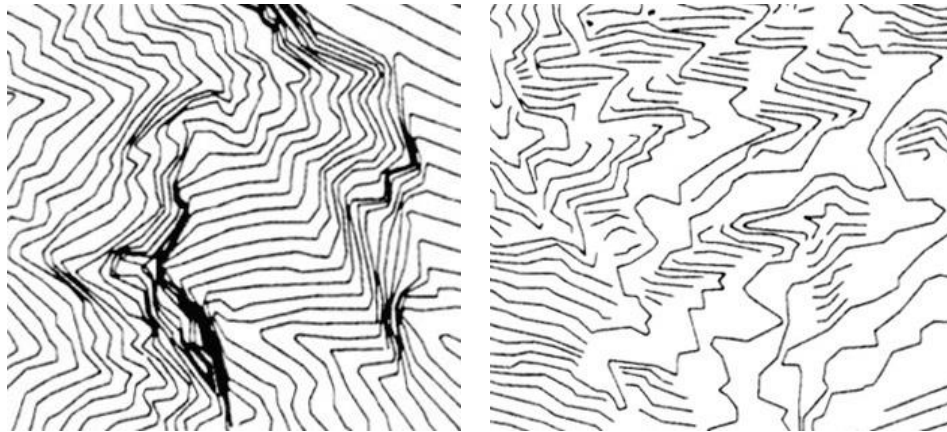
Κεφάλαιο 2

ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις μεθόδους παραγωγής ψηφιακών μοντέλων εδάφους. Για τη δημιουργία ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων, απαιτούνται υψομετρικά δεδομένα για την περιοχή ενδιαφέροντος και μέθοδοι για την εξαγωγή πληροφοριών που αφορούν στο ανάγλυφο. Οι συνηθέστερες πηγές δεδομένων για την εξαγωγή υψομετρικής πληροφορίας και τη δημιουργία των μοντέλων αυτών παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.1 Ψηφιοποίηση Χαρτών

Μια συνήθης και οικονομική μέθοδος για την παραγωγή ΨΜΕ, είναι η ψηφιοποίηση υπαρχόντων τοπογραφικών χαρτών και των ισοϋψών τους. Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην παρεμβολή μεταξύ των τιμών των ισοϋψών γραμμών που προκύπτουν από τους ψηφιοποιημένους χάρτες, αφού αυτοί έχουν πρώτα σαρωθεί στην περίπτωση των αναλογικών χαρτών, ενώ τα Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους που προκύπτουν είναι κυρίως μικρής και μεσαίας κλίμακας.



Εικόνα 2.1-Προβλήματα κατά την ψηφιοποίηση χαρτών (μικρά διαστήματα μεταξύ των ισοϋψών και ασυνέχειες).

Πηγή: http://portal.survey.ntua.gr/main/courses/geoinfo/admcarto/lecture_notes/dtm%27s/dtm%27s.pdf

Το θέμα παραγωγής ΨΜΕ από ψηφιοποίηση ισοϋψών είχε απασχολήσει πολύ τα προηγούμενα χρόνια και είχαν προταθεί μέθοδοι παραγωγής ΨΜΕ από αυτή τη διαδικασία, κυρίως για τη μείωση του χρόνου που απαιτείται και της ανθρώπινης εργασίας. Στόχος αυτών των προτάσεων ήταν η δημιουργία αλγορίθμων για την αυτόματη επεξεργασία των τοπογραφικών χαρτών με ισοϋψείς και την αυτόματη αναγνώριση των ισοϋψών καμπυλών για την εξαγωγή υψομέτρου.

Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί μεθοδολογίες για τη δημιουργία ΨΜΕ από ψηφιοποιημένους χάρτες, όπως αυτή των Arrighi και Soille (2009), στην οποία προτείνουν τρία στάδια για την παραγωγή ΨΜΕ: (α) την εξαγωγή των ισούψων και το φιλτράρισμά τους, (β) τη σύνδεση των ασύνδετων ισούψων και (γ) την παρεμβολή μεταξύ τους.

Γενικά η ψηφιοποίηση χαρτών είναι ένας γρήγορος τρόπος παραγωγής ΨΜΕ, με συμμετοχή ανθρώπινης εργασίας καθώς γίνεται κυρίως χειροκίνητα αλλά και με ημι-αυτόματες μεθόδους. Τα βασικά μειονεκτήματα της διαδικασίας αυτής είναι ο μεγάλος όγκος των χαρτών, οι ασυνέχειες των γραμμών ή και η σύμπτωσή τους (Εικόνα 2.1), ενώ τα προϊόντα που προκύπτουν από αυτή δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα, καθώς υπάρχουν σφάλματα τα οποία δημιουργούνται κατά τη διαδικασία της παραγωγής των χαρτών, της ψηφιοποίησης, ενώ και η διαδικασία της γενίκευσης είναι πηγή σφαλμάτων. Επιπλέον οι ίδιες οι ισούψεις δεν αποτελούν την καλύτερη δυνατή πηγή δεδομένων για την αναπαράσταση του αναγλύφου, κυρίως λόγω της πυκνότητάς τους.

2.2 Επίγειες Τοπογραφικές Μετρήσεις

Οι επίγειες τοπογραφικές μετρήσεις για τη συλλογή υψομετρικών δεδομένων με σκοπό τη δημιουργία ΨΜΕ, μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε με μετρήσεις GPS, είτε με άλλα γεωδαιτικά όργανα όπως total station. Οι μετρήσεις αυτές είναι πολύ υψηλής ακρίβειας, ενώ πραγματοποιούνται σε χαρακτηριστικά σημεία του γήινου αναγλύφου, με αποτέλεσμα να το περιγράφουν με πολύ καλό τρόπο.

Τα μειονεκτήματα της διαδικασίας αυτής είναι ότι είναι χρονοβόρα ενώ έχει και υψηλό κόστος, με αποτέλεσμα να περιορίζεται σε μικρές περιοχές και κατά συνέπεια τα ΨΜΕ που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία να είναι μεγάλης κλίμακας. Συνήθως οι επίγειες τοπογραφικές μετρήσεις πραγματοποιούνται συμπληρωματικά σε άλλες μεθόδους όπου αυτές αντιμετωπίζουν πρόβλημα λήψης μετρήσεων.

2.3 Φωτογραμμετρικές Μέθοδοι – Διεικονική Απόδοση

Η παραγωγή ΨΜΕ μπορεί να γίνει επίσης με την εφαρμογή φωτογραμμετρικών μεθόδων. Τα ΨΜΕ που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία είναι μεσαίας ή υψηλής ακρίβειας και αφορούν κυρίως τεχνικά έργα μεγάλης κλίμακας και εθνικές συλλογές δεδομένων (π.χ. ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε., ΟΚΧΕ).

Με τη μέθοδο της διεικονικής απόδοσης η υψομετρική πληροφορία εξάγεται από τη στερεοσκοπική απόδοση επικαλυπτόμενων αεροφωτογραφιών χειροκίνητα ή (συνήθως) αυτοματοποιημένα μέσω συνταύτισης ομόλογων σημείων. Οι φωτογραφίες μπορεί να έχουν προέλθει είτε από απλές φωτογραφικές μηχανές, είτε από εναέρια ψηφιακά συστήματα ή μπορεί να είναι δορυφορικές εικόνες. Η ανάλυση των εικόνων διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια και ποιότητα της υψομετρικής πληροφορίας.

Η λειτουργία των φωτογραμμετρικών οργάνων βασίζεται στη συνεχή επίλυση εμπροσθοτομίας στο χώρο, με αποτέλεσμα τον προσδιορισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων που στοχεύονται και παρατηρούνται στερεοσκοπικά στο επικαλυπτόμενο μέρος. Ουσιαστικά μετατρέπεται η δισδιάστατη πληροφορία σε τρισδιάστατη με χρήση αλγορίθμων και προκύπτουν τα οριζοντιογραφικά και τα υψομετρικά στοιχεία των αντικειμένων. Επίσης με τα ψηφιακά όργανα υπάρχει η δυνατότητα άμεσου ελέγχου του αποτελέσματος στην οθόνη του Η/Υ.

Όσον αφορά στις αυτοματοποιημένες ψηφιακές μεθόδους, με τις οποίες συλλέγονται πολλά σημεία, υπάρχει περίπτωση εξαγωγής λανθασμένων υψομέτρων, ύπαρξη ασαφών ορίων διαχωρισμού εδάφους από υδάτινες μάζες, έλλειψη σημαντικών λεπτομερειών ή ύπαρξη στοιχείων τα οποία δεν είναι απαραίτητα, δημιουργία θορύβου, κ.α.

2.4 Μέθοδος Πυκνής Συνταύτισης Εικόνων (Dense image matching)

Τρισδιάστατη πληροφορία προκύπτει και από την εφαρμογή της μεθόδου της πυκνής συνταύτισης σε εικόνες. Συνεπώς, όπως γίνεται φανερό, ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα μπορούν να δημιουργηθούν από τα δεδομένα της διαδικασίας αυτής.

Η ψηφιακή συνταύτιση εικόνων είναι μια βασική διαδικασία της ψηφιακής φωτογραμμετρίας. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ψηφιακής συνταύτισης, όπως είναι η επιφανειακή και η σχεσιακή, αλλά η μέθοδος της πυκνής συνταύτισης είναι αυτή που δίνει περισσότερο ολοκληρωμένα αποτελέσματα για τη δημιουργία ενός μοντέλου επιφάνειας.

Η πυκνή συνταύτιση εικόνων δεν είναι τίποτα άλλο παρά μια μέθοδος συνταύτισης, στην οποία όμως εντοπίζονται ομολογίες για όλα τα εικονοστοιχεία. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ένας πίνακας ανομοιοτήτων βάθους, ο οποίος περιέχει σε οπτικοποιημένη μορφή την ανομοιότητα βάθους του κάθε εικονοστοιχείου μιας εικόνας αναφοράς, το οποίο αντιπροσωπεύει ένα σημείο στο χώρο μεταφέροντας την πληροφορία της τρίτης διάστασης στη διεύθυνση του βάθους (Μαλτέζος, 2013).

Αρχικά τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου δεν ήταν υψηλής ακρίβειας, λόγω της μικρής βάσης του στερεοζεύγους, για την απλούστευση της διαδικασίας. Μάλιστα πολλοί αλγόριθμοι είχαν δημιουργηθεί για το λόγο αυτό. Στη συνέχεια, προτάθηκαν όμως νέοι αλγόριθμοι με μεγαλύτερη βάση και καλύτερη ανάλυση, κάτι το οποίο όμως καθιστούσε αρκετά πολύπλοκη την εύρεση ομολογιών. Η δυσκολία εύρεσης ομολογιών – λόγω της μεγάλης βάσης λήψης - οφείλεται στη δημιουργία αποκρύψεων και συνεπώς στην έλλειψη πληροφορίας. Η αντιμετώπιση των αποκρύψεων, επιτυγχάνεται με το βέλτιστο συνδυασμό φακού, κλίμακας εικόνων, απόστασης από το αντικείμενο, βάσης λήψης, απόστασης μεταξύ των λωρίδων λήψης και του λόγου της βάσης λήψης προς την απόσταση από το αντικείμενο (Μαλτέζος, 2013). Γενικά, προβλήματα κατά τη διαδικασία της πυκνής συνταύτισης,

δημιουργούνται κυρίως από τη γεωμετρία λήψης και τις ραδιομετρικές παραμορφώσεις.

Σήμερα οι μέθοδοι που εφαρμόζονται για την πυκνή συνταύτιση εικόνων και κατά συνέπεια την εξαγωγή τρισδιάστατης πληροφορίας, ξεκινούν από μια λιγότερο λεπτομερή ανακατασκευή του αντικειμένου η οποία βελτιώνεται σε κάθε επανάληψη. Οι μέθοδοι αυτές κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη συνάρτηση ομοιότητας των ομόλογων περιοχών, οι οποίες ελαχιστοποιούνται σε κάθε επανάληψη, αλλά και βάσει του τρόπου αναπαράστασης της 3D πληροφορίας. Στην περίπτωση της στερεο-συνταύτισης, για μια απλή ανακατασκευή τρισδιάστατου αντικειμένου μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο εικόνες - μία αναφοράς και μία αναζήτησης, ενώ στην περίπτωση μιας περισσότερο ακριβούς ανακατασκευής απαιτείται η χρήση περισσότερων εικόνων, με περισσότερες από μια να θεωρούνται ως εικόνες αναφοράς.

Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να ακολουθούνται κάποιες συγκεκριμένες διαδικασίες, οι οποίες γίνονται είτε πριν την εφαρμογή της μεθόδου της πυκνής συνταύτισης είτε μετά από αυτή, και διασφαλίζουν την ποιότητα των αποτελεσμάτων.

- *Η αξιολόγηση του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους*

Είναι απαραίτητη διαδικασία και γίνεται με χρήση δεικτών, με οπτικό έλεγχο, με συγκρίσεις μεταξύ ψηφιακών μοντέλων επιφανείας και νεφών σημείων που έχουν προκύψει από άλλες μεθόδους, όπως είναι τα συστήματα LiDAR, κ.α.

- *Η επιβολή δεσμεύσεων*

Η διαδικασία αυτή συμβάλει στην εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Οι δεσμεύσεις αυτές εξαρτώνται συνήθως από τον αλγόριθμο συσχέτισης. Κάποιες γνωστές δεσμεύσεις είναι αυτές της επιπολικής γεωμετρίας, της εκατέρωθεν συνέπειας, της διάταξης εικονοστοιχείων, της ομαλότητας και της ομοιότητας.

- *Η εφαρμογή φίλτρων στις εικόνες*

Η διαδικασία αυτή προηγείται της πυκνής συνταύτισης. Τα φίλτρα εφαρμόζονται με στόχο τη καλύτερη απόδοση της μετέπειτα διαδικασίας, και τα αποτελέσματά τους, ανάλογα με το φίλτρο, είναι η εξομάλυνση των αρχικών εικόνων με διατήρηση των ακμών τους, η ενίσχυση της υφής για τη μείωση των ραδιομετρικών διαφορών μεταξύ των εικονοστοιχείων κ.α.

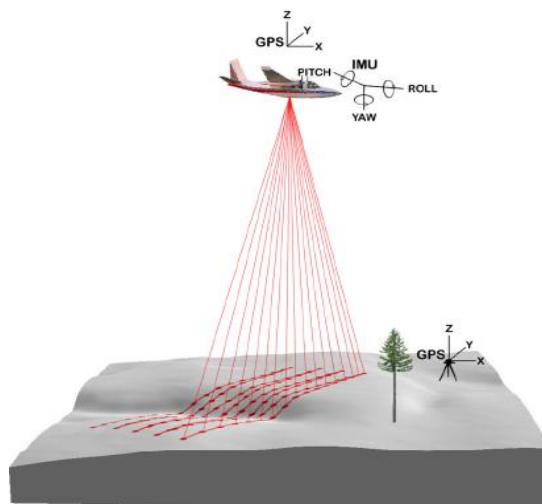
- *Βελτιστοποίηση πίνακα ανομοιοτήτων βάθους*

Τέλος αυτή η διαδικασία συμβάλλει στην απαλοιφή των σφαλμάτων που έχουν απομείνει, όπως είναι οι ασυνέχειες που προκαλούνται στα όρια αντικειμένων λόγω της χαμηλής υφής του υποβάθρου τους. Η διαδικασία αυτή δίνει λύσεις με χρήση υποθέσεων ανάλογα με την εφαρμογή, αλλά και με άλλες μεθόδους όπως είναι η αφαίρεση τμημάτων με ακραίες τιμές.

Πέρα από τη χρήση υπολογιστών και αλγορίθμων, η μέθοδος της πυκνής συνταύτισης μπορεί να εφαρμοστεί και από τον άνθρωπο με στερεοσκοπικές μεθόδους, αν και κάτι τέτοιο είναι αρκετά χρονοβόρο. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας έχει την ακρίβεια των φωτογραμμετρικών μεθόδων, αν και η σχολαστικότητα του χειριστή συμβάλει αρκετά στη βελτίωσή της. (Πρόκος, 2012)

2.5 Δεδομένα LiDAR

Η λέξη LiDAR προκύπτει από τις λέξεις Light Detection And Ranging. Τα συστήματα LiDAR δημιουργήθηκαν για να συλλέγουν χωρική πληροφορία και κατά συνέπεια υψομετρικά δεδομένα για την παραγωγή χρήσιμων προϊόντων, όπως είναι ορθοφωτογραφίες, DEM, αλλά και ΨΜΕ. Ειδικά η δημιουργία ΨΜΕ έχει διευκολυνθεί εξαιρετικά με τη συμβολή των LiDAR δεδομένων. Τα LiDAR είναι μονοχρωματικά συστήματα radar, τα οποία λειτουργούν βασιζόμενα σε νόμους φυσικής.



Εικόνα 2.2- Σύστημα LiDAR.

Πηγή:

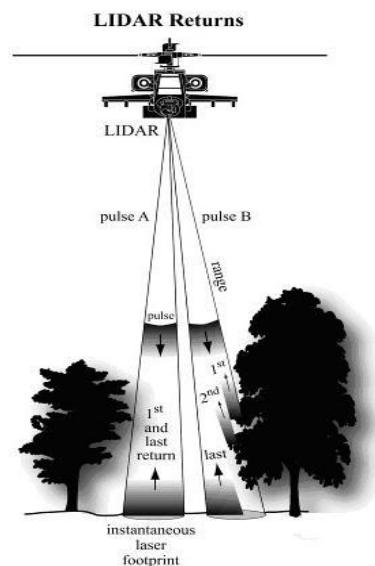
http://mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1106/document/%C4%E9%E1%F6%DC%ED%E5%E9%E5%F2_%C4%E9%E1%EB%DD%EE%E5%F9%ED/Foto_II_08_2013_LiDAR.pdf

2.5.1 Αρχή λειτουργίας

Αρχικά να αναφερθεί ότι υπάρχουν δύο είδη συστημάτων LiDAR, τα εναέρια και τα επίγεια. Αυτά που απασχολούν περισσότερο για την παραγωγή των ΨΜΕ, είναι τα εναέρια συστήματα. Όσον αφορά στην αρχή λειτουργίας τους, τα βασικά συστατικά των συστημάτων αυτών είναι ένα αεροσκάφος, ο εναέριος σαρωτής, ένα GPS και INS που βρίσκονται στο αεροσκάφος, άλλο ένα GPS που βρίσκεται στο έδαφος σε σημείο με γνωστές συντεταγμένες και μια αδρανειακή μονάδα μέτρησης (IMU) (Εικόνα 2.2). Αυτή η μονάδα μέτρησης είναι μια ηλεκτρονική συσκευή η οποία μετρά και καταγράφει την κλίση και το ύψος του αεροσκάφους κάθε 0.002 δευτερόλεπτα. Τα GPS με τη σειρά τους καταγράφουν τη θέση του αεροσκάφους κάθε 0.5

δευτερόλεπτα, ενώ ο εναέριος σαρωτής λαμβάνει τουλάχιστον τέσσερις ανακλάσεις ανά παλμό χρησιμοποιώντας έναν πομπό και ένα δέκτη.

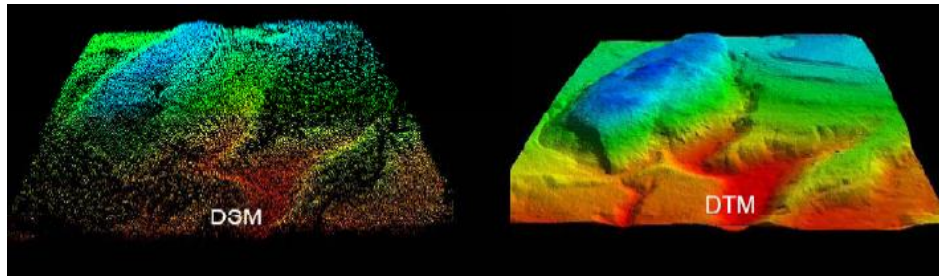
Συγκεκριμένα ο πομπός ο οποίος βρίσκεται στο αεροσκάφος που εκτελεί την πτήση, εκπέμπει χιλιάδες παλμούς laser το δευτερόλεπτο, οι οποίοι εκπέμπουν κυρίως στο εγγύς υπέρυθρο τμήμα του φάσματος, σαρώνοντας ουσιαστικά την περιοχή πτήσης και ο δέκτης λαμβάνει την ανάκλαση του κάθε παλμού μετατρέποντας το χρόνο της διαδρομής του σε απόσταση. Η απόσταση αυτή, η οποία προσδιορίζεται με ακρίβεια της τάξης των 15-30mm, σε συνδυασμό με τη γνώση του προσανατολισμού και της θέσης του αεροσκάφους, καθώς αυτό είναι εφοδιασμένο με INS (inertial navigator systems) και GPS όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, παράγουν τις τρισδιάστατες συντεταγμένες του αντικειμένου-στόχου με πολύ υψηλή ακρίβεια. Ουσιαστικά τα αρχικά δεδομένα έχουν γεωαναφορά τη στιγμή της συλλογής τους (Maune, 2007).



Εικόνα 2.3-Καταγραφή πολλαπλών επιστροφών από τα κλαδιά των δέντρων (πρώτη επιστροφή) και το έδαφος (τελευταία επιστροφή).

Πηγή: <https://courseware.e-education.psu.edu/courses/bootcamp/lo04/cg.html>

Πιο αναλυτικά, όταν εκπέμπεται ένας παλμός, αυτός μπορεί να ανακλαστεί από πολλά αντικείμενα με αποτέλεσμα ο δέκτης να λαμβάνει πολλαπλές επιστροφές. Μπορούν να καταγραφούν περισσότερες των 200.000 επιστροφών ανά δευτερόλεπτο, με την πυκνότητα να κυμαίνεται μεταξύ 0.5 έως 20 και πλέον παλμών ανά τετραγωνικό μέτρο, με αποτέλεσμα την μεγάλη ανάλυση της επιφάνειας που καταγράφεται. Επίσης, από τις πολλαπλές αυτές επιστροφές η πρώτη συνήθως καταγράφει το υψηλότερο σημείο και η τελευταία το έδαφος (Εικόνα 2.3). Το αποτέλεσμα αυτής της σάρωσης που πραγματοποιείται στην επιφάνεια της Γης είναι το νέφος σημείων (Εικόνα 2.4) και η συλλογή τρισδιάστατης πληροφορίας, καθώς τα πρωτογενή δεδομένα, όπως αναφέρθηκε είναι οι X, Y, Z συντεταγμένες των σημείων στο WGS'84.



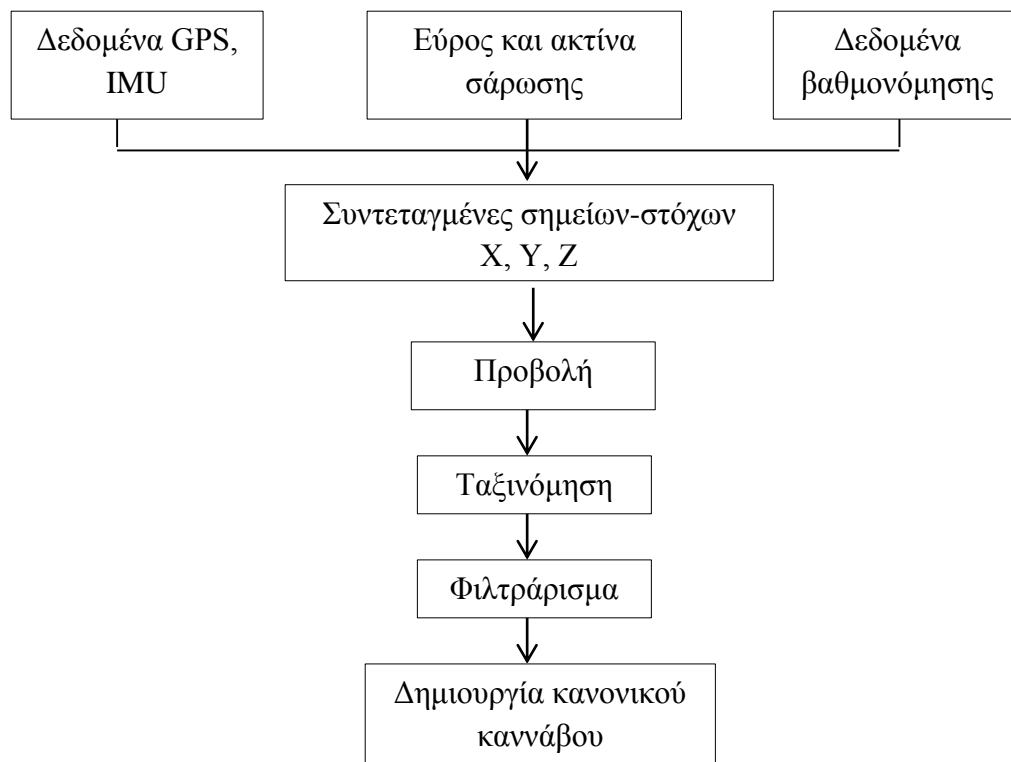
Εικόνα 2.4-Νέφος σημείων από σύστημα LiDAR για την παραγωγή ΨΜΕ από DSM.

Πηγή:

http://mvcourses.ntua.gr/courses/SURVEY1106/document/%C4%E9%E1%F6%DC%ED%E5%E9%E5%F2_%C4%E9%E1%EB%DD%EE%E5%F9%ED/Foto_II_08_2013_LiDAR.pdf

2.5.2 Παραγωγή ΨΜΕ

Η διαδικασία για την παραγωγή των ΨΜΕ από συστήματα LiDAR, πέρα από τα βασικά όπως είναι ο προγραμματισμός της πτήσης, η βαθμονόμηση του συστήματος και φυσικά η συλλογή των αρχικών δεδομένων, είναι η επεξεργασία τους για την παραγωγή των τελικών προϊόντων και ο έλεγχος της ποιότητάς τους. Συγκεκριμένα τα ΨΜΕ παράγονται με τη διαδικασία της ταξινόμησης και την εφαρμογή φιλτραρίσματος στα DSM, των οποίων η δημιουργία προηγείται, και από αυτά αφαιρείται η βλάστηση, οι ανθρώπινες κατασκευές και ό, τι άλλο δεν ανήκει στο έδαφος (Σχήμα 2.1) (Maune, 2007).



Σχήμα 2.1-Ροή επεξεργασίας δεδομένων LiDAR.

2.5.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου

Τα συστήματα LiDAR έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν όλο το εικοσιτετράωρο. Τα βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων LiDAR είναι η σημαντικά μεγάλη πυκνότητα των δεδομένων που συλλέγονται η οποία συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στην πολύ καλή ανάλυση των προϊόντων, αλλά και η συλλογή τρισδιάστατης πληροφορίας, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω. Επιπλέον, οι ακτίνες laser μπορούν να διαπεράσουν τη βλάστηση – σε περίπτωση που αυτή δεν είναι πολύ πυκνή – και να καταγράψουν το έδαφος, κάτι το οποίο είναι δύσκολο με άλλες μεθόδους. Τέλος, παρέχουν πολύ καλή ακρίβεια, της τάξεως των 0.1-0.15m υψομετρικά και 0.2-1m οριζοντιογραφικά.

Αντίθετα, τα μειονεκτήματα αυτών των συστημάτων είναι κυρίως οι δυσμενείς επιπτώσεις της σκόνης, της υγρασίας και της ομίχλης στις μετρήσεις. Επίσης σε περιοχές με έντονη βλάστηση συνήθως δεν μπορεί να καταγραφεί το έδαφος, ενώ άλλη μια περίπτωση δυσκολίας καταγραφής του εδάφους είναι οι μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης των παλμών. Στις υδάτινες επιφάνειες τα αποτελέσματα των μετρήσεων δεν είναι αξιόπιστα, ενώ δεν περιγράφονται σωστά και οι γραμμές ασυνέχειας. Επιπλέον είναι μια ακριβή μέθοδος και σε περιπτώσεις μικρών εργασιών είναι αντικοινωνική. Τέλος δυσκολία εντοπίζεται και στην ερμηνεία των νεφών των σημείων.

2.5.4 Πηγές σφαλμάτων

Τα σφάλματα που μπορεί να εντοπιστούν στα τελικά προϊόντα των μετρήσεων LiDAR, ενδέχεται να προκύψουν είτε κατά την καταγραφή των αρχικών δεδομένων, είτε κατά την επεξεργασία τους.

Όλοι οι παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω ότι επηρεάζουν τις μετρήσεις είναι και οι πηγές των σφαλμάτων των αρχικών δεδομένων. Η ατμόσφαιρα μέσω της οποίας διαδίδεται η ακτίνα laser και ό, τι αυτή περιέχει όπως είναι η ομίχλη και η σκόνη δημιουργούν προβλήματα στα πρωτογενή δεδομένα. Επιπλέον η ανακλαστικότητα της επιφάνειας στην οποία προσπίπτει η δέσμη laser συμβάλει με τη σειρά της στη δημιουργία σφαλμάτων. Επίσης στις μετρήσεις ενδέχεται να υπάρξει θόρυβος είτε από λανθασμένη γωνία πρόσπτωσης της δέσμης (περισσότερο πλάγια), με συνέπεια η επιστροφή που λαμβάνει ο δέκτης να είναι ασθενέστερη, είτε λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων μιας δέσμης από τυχαία αντικείμενα που βρίσκονται κοντά στα σημεία ενδιαφέροντος.

Η επεξεργασία των αρχικών δεδομένων είναι επίσης πηγή σφαλμάτων. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται για την παραγωγή ΨΜΕ, όπως είναι η ταξινόμηση και το φιλτράρισμα των δεδομένων μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα σε περίπτωση που δεν γίνουν σωστά ή με μεγάλη ακρίβεια. Η συνόρθωση των δεδομένων, οι μέθοδοι παρεμβολής όπου αυτό χρειάζεται, αλλά και η μετέπειτα οπτική ανάλυση των προϊόντων ενέχουν επίσης την πιθανότητα δημιουργίας σφαλμάτων.

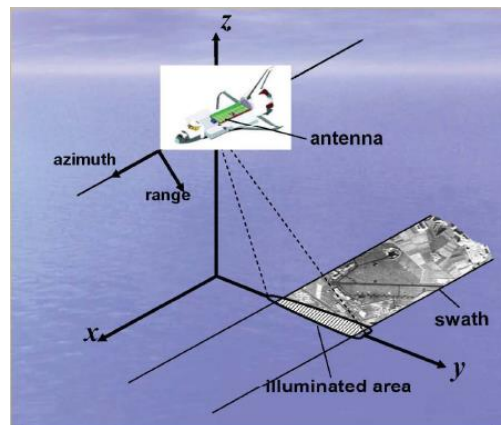
2.6 Δεδομένα InSAR

Ψηφιακά μοντέλα εδάφους μπορούν να προκύψουν και από δεδομένα InSAR. Η λέξη InSAR προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Interferometric Synthetic Aperture Radar, δηλαδή συμβολομετρία radar συνθετικού ανοίγματος. Λόγω του ότι τα InSAR είναι προέκταση των συστημάτων SAR, θα γίνει πρώτα μια αναφορά σε αυτά.

2.6.1 Αρχή λειτουργίας SAR

Τα Radar συνθετικού ανοίγματος (SAR) είναι εξέλιξη των Radar πραγματικού ανοίγματος (SLAR). Δημιουργήθηκαν ώστε να πετυχαίνουν υψηλή διακριτική ικανότητα κατά τη διεύθυνση της πτήσης του αεροσκάφους, κάνοντας χρήση κεραίας μικρού μήκους και μεγάλου μήκους κύματος, χωρίς να επηρεάζονται από την πλευρική απόσταση (range) (Καραθανάση, 2012).

Αρχικά να αναφερθεί ότι τα radar είναι συστήματα εκπομπής παλμού και καταγραφής της επιστροφής του (ηχώ), αφού διανύσουν πλευρική απόσταση μέχρι το στόχο. Τα στοιχεία που καταγράφονται από την επιστροφή είναι η φάση, η διεύθυνση λήψης και η ισχύς του σήματος.



Εικόνα 2.5-Τυπική γεωμετρία SAR.

Τα SAR λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο με τα LiDAR, όσον αφορά στο ότι και αυτά εκπέμπουν ακτινοβολία και λαμβάνουν την επιστροφή της. Συγκεκριμένα 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 δορυφόρο, στο οποίο βρίσκεται μια πλατφόρμα που περιέχει μια μικρή κεραία radar η οποία ουσιαστικά κινείται κατά τη διεύθυνση της πτήσης ή αζιμούθιου (track direction) και σαρώνει το έδαφος πλευρικά της πλατφόρμας εκπέμποντας και καταγράφοντας παλμούς. Η κεραία του radar εκπέμπει σε διεύθυνση κάθετη σε σχέση με αυτή της πτήσης σχηματίζοντας έτσι τη διεύθυνση πλευρικών αποστάσεων (range direction). Οι παλμοί εκπέμπονται ανά συγκεκριμένες αποστάσεις και σχηματίζουν μια περιοχή κατά μήκος της διεύθυνσης της πτήσης η οποία έχει μεγαλύτερο μέγεθος από την επιθυμητή ανάλυση, καθώς ο ίδιος στόχος δέχεται και ανακλά την ακτινοβολία από τις διαφορετικές θέσεις του

radar. Το πρόβλημα αυτό δημιουργείται από το πλάτος/εύρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Η τελική ανάλυση επιτυγχάνεται με τη χρήση τεχνικών επεξεργασίας σημάτων για τη δημιουργία μιας «συνθετικής κεραίας», με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας πολύ καλύτερης διακριτικής ικανότητας κατά τη διεύθυνση της πτήσης (Καραθανάση, 2012).

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. Σημαντική συμβολή στον υπολογισμό αυτής της κεραίας αλλά και της θέσης του αζιμούθιου, είναι το φαινόμενο Doppler, στο οποίο οφείλονται οι διακυμάνσεις της συχνότητας των σημάτων που λαμβάνονται, λόγω των μεταβολών στη σχετική θέση radar-στόχου, ουσιαστικά υπάρχει μια μετατόπιση της συχνότητας της ακτινοβολίας που εκπέμπεται σε σχέση με αυτή που επιστρέφει.

Η διακριτική ικανότητα (ΔΙ) 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 παραπλευρώς της πλατφόρμας, εξαρτάται από το εύρος των συχνοτήτων (bandwidth) του παλμού (Καραθανάση, 2012).

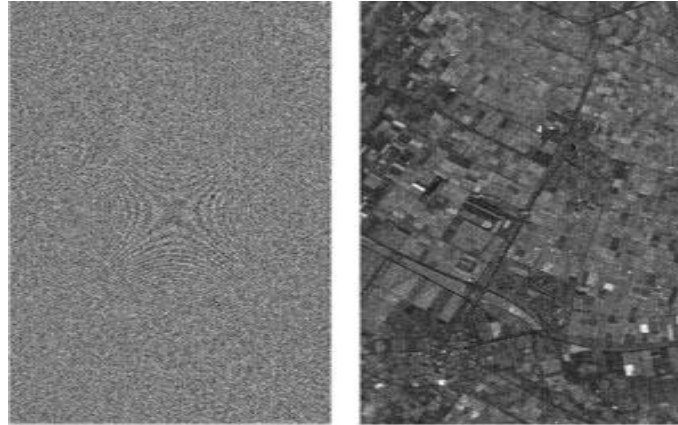
Τα βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων SAR είναι η λειτουργία τους όλο το εικοσιτετράωρο και το ότι δεν επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες, όπως τα σύννεφα και η ομίχλη.

2.6.2 Απεικονίσεις SAR

Τα συστήματα SAR χρησιμοποιούνται για την παραγωγή εικόνων υψηλής ανάλυσης από εναέριες ή και διαστημικές πλατφόρμες, ενώ για την παραγωγή των διδιάστατων αυτών εικόνων απαιτείται επεξεργασία των αρχικών δεδομένων (Εικόνα 2.6). Γενικά οι μετρήσεις radar είναι μονοδιάστατες, αφού μετράται το ποσοστό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Η κίνηση του αεροσκάφους και κατά συνέπεια του radar είναι αυτή που «δημιουργεί» τη δεύτερη διάσταση δίνοντας τη δυνατότητα παραγωγής εικόνων.

Γενικά το ανάγλυφο επηρεάζει τις απεικονίσεις SAR με διάφορους τρόπους. Η ύπαρξη σκιών δηλώνει την ανυπαρξία σήματος επιστροφής, ενώ σχετίζεται και με τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας και κατά συνέπεια την καταγραφή ή όχι του εδάφους. Η σκιά είναι ενδεικτική για τον υπολογισμό των υψών των αντικειμένων, ενώ υποδηλώνει τη διεύθυνση από την οποία προέρχεται η ακτινοβολία του radar. Η σμίκρυνση οφείλεται στη μικρότερη κλίση της επιφάνειας σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης. Η ανάστροφη απεικόνιση, η οποία είναι μια ακραία περίπτωση σμίκρυνσης, σχετίζεται με την μικρή πλευρική απόσταση των πολύ υψηλών σημείων από την πλατφόρμα στην περίπτωση των απότομων κλίσεων, με αποτέλεσμα την ακριβώς αντίθετη απεικόνιση από την πραγματικότητα. Η ανάστροφη απεικόνιση προκύπτει όταν η κλίση της επιφάνειας είναι μεγαλύτερη από τη γωνία πρόσπτωσης.

Τέλος, οι διαφορετικοί τόνοι του γκρι, οφείλονται στη διαφορετική ένταση του σήματος που επιστρέφει.



Εικόνα 2.6-Αρχικά δεδομένα SAR (αριστερά) και η τελική εικόνα (δεξιά).

Πηγή: http://www.ercim.eu/publication/Ercim_News/enw65/barbier.html

2.6.3 InSAR

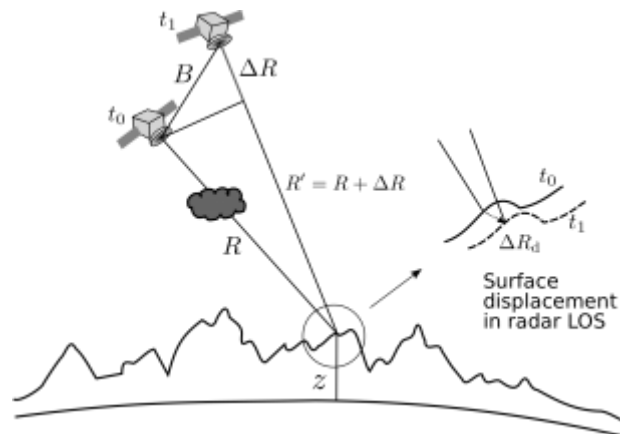
Η βασική διαφορά της συμβολομετρίας με τα συστήματα SAR είναι η ύπαρξη της τρίτης διάστασης στις απεικονίσεις, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα δημιουργίας ΨΜΕ. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με την ύπαρξη άλλης μιας κεραίας στο ίδιο αεροσκάφος, είτε από δύο διαφορετικές απεικονίσεις SAR. Τα βασικότερα είδη συμβολομετρίας είναι τα εξής (Καραθανάση, 2012):

- *Επαναληπτική συμβολομετρία:* σε αυτό το είδος συμβολομετρίας χρησιμοποιούνται δύο απεικονίσεις SAR, οι οποίες προέρχονται από δύο παράλληλες τροχιές δορυφόρου, μετατοπισμένες κατά πλάτος (across – track). Η ακρίβεια αυτού του είδους συμβολομετρίας είναι της τάξης των 10m και το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής της είναι οι δορυφόροι ERS-1 και ERS-2 με την αποστολή TANDEM.
- *Κατά μήκος συμβολομετρία:* Γνωστή και ως along track, κάνει χρήση δύο κεραίων, τοποθετημένων κατά τη διεύθυνση της πτήσης, με τη μια να είναι πομπός και δέκτης παράλληλα και την άλλη μόνο δέκτης (Σχήμα 2.2). Τα σήματα που λαμβάνουν οι δύο κεραίες – από την ανάκλαση του αρχικού – συνδυάζονται κατάλληλα για τον υπολογισμό της διαφοράς φάσης. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας τη γεωμετρία της συμβολομετρίας, η διαφορά φάσης μπορεί να μετατραπεί σε υψόμετρο για το εκάστοτε σημείο. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με αυτή τη διαδικασία είναι καλύτερη του μέτρου.
- *Διαφορική συμβολομετρία (differential interferometry):* αυτό το είδος συμβολομετρίας κάνει χρήση περισσότερων των δύο απεικονίσεων SAR, που προκύπτουν από δορυφορικά δεδομένα, ή εναλλακτικά δύο απεικονίσεων SAR και ενός βοηθητικού ΨΜΕ. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμογές στην παρακολούθηση των μικρομετακινήσεων της γήινης επιφάνειας, με μεγάλη ακρίβεια.

Γενικά τα συστήματα InSAR αποτελούνται πέρα από το αεροσκάφος ή το δορυφόρο και την πλατφόρμα, από ένα GPS και ένα σταθμό στο έδαφος αν είναι απαραίτητο, ένα INS σύστημα και φυσικά ένα συμβολομετρικό σύστημα radar. Υπάρχει δυνατότητα επιπλέον εξοπλισμού, όπως μετρητικά συστήματα βάσης στην περίπτωση της δημιουργίας χαρτών.

2.6.4 Γεωμετρία συμβολομετρίας

Η τρισδιάστατη πληροφορία προκύπτει από τη γνώση της γεωμετρίας της συμβολομετρίας, της θέσης της πλατφόρμας, του εύρους, της διαφοράς φάσης, του μήκους της βάσης αλλά και του προσανατολισμού της. Η διαφορά φάσης προκύπτει από το συνδυασμό των λαμβανόμενων σημάτων των δύο κεραιών για κάθε σημείο. Στη συνέχεια, με τη γνώση της γεωμετρίας, αυτή μετατρέπεται σε υψόμετρο. Συγκεκριμένα, γνωρίζοντας τη συμβολομετρική φάση, πέρα από τη γνώση της διεύθυνσης του αζιμούθιου και της πλευρικής απόστασης, μπορεί να προκύψει τρισδιάστατη πληροφορία για κάθε σημείο. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2, η διαφορά φάσης, μαζί με τη διαφορά εύρους (range difference) (ΔR) και τη βάση (B) που σχηματίζεται ανάμεσα στις δύο κεραιές, συμβάλλουν στον προσδιορισμό του τριγώνου που σχηματίζεται και κατά συνέπεια του υψομέτρου του εκάστοτε σημείου. Οι μετρήσεις των InSAR συστημάτων δίνουν τη δυνατότητα σχηματισμού δύο εικόνων, η μια απεικονίζει τη διαφορά φάσης και η άλλη το εύρος (amplitude).



Σχήμα 2.2-Γεωμετρία συμβολομετρίας.

Πηγή: <http://www.globesar.com/technology/>

2.6.5 Η συμβολομετρική διαδικασία

Η συμβολομετρική διαδικασία για την παραγωγή υψομέτρων είναι η εξής και αφορά κυρίως στη μέθοδο της επαναληπτικής συμβολομετρίας:

- Επεξεργασία των απεικονίσεων (SAR preprocessing): Η επεξεργασία αυτή γίνεται με σκοπό την απομάκρυνση του συστηματικού θορύβου, κυρίως με χρήση μετασχηματισμού Fourier.

- Συμπροσαρμογή απεικονίσεων (coregistration): Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητο να έχει ακρίβεια καλύτερη του 1/8 του εικονοστοιχείου και είναι αναγκαία για τον υπολογισμό της φάσης σε επόμενα στάδια.
- Παραγωγή διαγράμματος κροσσών συμβολής (interferogram): Σε αυτό το στάδιο πολλαπλασιάζεται μιγαδικά η μία εικόνα με τη συζυγή της άλλης με αποτέλεσμα τη δημιουργία του διαγράμματος των κροσσών συμβολής. Οι κροσσοί είναι καμπύλες ίσης φάσης, δηλαδή κάθε κροσσός περιέχει μια τιμή συμβολομετρικής φάσης η οποία ανήκει στο διάστημα $[0, 2\pi]$.
- Φιλτράρισμα διαγράμματος (filtering): Το φιλτράρισμα γίνεται με το μετασχηματισμό Fourier στο πεδίο των συχνοτήτων με στόχο τη βελτίωση της ευκρίνειας των κροσσών.
- Αφαίρεση φάσης επίπεδης Γης (flat earth removal): Ο υπολογισμός και η αφαίρεση αυτής της φάσης γίνεται με σκοπό την διευκόλυνση της αποκατάστασης της φάσης στο στάδιο που ακολουθεί. Η φάση της επίπεδης Γης σχετίζεται με την οριζόντια διαφοροποίηση των σημείων της απεικόνισης, ενώ είναι άσχετη με την τοπογραφία.
- Αποκατάσταση φάσης (phase unwrapping): Σε αυτό το στάδιο γίνεται η αποκατάσταση των ακέραιων κύκλων που χάθηκαν κατά τη δημιουργία των κροσσών συμβολής.
- Μετατροπή φάσης σε υψόμετρο (phase – to – height conversion): Η μετατροπή αυτή γίνεται γνωρίζοντας τα δεδομένα των τροχιών των δορυφόρων, βασιζόμενη στη γνώση της γεωμετρίας των απεικονίσεων. Το υψόμετρο που προκύπτει είναι το σχετικό υψόμετρο.
- Γεωκωδικοποίηση (geocoding): Στο τελικό αυτό στάδιο τα σχετικά υψόμετρα που προέκυψαν από την προηγούμενη φάση τοποθετούνται σε κάρναβο στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς.

2.6.6 Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα μεθόδου

Τα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι τα σήματα του radar δεν μπορούν να διεισδύσουν στην πυκνή βλάστηση με αποτέλεσμα την έλλειψη καταγραφής του εδάφους. Επίσης οι λείες επιφάνειες, όπως είναι οι υδάτινες επιφάνειες δεν οπισθοσκεδάζουν αρκετή ενέργεια στον δέκτη, με συνέπεια την έλλειψη δυνατότητας υπολογισμού του υψομέτρου.

Τα σημαντικά πλεονεκτήματα όμως της μεθόδου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι η δυνατότητα εικοσιτετράωρης λειτουργίας και το ότι δεν επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες.

Πίνακας 2.1-Συγκριτικός πίνακας μεθόδων παραγωγής ΨΜΕ.

Μέθοδος	Ακρίβεια	Ταχύτητα	Κόστος	Έκταση
Επίγεια τοπογραφική	Υψηλή (cm - m)	Πολύ αργή	Πολύ υψηλό	Μικρή
GPS	Σχετικά υψηλή (cm-m)	αργή	Σχετικά υψηλό	Μικρή
Φωτογραμμετρία	Μεσαία-Υψηλή (cm-m)	γρήγορη	Σχετικά χαμηλό	Μεσαία-Μεγάλη
Δορυφορική φωτογραμμετρία	Χαμηλή έως μεσαία (m)	Πολύ γρήγορη	Μικρό	Μεγάλη
InSAR	Χαμηλή (m)	Πολύ γρήγορη	Μικρό	Μεγάλη
Ρανταρογραμμετρία	Χαμηλή (m)	Πολύ γρήγορη	Μικρό	Μεγάλη
LIDAR	Υψηλή (cm)	Γρήγορη	Υψηλό	Μεσαία-Μεγάλη
Διανυσματοποίηση χαρτών	Σχετικά χαμηλή (m)	Αργή	Υψηλό	Ανεξάρτητη
Σάρωση χαρτών	Σχετικά χαμηλή (m)	Γρήγορη	Χαμηλό	Ανεξάρτητη

Πηγή: Διάλεξη Φωτογραμμετρίας II, 2013

Κεφάλαιο 3

ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΨΗΦΙΑΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ (GDEM)

Τα παγκόσμια ψηφιακά μοντέλα (GDEM), δημιουργήθηκαν τα τελευταία χρόνια, με στόχο να προσφέρουν τρισδιάστατη πληροφορία για το μεγαλύτερο ποσοστό έκτασης της γήινης επιφάνειας. Τα μοντέλα αυτά, ανάλογα με την ακρίβεια και την ποιότητά τους, παρέχουν σημαντικές πληροφορίες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα εφαρμογών. Δύο πολύ σημαντικές πηγές παγκόσμιων ψηφιακών μοντέλων είναι ο δορυφόρος ASTER και η αποστολή SRTM.

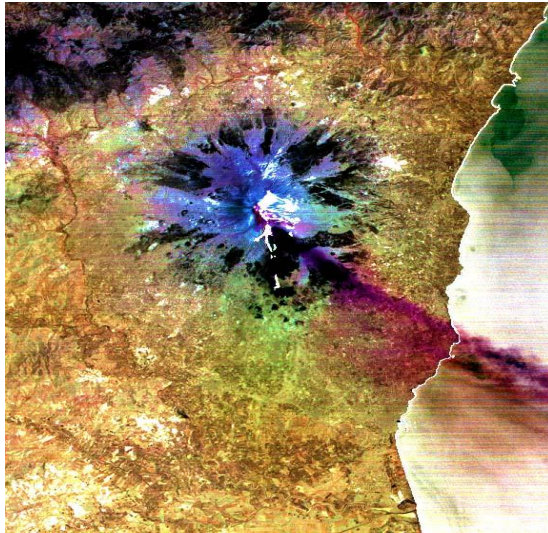
3.1 Δεδομένα ASTER

Ψηφιακά μοντέλα εδάφους προκύπτουν με χρήση δεδομένων του δέκτη ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection). Ο δέκτης αυτός δημιουργήθηκε σε συνεργασία της NASA και του Ιαπωνικού υπουργείου οικονομικού εμπορίου και βιομηχανίας (METI), με τη βοήθεια επιστημονικών συνεργατών τόσο στην Ιαπωνία όσο και στις ΗΠΑ.

Τα δεδομένα του δέκτη ASTER παρέχουν εικόνες υψηλής ανάλυσης, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 15 με 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 DEM, χάρη στην υψηλή ανάλυσή τους και στην ικανότητα του δέκτη να αλλάζει γωνίες παρακολούθησης της γήινης επιφάνειας. Τα δεδομένα του δέκτη χρησιμοποιούνται από άλλα διαστημικά όργανα όπως η διαστημική πλατφόρμα Terra, για βαθμονόμηση, αξιολόγηση και πιστοποίηση. Επίσης έχουν εφαρμογή σε πλήθος επιστημονικών τομέων και εφαρμογών, όπως είναι η υδρολογία, η γεωλογία, η παρακολούθηση ακραίων φαινομένων, ηφαιστείων, παγετώνων κ.α.

Ο ASTER είναι το μόνο όργανο του δορυφόρου Terra που παρέχει πολύ υψηλή ανάλυση, ενώ δε συλλέγει συνεχώς δεδομένα, παρά μόνο για 8 λεπτά κατά μέσο όρο σε κάθε τροχιά. Τα τρία τηλεσκόπια που έχει ο ASTER είναι συνεχώς προσανατολισμένα κάθετα στην τροχιά του δορυφόρου.

Ο ASTER παράγει δύο τύπους δεδομένων τύπου 1 (Level 1), τα L1A και L1B. Τα δεδομένα L1A είναι αυτά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υψηλής ακρίβειας ΨΜΕ, και μάλιστα χωρίς διορθώσεις από σημεία ελέγχου, καθώς περιέχουν στοιχεία της τροχιάς της πλατφόρμας και γεωμετρικές πληροφορίες του δέκτη.



Εικόνα 3.1-Το ηφαίστειο της Έτνα

Πηγή:

<http://asterweb.jpl.nasa.gov/gallery/images/etna-so2.jpg>



Εικόνα 3.2-Το δέλτα του Μισσισιπή

Πηγή:

<http://asterweb.jpl.nasa.gov/gallery/images/miss.jpg>

3.1.1 Ο δορυφόρος Terra

Ο δέκτης ASTER, μαζί με άλλα τέσσερα όργανα, είναι αισθητήρες οι οποίοι βρίσκονται στον δορυφόρο Terra. Ο δορυφόρος αυτός τέθηκε σε τροχιά γύρω από τη Γη το Δεκέμβριο του 1999 και άρχισε να στέλνει δεδομένα στη Γη το Φεβρουάριο του 2000.

Η τροχιά του δορυφόρου είναι ηλιοσύγχρονη με υψόμετρο 705km από την επιφάνεια της Γης, η κλίση της είναι ίση με 98.3° από τον Ισημερινό. Η περίοδος περιστροφής του δορυφόρου είναι 98.88 λεπτά, ενώ περνάει ξανά από το ίδιο σημείο κάθε 16 μέρες.

Τα υπόλοιπα τέσσερα όργανα που βρίσκονται μαζί με τον ASTER στο δορυφόρο Terra είναι τα: CERES (Clouds and Earth's Radiant Energy Systems), MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) και το MOPITT (Measurements Of Pollution In The Troposphere) (http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/image/ASTERGDEM_ValidationSummaryReport_Ver1.pdf).

3.1.2 Παραγωγή παγκόσμιων ψηφιακών μοντέλων εδάφους (GDEM)

Για την παραγωγή των GDEM εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος, τα βήματα του οποίου παρουσιάζονται στη συνέχεια. Μετά την εφαρμογή αυτού του αλγορίθμου απαιτείται διόρθωση γεωειδούς για την έκφραση των τυπικών υψομετρικών τιμών. Η διόρθωση αυτή είναι απαραίτητη λόγω του ότι τα υψόμετρα της διαδικασίας αυτής είναι εκφρασμένα με βάση ένα ελλειψοειδές. (Ξυνογαλάς, Σοϊλέ, 2012)

- Εισαγωγή των δεδομένων L1A.

- Εισαγωγή ενός βοηθητικού ΨΜΕ, του DEM GTOPO30 με βήμα 1km.
- Εφαρμογή συντελεστών ραδιομετρικής διόρθωσης στα δεδομένα των εικόνων.
- Δημιουργία δύο ειδών υποβαθμισμένων εικόνων για την ψηφιακή συνταύτιση, με συντελεστές υποβάθμισης $\frac{1}{4}$ και $\frac{1}{2}$.
- Εκτίμηση της δυνατότητας συνταύτισης εικόνων για κάθε παράθυρο συσχέτισης, καθώς και ορισμός του συντελεστή συσχέτισης. Σε αυτό το σημείο εξαιρούνται από τη διαδικασία σκηνές με ελλiptή δεδομένα και υδρολογικά στοιχεία.
- Πρώτη φάση συνταύτισης εικόνων με χρήση των υποβαθμισμένων εικόνων με συντελεστή $\frac{1}{4}$ και υπολογισμός της παράλλαξης.
- Δεύτερη φάση συνταύτισης εικόνων, με χρήση των υποβαθμισμένων εικόνων με συντελεστή $\frac{1}{2}$, και τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης. Υπολογίζεται ξανά η παράλλαξη.
- Τρίτη φάση συνταύτισης εικόνων, με χρήση των εικόνων πλήρους ανάλυσης και τα αποτελέσματα της δεύτερης φάσης. Το παράθυρο συσχέτισης έχει μέγεθος 9×9 στην πρώτη έκδοση και 5×5 στη δεύτερη. Να σημειωθεί ότι προηγείται της συνταύτισης η εξάλειψη των παραμορφώσεων των εικόνων λόγω σφαλμάτων του εδάφους.
- Υπολογισμός των τρισδιάστατων συντεταγμένων, X, Y, Z για κάθε σημείο του εδάφους ανά δύο εικονοστοιχεία των 30m το καθένα.
- Εξαγωγή των συντεταγμένων X, Y, Z, εκφρασμένες σε μορφή γεωκεντρικών συντεταγμένων.
- Δημιουργία υψομετρικών δεδομένων με βάση το ελλειψοειδές WGS84.
- Επανάληψη δειγματοληψίας των υψομετρικών δεδομένων στην επιλεγμένη χαρτογραφική προβολή.
- Εξαγωγή των τελικών υψομετρικών δεδομένων.

3.1.3 Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο GDEM V.1

Η NASA σε συνεργασία με την METI, εξέδωσαν το 2009 ένα παγκόσμιο DEM από εικόνες ASTER, οι οποίες είχαν συλλεχθεί από την αρχή της αποστολής, το 2000, μέχρι και τον Αύγουστο του 2008. Το GDEM εξήχθη από δορυφορικές εικόνες – περισσότερες από 1.2 εκατομμύρια - με ανάλυση 15m, με την εφαρμογή φωτογραμμετρικών τεχνικών. Το ψηφιακό αυτό μοντέλο GDEM, κάλυπτε χερσαία επιφάνεια από 83° βόρεια έως 83° νότια, με 22600 πινακίδες διαστάσεων $1^\circ \times 1^\circ$. Η ανάλυση του GDEM ήταν 1arc sec, δηλαδή περίπου 30m, ενώ χρησιμοποιήθηκε το σύστημα αναφοράς WGS84 και τα υψόμετρα αναφέρονταν στο μοντέλο γεωειδούς EGM96. Η ακρίβεια των υψομέτρων στα δεδομένα του Level 1A, ήταν για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, 20m, χωρίς όμως να έχουν χρησιμοποιηθεί σημεία ελέγχου για τη διόρθωση των μεμονωμένων σκηνών.

Παρόλα αυτά η έκδοση αυτή δε θεωρήθηκε από τη NASA αλλά και από τη METI πολύ ακριβής, καθώς περιείχε υπολειμματικές ανωμαλίες στα δεδομένα, με

αποτέλεσμα τον επηρεασμό της ποιότητας των προϊόντων, κάτι το οποίο τα έκανε ακατάλληλα για κάποιες εφαρμογές. Οι ανωμαλίες αυτές οφείλονταν στην κακή στερεοσκοπική επικάλυψη στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, στην κάλυψη από υδάτινες επιφάνειες, στην ύπαρξη νεφών κ.α.

3.1.4 Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο GDEM V.2

Την πρώτη έκδοση του GDEM ακολούθησε μια δεύτερη βελτιωμένη τον Οκτώβριο του 2011. Τα στοιχεία που συνέβαλαν στη βελτίωση αυτή ήταν η καλύτερη οριζοντιογραφική ανάλυση, η βελτιωμένη ανίχνευση των ορίων των υδάτινων μαζών, το μικρότερο μέγεθος του παράθυρου συσχέτισης της τάξης των 5x5 εικοστοιχείων για καλύτερη χωρική ανάλυση, η παράλληλη προσαρμογή των υψομέτρων - καθώς είχε ανιχνευθεί συστηματικό σφάλμα -5m στα υψόμετρα της πρώτης έκδοσης - και τέλος οι νέες, 260.000 εικόνες (σκηνές) ASTER, που συλλέχθηκαν μετά το 2008. Η ακρίβεια αυτής της έκδοσης για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, εκτιμήθηκε στα 17m.

Το GDEM που δημιουργήθηκε κάλυπτε περισσότερες περιοχές σε σχέση με αυτό της αποστολής SRTM (αναλυτικά στην ενότητα 3.2).

3.1.5 Έλεγχοι ακρίβειας GDEM

Έλεγχοι της ακρίβειας των ASTER GDEM και των δύο εκδόσεων, έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο, αλλά κυρίως σε Αμερική και Ιαπωνία από τους υπεύθυνους των εκδόσεων. Οι μέθοδοι που γενικά έχουν εφαρμοστεί είναι με χρήση σημείων από μετρήσεις GPS, με σημεία ελέγχου (GCP) και με σύγκριση με ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα αναφοράς τα οποία θεωρούνται ακριβείας.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η συνολική ακρίβεια για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% για την πρώτη έκδοση, εκτιμήθηκε στα 20m, ενώ η αντίστοιχη ακρίβεια της δεύτερης έκδοσης ήταν στα 17m. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε από τη NASA και από τη METI με τη δημιουργία μιας ομάδας αξιολόγησης. Ακολουθούν τα αποτελέσματα από τους ελέγχους των δύο εκδόσεων (http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/image/ASTERGDEM_ValidationSummaryReport_Ver1.pdf).

➤ GDEM V.1

Από την αξιολόγηση αυτής της έκδοσης, παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Οι υδάτινοι όγκοι δεν απεικονίζονται σωστά, και κυρίως οι λίμνες φαίνονται να έχουν διαφορετικές τιμές υψομέτρου αντί να είναι επίπεδες.
- Η ανάλυση στο έδαφος δεν είναι 30m αλλά χειρότερη.
- Το υψομετρικό σφάλμα, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, υπολογίστηκε περίπου 20m.
- Εντοπίστηκαν ανωμαλίες οι οποίες οφείλονταν στον αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των υψομέτρων του GDEM και στα

νέφη που υπήρχαν στις εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του. Οι ανωμαλίες αυτές αφαιρέθηκαν και αντικαταστάθηκαν από την τιμή -9999.

➤ GDEM V.2

Για τη δεύτερη έκδοση του GDEM, γίνεται μια περισσότερο αναλυτική περιγραφή των ελέγχων που πραγματοποιήθηκαν, για τον έλεγχο της ακρίβειας και ποιότητας τους. Το παγκόσμιο αυτό μοντέλο ελέγχθηκε με δεδομένα αναφοράς, τόσο στις ΗΠΑ, όσο και στην Ιαπωνία, με εθνικά υψομετρικά στοιχεία των δύο χωρών, με δεδομένα SRTM στην Αμερική και σε 20 πόλεις, με γεωδαιτικά στοιχεία του CONUS και τέλος με δορυφορικά υψομετρικά στοιχεία σε παγκόσμια κλίμακα. Πιο αναλυτικά οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν και από τις δύο χώρες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

• CONUS/USGS

Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιήθηκε στην Αμερική. Αρχικά το μοντέλο ελέγχθηκε με χρήση 18.207 σημείων, προερχόμενα από μετρήσεις GPS, κατανεμημένα σε όλες τις χώρες του CONUS. Με διγραμμική παρεμβολή υπολογίστηκαν τα υψόμετρα στο GDEM v.2 αλλά και στην πρώτη έκδοση και σε άλλα μοντέλα, στις θέσεις των σημείων ελέγχου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1-Αποτελέσματα ελέγχου ΨΜΕ με σημεία GPS

DEM	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation	RMSE	LE95
GDEM2	-137.37	64.80	-0.20	8.68	8.68	17.01
NED	-46.21	16.42	-0.33	1.81	1.84	3.61
SRTM	-28.67	28.58	0.73	3.95	4.01	7.86
GDEM1	-127.74	105.41	-3.69	8.58	9.34	18.31

Πηγή: ASTER GDEM Version 2-Validation results, 2011

Παρατηρείται ότι η έκδοση GDEM2 παρουσιάζει βελτίωση σε σχέση με την πρώτη, ενώ πολύ καλή απόδοση έχει και το ΨΜΕ SRTM.

Επίσης έγινε έλεγχος της συσχέτισης σφάλματος βάσει των χρήσεων γης, με χρήση δεδομένων Landsat (30m) του 2006. Τα αποτελέσματα αυτού του ελέγχου κατέδειξαν την ύπαρξη μεγάλων σφαλμάτων του GDEM v.2 σε περιοχές με αντικείμενα που βρίσκονται υψηλότερα από το έδαφος (δάση, πόλεις). Επίσης σε περιοχές με γυμνό έδαφος παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο βρίσκεται «χαμηλότερα» από αυτό.

Τέλος, έλεγχος πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ΨΜΕ αναφοράς (το τοπικό NED και το παγκόσμιο SRTM) και πάλι βάσει των χρήσεων γης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το GDEM v.2 βρίσκεται υψηλότερα από το NED σε περιοχές με βλάστηση και σε πόλεις, ενώ πλησιάζει αρκετά το SRTM. Σε περιοχές με γυμνό έδαφος το GDEM βρίσκεται χαμηλότερα και από τα δύο ΨΜΕ αναφοράς.

- JAPAN/ERSDAC

Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιήθηκε στην Ιαπωνία, με τη βοήθεια ενός DEM αναφοράς βήματος 10m της υπηρεσίας GSI, ενώ μελετήθηκε ένα τμήμα του GDEM v.2 τεσσάρων πινακίδων. Το εύρος των υψομετρικών διαφορών μεταξύ των δύο ΨΜΕ βρέθηκε -5.58 – 15.45m, ενώ η τυπική απόκλιση κυμαινόταν από 6.20 έως 16.19m.

Παράλληλα, ελέγχθηκε η ακρίβεια του μοντέλου με βάση τις χρήσεις γης (Πίνακας 3.2) με δεδομένα αναφοράς 100m του 2007. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέση τιμή των υψομετρικών διαφορών του GDEM v.2 με το DEM αναφοράς ήταν θετικό στην περίπτωση των περιοχών με βλάστηση.

Πίνακας 3.2-Στατιστικά μεγέθη GDEM v.2 ανά χρήσεις γης στην Ιαπωνία

Version 2	Mean	Peak	SD	RMSE
Rice Farm	-1.32	-0.74	5.91	6.06
Farm	-1.09	-1.23	8.50	8.57
Forest	+8.68	+7.98	13.26	15.85

Πηγή: ASTER GDEM Version 2-Validation results, 2011

Όσον αφορά στην οριζοντιογραφική ακρίβεια των τεσσάρων πινακίδων, διαπιστώθηκε μετάθεση με διεύθυνση Α-Δ της τάξης των 0.13arcsec και με διεύθυνση Β-Ν της τάξης των 0.19arcsec.

- GLOBAL/ICESAT

Η υπηρεσία GSFC της NASA, χρησιμοποιώντας δεδομένα του Geoscience Laser Altimeter System του διαστημικού φορέα Icesat, πραγματοποίησε ελέγχους του GDEM v.2, για 8 περιοχές σε όλο τον κόσμο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3-Στατιστικά μεγέθη υψομετρικών διαφορών GDEM ICESat

Area	N	Mean (m)	Median (m)	STD (m)	RMSE (m)	Min. (m)	Max. (m)
Africa	14661568	1.6	0.325	11.61	11.72	-267.0	1802.16
S. America	2283947	2.17	1.84	8.51	8.78	-376.38	1242.94
N. America	5410981	-2.11	-1.96	11.73	11.92	-514.4	2761.32
Australia	4349145	-2.83	-2.97	7.08	7.62	-122.49	168.23
New Zealand	16836	0.08	-0.028	8.89	8.89	-52.05	132.79
W. Europe	1714027	-2.77	-2.77	10.71	11.06	-339.45	2436.01
Eurasia	15264903	-1.60	-1.65	11.76	11.87	-496.43	2347.37
Greenland	4190411	235.70	109.04	535.00	584.62	-3606.7	4152.07

Πηγή: ASTER GDEM Version 2-Validation results, 2011

Όπως παρατηρείται οι μεγαλύτερες τιμές των στατιστικών μεγεθών εντοπίζονται στην περίπτωση της Γροιλανδίας.

- GLOBAL/NGA

Η υπηρεσία NGA, πραγματοποίησε ελέγχους στο GDEM v.2, σε 20 περιοχές παγκοσμίως, με τη βοήθεια δεδομένων αναφοράς από το SRTM DTED2, αλλά και στοιχείων των χωρών αυτών (Πίνακας 3.4 και Πίνακας 3.6), όπως σημειακή υψομετρική πληροφορία. Επιπλέον πραγματοποίησε ελέγχους οριζοντιογραφικής ακρίβειας (Πίνακας 3.7).

Πίνακας 3.4-Υψομετρικές διαφορές GDEM2 με το ΨΜΕ αναφοράς

Geographic Area	No. of Cells	Mean Elevation Difference ASTER DEM – Reference DEM			
		SRTM		Other Source	
		Mean (m)	90% L.E. (m)	Mean (m)	90% L.E. (m)
Afghanistan-1	8	-0.6	9.8	0.6 (a)	7.2
Afghanistan-2	9	-1.7	5.4	-0.9 (b)	3.7
Argentina	25	-5.2	6.5		
Australia	25	-4.7	7.9		
Bolivia	4	-10.9	8.1		
Bosnia	15	-4.0	9.1		
Canada	6			-14.0 (b)	16.2
China-1	25	-7.9	15.2		
China-2	25	-4.1	11.1		
Iraq	16	-5.0	6.3		
Kazakhstan	25	-5.5	6.8		
Korea	12	-6.0	10.8	0.0 (b)	14.9
Libya	4	0.0	11.0		
Nigeria	25	-13.3	4.7		
Philippines	2	-6.6	14.6		
Russia-1	2			-4.2 (b)	12.4
Russia-2	1			-11.7 (b)	29.4
Russia-3	20			-9.7 (c)	15.7
Thailand	10	-8.6	8.8		
U.S.A.-Alaska	25			-10.0 (c)	25.1

(a) Commercially-produced IFSAR DEM.

(b) Photogrammetrically-derived DTED[®] 2.

(c) Cartographic source DTED[®] 2; Alaska based on USGS NED.

Πηγή: ASTER GDEM Version 2-Validation results, 2011

Επιπλέον πραγματοποιήθηκε έλεγχος με σημεία ελέγχου, με δεδομένα των είκοσι χωρών, ελέγχοντας και τα ΨΜΕ αναφοράς.

Πίνακας 3.5-Στατιστικά μεγέθη ελέγχου GDEM2 και ΨΜΕ αναφοράς με σημεία ελέγχου

Geographic Area	No. of Cells	No. of GCPs	Mean Elevation Difference DEM-GCP					
			ASTER		SRTM		OTHER	
			Mean (m)	90% L.E. (m)	Mean (m)	90% L.E. (m)	Mean (m)	90% L.E. (m)
Afghanistan-1	8	677	-1.2	17.4	0.0	8.8	-1.0 (a)	4.9
Afghanistan-2	9	2506	-2.5	10.8	-0.1	5.7	0.7 (b)	4.7
Argentina	25	1950	-2.5	11.5	3.1	6.6		
Australia	25	2821	-0.4	12.9	2.1	6.3		
Bolivia	4	79	-1.8	10.0 (e)	11.5	15.0 (e)	-1.9 (b)	4.2
Bosnia	15	4853	-5.0	17.9	-0.7	8.0 (e)	-1.7 (b)	9.2
Canada	6	16	-15.9	33.6			-1.2 (b)	11.4
China-1	25	3774	-5.2	22.6	2.3	6.1		
China-2	25	4823	-5.1	20.0	-0.1	8.8		
Iraq	16	5653	-5.8	13.3	0.3	6.1	-0.1 (b)	5.4
Kazakhstan	25	2118	-7.9	15.5 (e)	-2.6	6.1		
Korea	12	7190	-3.0	18.9	2.3	10.2	-0.8 (b)	8.2
Libya	4	868	-0.3	14.5 (e)	0.0	8.0 (e)	0.2 (c)	8.6
Nigeria	25	2384	-11.1	16.5 (e)	2.4	5.6		
Philippines	2	848	-4.2	25.0 (e)	1.4	11.0 (e)		
Russia-1	2	128	-16.5	33.9			-1.3 (b)	5.9
Russia-2	1	43	-11.8	26.9			1.8 (b)	5.5
Russia-3	20	1214	-12.0	24.7			-1.6 (d)	7.5
Thailand	10	2640	-5.7	17.4	2.3	8.5		
U.S.A.-Alaska	25	2000	-8.9	24.1			2.1 (d)	23.9

(a) IFSAR DEM.

(b) Photogrammetrically-derived DTED[®] 2.(c) SPOT 5 DTED[®] 2.(d) Cartographic source DTED[®] 2.

(e) 90% error taken directly from frequency distribution plot of the absolute value of (DEM-GCP) in cases where the distribution did not appear to be approximately normal. In all other cases, 90% figures are computed by multiplying the calculated standard deviation of the differences by 1.6449.

Πηγή: ASTER GDEM Version 2-Validation results, 2011

Πίνακας 3.6-Στατιστικά στοιχεία υψομετρικών διαφορών των δύο εκδόσεων GDEM με δεδομένα αναφοράς DTED2 σε 20 περιοχές

	In meters	Difference	STD	Median	Max	Min
GDEM1	AVERAGE	-6.087	8.673	-14.365	180.765	-215.77
	MIN	-15.488	1.282	-140	14	-900
	MAX	2.535	22.171	2	2333	-32
GDEM2	AVERAGE	-1.572	8.826	-9.004	127.465	-161.05
	MIN	-10.620	1.065	-132	23	-763
	MAX	9.036	20.204	6	425	-32

Πηγή: ASTER GDEM Version 2-Validation results, 2011

Πίνακας 3.7-Οριζοντιογραφική ακρίβεια των δύο εκδόσεων συγκριτικά με το DTED2 (arcsec)

	(in arc-seconds)	E-W Shift	N-S Shift	Horizontal shift magnitude
GDEM1	AVERAGE	0.0759	0.187	0.616
	MINIMUM	0	0	0
	MAXIMUM	1.333	0.777	2.236
GDEM2	AVERAGE	0.104	-0.175	0.601
	MINIMUM	0	0	0
	MAXIMUM	1.0877	1.00	2.37

Πηγή: ASTER GDEM Version 2-Validation results, 2011

Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο του GDEM2 έδειξαν συνοπτικά τα εξής:

- Τα περισσότερα κενά και ανωμαλίες που υπήρχαν στην πρώτη έκδοση εξαλείφθηκαν.
- Όλες οι λίμνες εμφανίζονται επίπεδες.
- Βελτίωση του συνολικού μέσου σφάλματος και RMSE.
- Μείωση των υψομετρικών σφαλμάτων σε σχέση με την πρώτη έκδοση του συστηματικού τμήματος του υφιστάμενου σφάλματος.
- Το GDEM2 βρίσκεται 4m ψηλότερα από το GDEM1.
- Η δεύτερη έκδοση επηρεάστηκε από στοιχεία που βρίσκονται πάνω από το έδαφος, όπως είναι η βλάστηση.
- Παρουσιάζει μεγάλα σφάλματα στην περιοχή της Γροιλανδίας.

Στον Πίνακα 3.8 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από τον έλεγχο των δύο εκδόσεων, από την αξιολόγηση της Ιαπωνικής ομάδας.

Πίνακας 3.8-Αποτελέσματα αξιολόγησης των δύο εκδόσεων από την Ιαπωνική μελέτη.

			Version 1	Version 2
Horizontal Error			0.82 arc-sec. to west 0.47 arc-sec. to south	0.13 arc-sec. to west 0.19 arc-sec. to north
Elevation Error	Flat and open area (rice farm)	offset	-4.8 m	-0.7 m
		SD	6.2 m	5.9 m
		RMSE	-	6.1 m
	Mountainous area largely covered by forest	offset	+2.2 m	+7.4 m
		SD	15.4 m	12.7 m
		RMSE	-	15.1 m
Horizontal Resolution			3.8 arc-sec. (114m*)	2.4 arc-sec. (72m*)

Πηγή: ASTER GDEM Version 2-Validation results, 2011

3.2 Δεδομένα Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

Η αποστολή SRTM, βασιζόμενη στην τεχνολογία της συμβολομετρίας συνθετικού ανοίγματος (InSAR), συνέβαλε στη δημιουργία ενός παγκόσμιου DEM, το οποίο θεωρείται ότι είναι το πληρέστερο μέχρι σήμερα. Η αποστολή αυτή πραγματοποιήθηκε το Φεβρουάριο του 2000 και έγινε με τη συνεργασία της NASA, του National Geospatial-Intelligence Agency και της Γερμανικής και Ιταλικής διαστημικής υπηρεσίας.

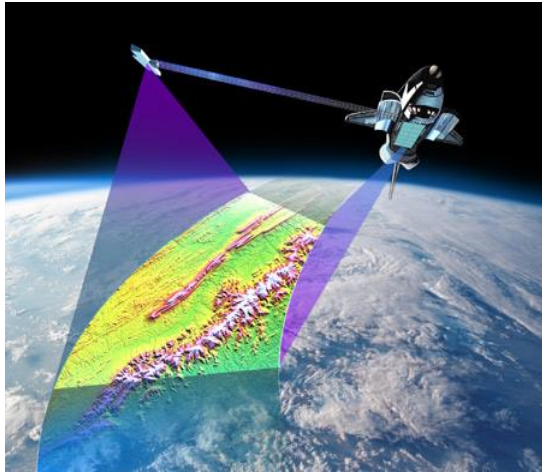
Το DEM SRTM καλύπτει περισσότερο από το 80% της γήινης επιφάνειας μεταξύ των 60° γεωγραφικού πλάτους βόρεια έως των 56° νότια, ενώ τα δεδομένα για τη δημιουργία του ήταν συμβολομετρικά και η ανάλυσή τους ήταν της τάξης των 3 arc-sec, δηλαδή περίπου 90m για την περισσότερη έκταση, ενώ για τις ΗΠΑ ήταν της τάξης του 1 arc-sec, δηλαδή περίπου 30m.

3.2.1 Η αποστολή

Η αποστολή διήρκησε 10 ημέρες και σε αυτή συμμετείχε το διαστημικό λεωφορείο Endeavour. Στο διαστημικό λεωφορείο υπήρχαν δύο κεραίες, η μια λειτουργούσε στην C-band με μήκος κύματος 6.5cm και η άλλη στη X-band, με μήκος κύματος 3.1cm. Ο στόχος του C-RADAR ήταν η παραγωγή συνεχόμενης χαρτογραφικής κάλυψης, ενώ του X-RADAR ήταν η απόκτηση δεδομένων κατά μήκος λωρίδων πλάτους 50km, οι οποίες προσέφεραν συνεχή κάλυψη στα υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη.

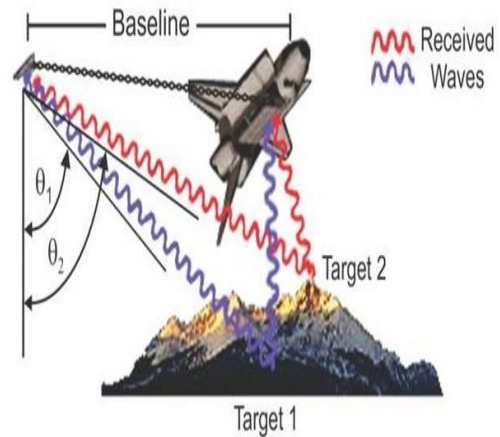
Το C-RADAR μειονεκτούσε ως προς το X, καθώς το δεύτερο προσέφερε καλύτερο λόγο του σήματος προς τον θόρυβο και επίσης παρείχε υψηλότερη ανάλυση δεδομένων. Μάλιστα λειτουργούσε και ανεξάρτητα ώστε να καλύπτει τυχόν προβλήματα που προέκυπταν από το C. Πάνω από το 99.96% των συνολικών δεδομένων καταγράφηκαν τουλάχιστον μια φορά από το C-RADAR, ενώ το X-RADAR κατέγραψε το 40% της συνολικής περιοχής. Το πρόβλημα που προέκυψε ήταν η απώλεια 10 τροχιών με αποτέλεσμα τη δημιουργία κενών, λόγω της μη καταγραφής, στην περιοχή της Β. Αμερικής.

Τα δεδομένα από το X-RADAR χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του χάρτη της ανάλυσης του 1 arc-sec, ενώ τα δεδομένα του C-RADAR, για τη δημιουργία DEM χαμηλότερης ανάλυσης το οποίο όμως κάλυπτε όλη την γήινη επιφάνεια.



Εικόνα 3.3-Αποστολή SRTM.

Πηγή: http://courses.wlu.edu/%5C2011_12_WINTER-GEOL_260_01/public_html/VelascoCastedor12/remensing.htm

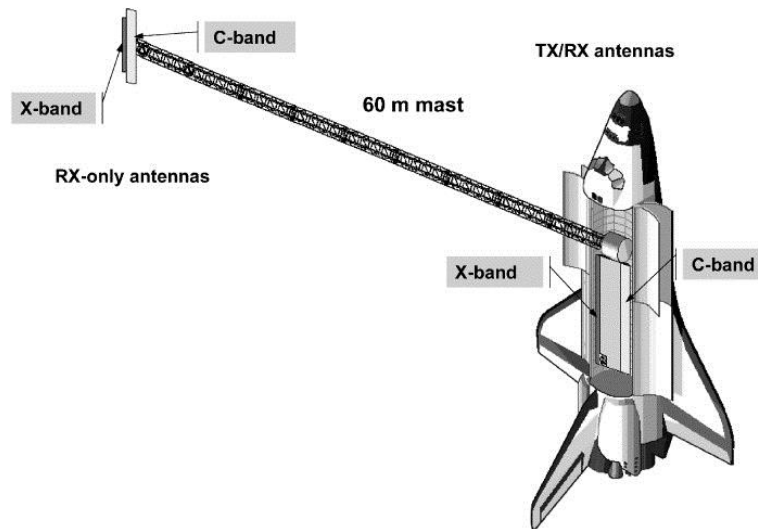


Εικόνα 3.4-Γεωμετρία SRTM.

Πηγή: <http://what-when-how.com/remote-sensing-from-air-and-space/radar-interferometry-radar-and-lidar-remote-sensing/>

Η μέθοδος συμβολομετρίας που εφαρμόστηκε ήταν η κατά μήκος, καθώς η επαναληπτική που χρησιμοποιείτο για αρκετά χρόνια δεν έδινε ικανοποιητικά αποτελέσματα και η ποιότητα των DEM δεν ήταν η κατάλληλη, ενώ δημιουργούσε επίσης προβλήματα στις αυτοματοποιημένες διαδικασίες. Η δεύτερη κεραία, η οποία λειτουργούσε σαν δέκτης, τοποθετήθηκε στην άκρη ενός αναδιπλούμενου ιστού μήκους 60m. Το σύστημα που δημιουργήθηκε σάρωνε για κάθε τροχιά, λωρίδα πλάτους 225 χιλιομέτρων, και μπορούσε να χαρτογραφήσει όλη την περιοχή σε έναν κύκλο 159 τροχιών.

Το μήκος της βάσης ήταν σταθερό και ίσο με 60m και αυτό λόγω του ότι ο θόρυβος στον προσδιορισμό του ύψους ήταν στο χαμηλότερο επίπεδο με αυτό το μήκος. Επίσης ο προσανατολισμός της βάσης ήταν στις 45° , κάτι το οποίο μείωνε την ευαισθησία της παρατήρησης των σφαλμάτων στο μήκος της βάσης και τέλος, για τη μείωση της υπέρθεσης, η γωνία πρόσπτωσης (look angle) της ακτινοβολίας του radar ήταν 30° - 60° .



Εικόνα 3.5-Τα βασικά μέρη του διαστημικού λεωφορείου.

Πηγή: Rabus et Eineder, 2003

3.2.2 Προδιαγραφές ακρίβειας δεδομένων

Όσον αφορά τις απαιτήσεις των σφαλμάτων των δεδομένων του 1 arc-sec και για επίπεδο εμπιστοσύνης 90% αυτές ήταν:

- το απόλυτο γραμμικό υψομετρικό σφάλμα να είναι μικρότερο των 16m (LE90)
- το αντίστοιχο σχετικό σφάλμα να είναι μικρότερο των 10m
- το απόλυτο κυκλικό γεωγραφικό σφάλμα να είναι μικρότερο των 20m (CE90)
- το αντίστοιχο σχετικό σφάλμα να είναι μικρότερο των 15m.

Το σύστημα αναφοράς των δεδομένων ήταν το WGS'84.

3.2.3 Πηγές σφαλμάτων

Τα σφάλματα των δεδομένων της αποστολής SRTM, είναι συμβολομετρικά και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Τα στατικά τα οποία θεωρούνται σταθερά κατά τη συλλογή των δεδομένων. Μάλιστα για το λόγο αυτό μπορούν να προσδιοριστούν με τη βοήθεια σημείων-στόχων γνωστής οριζοντιογραφικής θέσης και υψομέτρου.
- Τα σφάλματα που μεταβάλλονται στο χρόνο και τα οποία δημιουργούνται από την κίνηση του ιστού και την αλλαγή της διεύθυνσης του συστήματος εκπομπής της δέσμης. Τα σφάλματα αυτά μπορούν να βελτιωθούν σε ένα βαθμό, από τη δυναμική βαθμονόμηση και τη συνόρθωση ελαχίστων τετραγώνων.

Πιο αναλυτικά, τα σφάλματα στα δεδομένα SRTM είναι:

- Σφάλματα περιστροφής της βάσης (Baseline roll errors)

Μπορούν να προκαλέσουν συστηματικό σφάλμα στον προσδιορισμό του υψομέτρου. Αυτό οφείλεται στη λανθασμένη γνώση της γωνίας περιστροφής της βάσης με αποτέλεσμα τη δημιουργία σφάλματος στην κλίση και κάθετα στην τροχιά. Συγκεκριμένα, οι κινήσεις της βάσης προκύπτουν από τη φυσική ταλάντωση του ιστού, οι οποίες όμως μπορούν να μοντελοποιηθούν και να αφαιρεθούν, ενώ η θέση της επηρεάζεται από τους ελιγμούς του διαστημικού λεωφορείου. Τα μέγιστα εναπομείναντα σφάλματα υπολογίζονται στα 10m.

➤ *Σφάλματα φάσης (Phase errors)*

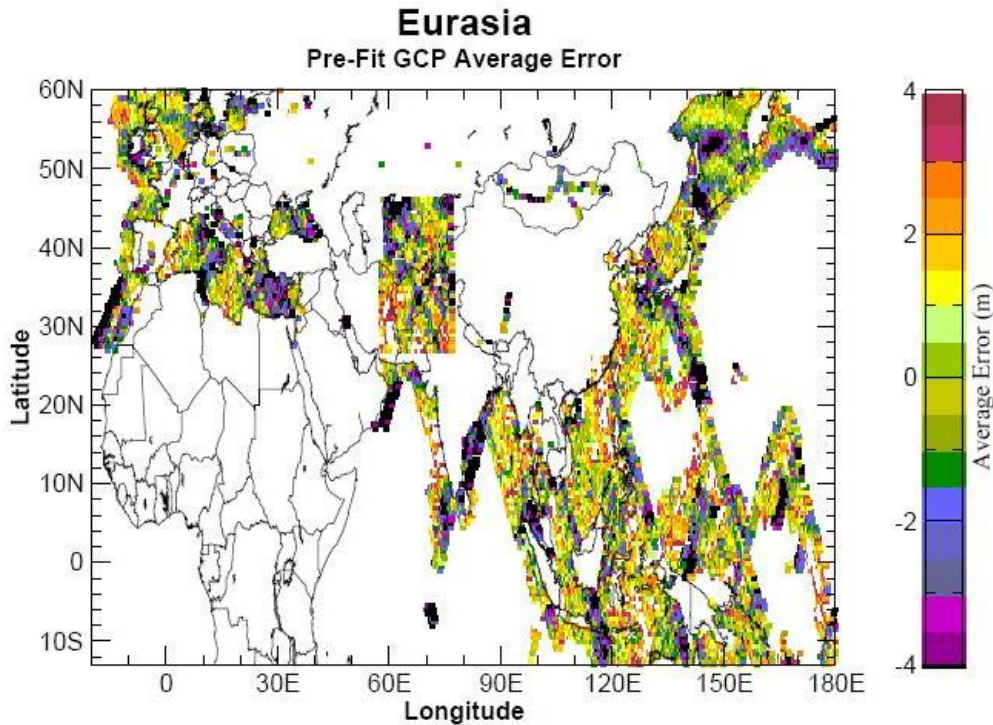
Τα σφάλματα αυτά οφείλονται κυρίως σε δύο παράγοντες, στο θερμικό ή διαφορικό θόρυβο του στίγματος και στις συστηματικές διαφορές φάσης, λόγω των αναντιστοιχιών των κεραιών. Το αποτέλεσμα αυτού του θορύβου είναι η δημιουργία τυχαίων σφαλμάτων στην εκτίμηση των υψομέτρων τα οποία δεν παρουσιάζουν μεγάλη χωρική συσχέτιση και δεν μπορούν να βελτιωθούν από εργασίες εδάφους. Η αιτία δημιουργίας των συστηματικών σφαλμάτων φάσης είναι η διαφορά των χαρακτηριστικών φάσης κάθε κεραιάς σε κάθε κανάλι. Τα σφάλματα αυτά μπορούν να εκτιμηθούν από δεδομένα SRTM, τα οποία συλλέγονται πριν και μετά από κάθε διέλευση του λεωφορείου από ηπείρους αλλά και από ωκεανούς. Η διόρθωση της φάσης δεν επέφερε ριζικά αποτελέσματα κατά τη διάρκεια της αποστολής, καθώς η εκτιμώμενη διόρθωση στα υψόμετρα ήταν της τάξης των 10cm. Τα σφάλματα που απομένουν μετά την αφαίρεσή τους, δημιουργούν κλίσεις κάθετες στην τροχιά, οι οποίες όμως είναι ανεπαίσθητες, λόγω των σφαλμάτων που έχουν μείνει από την περιστροφή της βάσης.

➤ *Σφάλματα λόγω της απόκλισης της δέσμης (Beam differential errors):*

Η αποστολή σχεδιάστηκε ώστε όλες οι δέσμες να αλληλεπικαλύπτονται. Όμως στα τμήματα της αλληλοεπικάλυψης υπήρχαν συστηματικές διαφορές φάσης οι οποίες δημιούργησαν σφάλματα στα υψόμετρα. Οι διαφορές αυτές μεταβάλλονταν συναρτήσει του χρόνου καθώς οι γωνίες διεύθυνσης της δέσμης άλλαζαν ανάλογα με την τοπογραφία ώστε να διατηρήσουν το πλάτος της λωρίδας. Αυτό διορθώθηκε με χρήση των υψομετρικών διαφορών στις επικαλύψεις, ώστε να εκτιμηθεί η μετατόπιση της φάσης και να εφαρμοστεί στα δεδομένα, με αποτέλεσμα όλες οι δέσμες τελικά να έχουν σταθερό σφάλμα φάσης. Το εναπομείναν σφάλμα εξαιτίας της διαφοράς φάσης θεωρήθηκε αμελητέο, καθώς ήταν μικρότερο των 10cm.

➤ *Χρονικά σφάλματα και σφάλματα θέσης (Timing and position errors)*

Τα σφάλματα αυτά προκύπτουν είτε από καθυστερήσεις του συστήματος είτε από σφάλματα κατά την εκτίμηση της θέσης της βάσης. Προσδιορίζονται με χρήση στόχων με γνωστή οριζοντιογραφική θέση, που μπορούν να εντοπιστούν σε εικόνες radar (π.χ. ανακλαστήρες) ή μέσω διατομών του εδάφους που έχουν προκύψει από κινηματικό εντοπισμό.



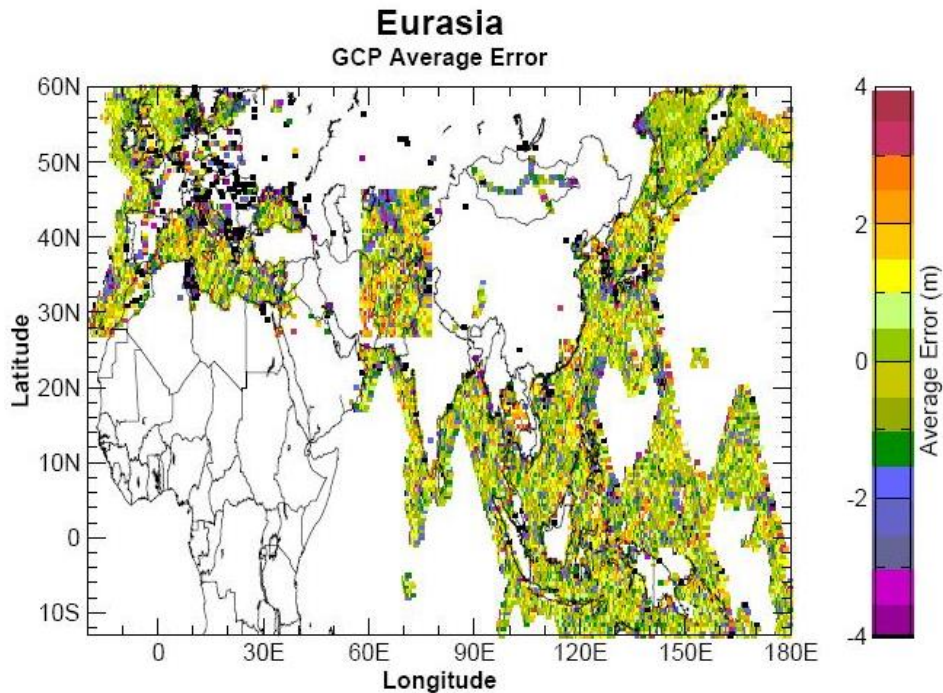
Εικόνα 3.6-Υψομετρικά σφάλματα σημείων ελέγχου σε θάλασσα και ηπειρωτικό έδαφος πριν την εφαρμογή των διορθώσεων.

Πηγή: Rodriguez et al., 2005

3.2.4 Εξάλειψη των σφαλμάτων

Τα σφάλματα που περιγράφηκαν προηγουμένως μπορούν να αντιμετωπιστούν με τους εξής τρόπους:

- *Κατά μήκος βαθμονόμηση:* εκτιμάται η ασυνέχεια των υψομέτρων δέσμη προς δέσμη.
- *Δυναμική βαθμονόμηση:* με τη βοήθεια της τοπογραφίας στους ωκεανούς, αλλά και με γνώση των δυναμικών τους φαινομένων, όπως είναι οι παλίρροιες, εκτιμώνται οι στατικές και οι χρονικά μεταβαλλόμενες διαφορές φάσης, τα σφάλματα λόγω περιστροφής της βάσης ενώ δημιουργούνται και σημεία ελέγχου (GCP) για τους ωκεανούς.
- *Συνόρθωση ελαχίστων τετραγώνων:* με αυτή τη μέθοδο εφαρμόζεται σε κάθε ήπειρο συνόρθωση σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων, με τη χρήση δεδομένων βαθμονόμησης, σε συνδυασμό με σημεία γνωστών συντεταγμένων, με στόχο τη μείωση των εναπομεινάντων υψομετρικών σφαλμάτων. Με αυτή τη διόρθωση εκτιμώνται τα σφάλματα φάσης του συστήματος και μέσω αυτών διορθώνονται η θέση και το υψόμετρο των δεδομένων. Για την εφαρμογή της συνόρθωσης, γίνεται χρήση ενός μοντέλου σφαλμάτων του αισθητήρα, με στόχο τη μείωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σφάλματος. Τα σφάλματα αυτά είναι μεγαλύτερα στις ηπείρους, λόγω έλλειψης σημείων ελέγχου σε αυτές.



Εικόνα 3.7- Υψομετρικά σφάλματα σημείων ελέγχου σε θάλασσα και ηπειρωτικό έδαφος μετά την εφαρμογή των διορθώσεων.

Πηγή: Rodriguez et al., 2005

3.2.5 Υπολογισμός υψομετρικών σφαλμάτων

Ο υπολογισμός του απόλυτου υψομετρικού σφάλματος στην ξηρά, έγινε κυρίως με τη βοήθεια δεδομένων κινηματικού εντοπισμού με GPS, καθώς δεν υπήρχαν σε παγκόσμιο επίπεδο δεδομένα υψηλής ακρίβειας, ενώ επιπλέον εντοπίστηκαν σημαντικές αβεβαιότητες σε σημεία ελέγχου (GCP).

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η κατανομή των υψομετρικών σφαλμάτων ανά ήπειρο, και από αυτή προέκυψαν το σχετικό και απόλυτο σφάλμα για επίπεδο εμπιστοσύνης 90% (Πίνακας 3.9).

Έπειτα έγινε προσπάθεια διαχωρισμού του τυχαίου σφάλματος, με χρήση του μέσου όρου των σφαλμάτων που προέκυψαν από τον κινηματικό εντοπισμό. Το τυχαίο σφάλμα υπολογίστηκε μέσω της συμβολομετρικής συσχέτισης. Επιλέχθηκε μέγεθος κελιού ίσο με $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ως κατάλληλη διάσταση.

Πίνακας 3.9-Υψομετρικά σφάλματα SRTM σε μέτρα από τον έλεγχο με υψομετρικά σημεία, για επίπεδο εμπιστοσύνης 90%.

	Africa	Australia	Eurasia	Islands	N. America	S. America
Absolute Geolocation Error	11.9	7.2	8.8	9.0	12.6	9.0
Absolute Height Error	5.6	6.0	6.2	8.0	9.0	6.2
Relative Height Error	9.8	4.7	8.7	6.2	7.0	5.5

Πηγή: Rodriguez et al., 2005

3.2.6 Έλεγχος δεδομένων SRTM

Για τον έλεγχο των δεδομένων SRTM, αυτά συγκρίθηκαν με δεδομένα γνωστού υψομέτρου, προερχόμενα από άλλες πηγές. Οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν είναι οι εξής (Rodriguez et al., 2005):

- Με δεδομένα κινηματικού εντοπισμού GPS

Θεωρείται η περισσότερο ακριβής μέθοδος ελέγχου των δεδομένων. Οι μετρήσεις για την παραγωγή σημείων ελέγχου, έγιναν κατά μήκος οδικών αξόνων με αυτοκίνητο και η κατανομή τους είναι τέτοια ώστε να καλύπτουν όσο το δυνατό καλύτερα την έκταση κάθε ηπείρου. Το μειονέκτημα είναι ότι οι μετρήσεις έγιναν σε σχετικά ομαλό έδαφος με αποτέλεσμα να μην περιγράφουν επαρκώς το ανάγλυφο.

Τα βασικά στατιστικά αποτελέσματα από τον έλεγχο αυτό για κάθε ήπειρο παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.10.

Πίνακας 3.10-Στατιστικά μεγέθη των υψομετρικών διαφορών μεταξύ SRTM και σημείων GPS, για κάθε ήπειρο σε μέτρα.

Continent	Mean	Standard Deviation	90% Absolute Error
Africa	1.3	3.8	6.0
Australia	1.8	3.5	6.0
Eurasia	-0.7	3.7	6.6
North America	0.1	4.0	6.5
New Zealand	1.4	5.9	10.0
South America	1.7	4.1	7.5

Πηγή: Rodriguez et al., 2005

Γενικά παρατηρείται σταθερή συμπεριφορά των μεγεθών, εκτός από την περίπτωση της Ν. Ζηλανδίας, κάτι το οποίο όμως εξηγείται από το έντονο ανάγλυφο και το μικρό αριθμό σημείων.

- Με ψηφιακά υψομετρικά δεδομένα εδάφους (DTED) Level 2

Τα ψηφιακά υψομετρικά δεδομένα εδάφους (DTED), είναι δεδομένα μέτριας ανάλυσης που συλλέχθηκαν πρώτη φορά τη δεκαετία του '70 από την υπηρεσία NGA (National Geospatial-Intelligence Agency). Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν σε πολλές εφαρμογές, αρχικά για στρατιωτικούς σκοπούς και στη συνέχεια για την υποστήριξη αποστολών radar και την προσομοίωσή τους, για τρισδιάστατες οπτικοποιήσεις, για προσομοιώσεις πτήσεων, προγραμματισμό αποστολών κ.α.

Η ανάλυση των δεδομένων αυτών για το Level 2 είναι της τάξης των 30m.

Πίνακας 3.11-Στατιστικά μεγέθη της σύγκρισης των δεδομένων SRTM με τα δεδομένα DTED σε μέτρα.

Continent	Average	Median	90% Diff	STD	RMS
Africa	2.44	2.30	8.80	4.68	5.53
Eurasia	-0.07	-0.09	8.07	4.50	5.36
N.America	1.38	1.40	7.67	4.01	4.88
S.America	11.36	11.20	16.88	4.60	12.77

Πηγή: Rodriguez et al., 2005

Η σύγκριση των δεδομένων SRTM με τα δεδομένα DTED, για όλη την έκταση των ηπειρωτικών περιοχών, έδωσε τα στατιστικά αποτελέσματα για τις διαφορές των υψομέτρων τους που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.11.

Όπως παρατηρείται, τα στατιστικά μεγέθη παρουσιάζουν σταθερότητα, εκτός από την περίπτωση της Ν. Αμερικής. Επίσης παρατηρήθηκε ότι οι μεγάλες διαφορές οφείλονται στη μετατόπιση μεταξύ των δύο ομάδων δεδομένων, ενώ το σφάλμα θεωρείται ότι οφείλεται στα δεδομένα DTED και όχι σε αυτά του SRTM, καθώς τα δεύτερα έχουν συνορθωθεί στις επιφάνειες των ωκεανών και δεν παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά από τα σημεία GPS. Τέλος, εντοπίστηκε ότι το μεγαλύτερο σφάλμα παρουσιάζεται σε περιοχές με μεγάλη κλίση κάτι το οποίο πιθανολογείται ότι σχετίζεται με τη μειωμένη ακρίβεια των δεδομένων SRTM σε αυτές (Rodriguez et al., 2005).

➤ *Με σύνολα δεδομένων με υψομετρική πληροφορία (Height Patch)*

Ο έλεγχος που πραγματοποιήθηκε με αυτό το σύνολο δεδομένων, δεν έδειξε συστηματική μετατόπιση μεταξύ των συνόλων, παρόλα αυτά το 90% των σφαλμάτων ήταν μεγαλύτερο από τους δύο προηγούμενους ελέγχους.

Πίνακας 3.12-Στατιστικά μεγέθη της σύγκρισης των δεδομένων SRTM με αυτά των Height Patches.

Continent	Min	Max	Average	Median	90% Diff	STD	RMS
Africa	-39.79	42.13	4.13	3.31	10.15	4.26	7.63
Australia	-25.28	21.73	2.10	2.25	7.67	3.44	5.04
Eurasia	-40.17	36.44	-1.79	-1.36	12.48	5.99	8.28
N.America	-40.01	38.79	-0.61	-0.54	9.99	4.86	6.74

Πηγή: Rodriguez et al., 2005

Με περαιτέρω διεργασίες παρατηρήθηκε ότι ένα μεγάλο μέρος των αποκλίσεων οφείλεται σε συστηματικές μετατοπίσεις των δύο συνόλων. Οι μετατοπίσεις αυτές έχουν την τάση να διαφοροποιούνται σε κάθε ήπειρο, στοιχείο που υποδηλώνει ότι η διακύμανση αυτή οφείλεται σε σφάλματα των υψομέτρων που έχουν δοθεί στα συγκεκριμένα σύνολα δεδομένων (patches).

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι αντιστοιχες μελέτες για τον έλεγχο των ΨΜΕ SRTM, έχουν γίνει και σε περιοχές της Ελλάδας. Οι έλεγχοι

πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ως δεδομένα αναφοράς σημεία γνωστού υψομέτρου και το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. Τα αποτελέσματα των ελέγχων, τόσο μεμονομένα για την Ελλάδα όσο και σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των ελέγχων που έχουν πραγματοποιηθεί για την πιστοποίηση του προϊόντος έδειξαν συνοπτικά τα εξής (Ξυνογαλάς, Σοϊλέ, 2012):

- Το ΨΜΕ SRTM βρίσκεται χαμηλότερα (υποεκτίμηση υψομέτρων) σε σχέση με τα υψόμετρα αναφοράς, παρουσιάζοντας όμως μικρότερες διαφορές σε σχέση με το ΨΜΕ ASTER.
- Οι μέσες υψομετρικές διαφορές στην Ελλάδα συνάδουν με τις αντίστοιχες της Ευρασίας από την αξιολόγηση του προϊόντος στην περίπτωση των υψομετρικών δεδομένων, ενώ παρουσιάζουν διαφορά του 1m συγκριτικά με τα δεδομένα του DTED2. Επιπλέον, στην περίπτωση των ελέγχων raster-to-raster, η τυπική απόκλιση και το RMS σφάλμα παρουσιάζουν απόκλιση 2m σε σχέση με τα αποτελέσματα της Ευρασίας, ενώ στην περίπτωση του ελέγχου με σύνολα υψομετρικών δεδομένων η διαφορά κυμαίνεται στο 1m.
- Στην περίπτωση των ελέγχων για την τεκμηρίωση του προϊόντος με σημεία GPS και Height patches, η τιμή του RMS σφάλματος βρίσκεται στα ίδια επίπεδα με τον έλεγχο που πραγματοποιήθηκε στη χώρα με φωτοσταθερά σημεία.
- Τέλος, ο έλεγχος με τριγωνομετρικά σημεία στον ελλαδικό χώρο είχε τη μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με τον έλεγχο του ΨΜΕ με σκοπό την τεκμηρίωσή του.

Κεφάλαιο 4

ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στις μεθόδους που εφαρμόζονται για τον έλεγχο της ακρίβειας και ποιότητας των ΨΜΕ. Αρχικά παρουσιάζονται τα σφάλματα των ψηφιακών μοντέλων εδάφους, στη συνέχεια οι συνιστώσες ελέγχου και τέλος γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση των συνηθέστερων μεθόδων που εφαρμόζονται για την εκτίμηση της ποιότητας και της ακρίβειας των μοντέλων αυτών.

4.1 Σφάλματα Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους

Γενικά για ένα συγκεκριμένο σημείο, ως σφάλμα ορίζεται η διαφορά μετρημένης και αληθούς τιμής. Τα σφάλματα γενικά, αλλά και συγκεκριμένα για τα ΨΜΕ, είναι τριών ειδών:

- Τα τυχαία σφάλματα που ακολουθούν στις περισσότερες περιπτώσεις κανονική κατανομή και παρουσιάζονται σε όλες τις μετρήσεις.
- Τα συστηματικά σφάλματα, τα οποία μπορούν να μοντελοποιηθούν μαθηματικά και σχετίζονται με τη λανθασμένη ή ημιτελή βαθμονόμηση των οργάνων με τα οποία γίνονται οι μετρήσεις, τις ενδεχόμενες ατέλειές τους, τις καιρικές συνθήκες κ.α. Τα συστηματικά σφάλματα δεν μπορούν να εντοπιστούν αν οι μετρήσεις γίνονται με το ίδιο σύστημα «όργανο – παρατηρητής – συνθήκες».
- Τα χονδροειδή σφάλματα, τα οποία δεν μπορούν να προβλεφθούν, όπως και τα τυχαία, και εμφανίζονται σε κάποιες παρατηρήσεις, ενώ γίνονται αντιληπτά από το πολύ μεγάλο μέγεθός τους.

Τα χονδροειδή και συστηματικά σφάλματα συνήθως είναι τα πρώτα που εξαλείφονται από τον έλεγχο που πραγματοποιείται. Παρόλα αυτά παραμένει ένα μικρό ποσοστό συστηματικών σφαλμάτων μαζί με τα τυχαία. Τα εναπομείναντα αυτά σφάλματα αντιμετωπίζονται από κοινού με στατιστικά μοντέλα (Αγατζά – Μπαλοδήμου, 2009).

Τα σφάλματα των ΨΜΕ σχετίζονται με την ακρίβεια και την πυκνότητα των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί, τη μορφολογία του εδάφους και τη μέθοδο παρεμβολής που εφαρμόστηκε για την παραγωγή τους (Hu et al, 2009; Karel et al, 2006). Αν και γενικά η θεωρία της μετάδοσης σφαλμάτων υποστηρίζει ότι τα σφάλματα των ΨΜΕ είναι τυχαία και ανεξάρτητα μεταξύ τους, στην πραγματικότητα κάτι τέτοιο δεν ισχύει καθώς αυτά σχετίζονται, όπως αναφέρθηκε, με τις παραπάνω συνιστώσες (Hu et al, 2009).

Αναλυτικά τα σφάλματα των ΨΜΕ περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2, ανάλογα με τη μέθοδο που εφαρμόζεται για την παραγωγή τους, ενώ γίνεται αναφορά και στην εκάστοτε οριζοντιογραφική και υψομετρική τους ακρίβεια.

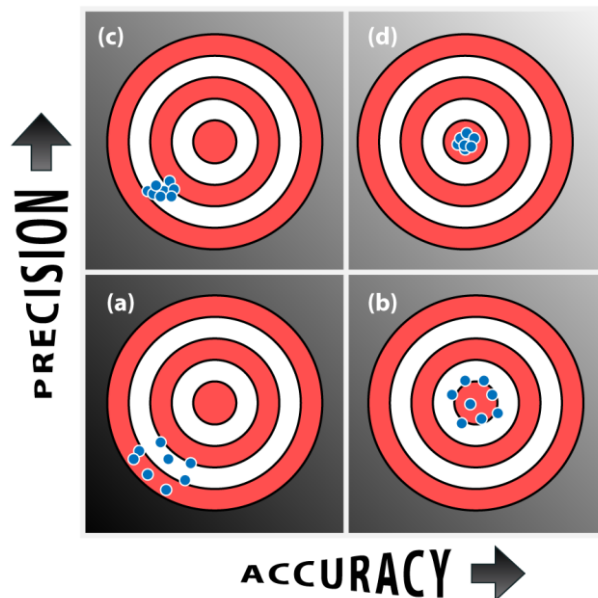
4.2 Συνιστώσες Ελέγχου

Κατά την εκτίμηση ενός ΨΜΕ, γίνεται έλεγχος της ορθότητας, της ακρίβειας και κατά συνέπεια της τελικής ποιότητας του ΨΜΕ.

4.2.1 Ορθότητα

Ο όρος ορθότητα (accuracy) αναφέρεται στο πόσο πλησιάζει η εκτιμώμενη τιμή ενός μεγέθους, η οποία έχει προκύψει από μετρήσεις ή υπολογισμούς, την αληθή τιμή του μεγέθους αυτού. Η αληθής τιμή ενός μεγέθους τις περισσότερες φορές είναι άγνωστη.

Στην περίπτωση των ΨΜΕ, ο έλεγχος της ορθότητας γίνεται με δεδομένα που έχουν προέλθει από πηγές υψηλής ακρίβειας και δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία του. Μια πρώτη προσέγγιση της ορθότητας των υψομέτρων, μπορεί να γίνει με τον υπολογισμό του RMSE, όταν τα σφάλματα ακολουθούν κανονική κατανομή, κάτι το οποίο συμβαίνει με τα φωτογραμμετρικά δεδομένα, τις τοπογραφικές μετρήσεις κ.α. Το σφάλμα αυτό στη συνέχεια μπορεί να μετατραπεί σε ορθότητα υψομέτρων, ανάλογα με το επίπεδο εμπιστοσύνης, το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις λαμβάνεται 95%. (Maune, 2007)



Εικόνα 4.1 -Σχέση ακρίβειας-ορθότητας

Πηγή: <http://www.extremetech.com/wp-content/uploads/2012/01/accuracy-precision.png>

4.2.2 Ακρίβεια

Συχνά η ορθότητα συγχέεται με την ακρίβεια των μετρήσεων. Ο όρος ακρίβεια (precision) είναι έννοια που αναφέρεται στο πόσο συγκλίνουν οι μετρήσεις μεταξύ

τους. Εξαρτάται από την ευαισθησία του οργάνου και την ικανότητα του παρατηρητή και μπορεί να εκτιμηθεί από μια σειρά μετρήσεων με το ίδιο σύστημα "όργανο - παρατηρητής - συνθήκες" (Αγατζά – Μπαλοδήμου, 2009).

Η πιο συνήθης μέθοδος μέτρησης της ακρίβειας είναι η τυπική απόκλιση ή το τυπικό σφάλμα, ενώ είναι απαραίτητη η περίσσεια δεδομένων για τον έλεγχο και τη μείωση των τυχαίων σφαλμάτων. Στην περίπτωση των ΨΜΕ, ο πλεονασμός των δεδομένων παρουσιάζεται, εφόσον το διάστημα της διακριτοποίησης (π.χ. το μέγεθος του εικονοστοιχείου) είναι μικρότερο από το μέγεθος του μικρότερου χαρακτηριστικού του εδάφους που θα απεικονιστεί στο μοντέλο (Karel et al, 2006).

Ένα σύνολο μετρήσεων μπορεί να είναι ακριβές αλλά όχι ορθό. Αυτό ενδέχεται να συμβεί όταν το σύστημα δεν έχει βαθμονομηθεί. Σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται συστηματικά σφάλματα με συνέπεια την χαμηλή ορθότητα των μετρήσεων. Στα συστηματικά σφάλματα ουσιαστικά οφείλεται και η διαφορά μεταξύ ορθότητας και ακρίβειας.

Συχνά στη βιβλιογραφία η ακρίβεια αναφέρεται ως εσωτερική ακρίβεια του συστήματος και η ορθότητα ως εξωτερική. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται σχηματικά η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών εννοιών.

4.3 Εκτίμηση Υψομετρικών Δεδομένων για την Παραγωγή ΨΜΕ

Σημαντική συμβολή στην τελική ποιότητα των ΨΜΕ έχει η ποιότητα των αρχικών δεδομένων που έχουν συλλεχθεί από μετρήσεις για τη δημιουργία του. Η πυκνότητα, ο τύπος των δεδομένων αυτών, η ποιότητα του εξοπλισμού με τον οποίο γίνονται οι μετρήσεις, η εμπειρία του χειριστή, η ακρίβεια των μετρήσεων, το μέγεθος του κανάβου και η μέθοδος παρεμβολής που εφαρμόζεται για την παραγωγή του ΨΜΕ, είναι συνιστώσες που εξετάζονται. Μάλιστα ανάλογα με την πυκνότητα, την ακρίβεια των δεδομένων και τη μέθοδο παρεμβολής που χρησιμοποιείται, η ποιότητα μπορεί να διαφοροποιηθεί τοπικά και συνολικά για μια συγκεκριμένη επιφάνεια (Karel et al, 2006).

Σύμφωνα με τους Karel et al (2006), κυρίως για φωτογραμμετρικά δεδομένα και δεδομένα LiDAR, σημαντική είναι η εξέταση της κατανομής των σημείων, δηλαδή της πυκνότητας, της ταξινόμησης και της απόστασης μεταξύ των δεδομένων αυτών, τα οποία ελέγχονται υπό μορφή ράστερ εικόνων.

Αναλυτικότερα, η πυκνότητα των δεδομένων εξετάζεται ως προς τις οριζοντιογραφικές θέσεις των σημείων και προσδιορίζεται από τον αριθμό των σημείων ανά μονάδα επιφάνειας. Η απόσταση των δεδομένων θεωρείται αυτή μεταξύ του κέντρου του κάθε εικονοστοιχείου και του πλησιέστερου σημείου δεδομένων, ενώ το κάθε εικονοστοιχείο ταξινομείται σε κλάσεις, βάσει των ακριβέστερων δεδομένων που περιλαμβάνει.

Γενικά, η πληρότητα των αρχικών δεδομένων μπορεί να ελεγχθεί με τη βοήθεια της πυκνότητας και των μεταξύ τους αποστάσεων και αν αυτός ο έλεγχος δεν είναι επιτυχής είναι απαραίτητη η συλλογή επιπλέον δεδομένων (Karel et al, 2006).

Η επίδραση της παρεμβολή είναι επίσης μια πολύ σημαντική παράμετρος, η οποία επηρεάζει το τελικό προϊόν.

4.4 Είδη Ελέγχων ΨΜΕ

Για κάθε παραγόμενο ΨΜΕ, απαιτείται ένας έλεγχος ποιότητας, ώστε να διαπιστωθεί εάν πληροί τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί εξαρχής. Οι απαιτήσεις αυτές αφορούν τόσο στη χρήση για την οποία προορίζεται, όσο και στο αν ικανοποιούνται οι προδιαγραφές ακρίβειας και ποιότητας. Γενικά, η ποιότητα ενός ΨΜΕ συνίσταται σε πολλούς παράγοντες όπως είναι η ορθότητα, η αξιοπιστία και η πιστότητα με την οποία αναπαριστά τη φυσική γήινη επιφάνεια.

Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι εκτίμησης της ποιότητας των ΨΜΕ και χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις των χρηστών. Οι περισσότερες μέθοδοι βασίζονται σε δεδομένα αναφοράς, ενώ υπάρχουν και άλλες οι οποίες δεν κάνουν χρήση τέτοιων δεδομένων, όπως είναι η μέθοδος Norvelle και διάφορες παραλλαγές και εξελίξεις της (Σκαρλάτος, 2006). Οι έλεγχοι για την εκτίμηση της ακρίβειας και της ποιότητας των ΨΜΕ που αφορούν αυτή την εργασία, αξιοποιούν δεδομένα αναφοράς και είναι δύο ειδών, οι **στατιστικοί** και οι **οπτικοί**, οι οποίοι και αναλύονται στη συνέχεια.

4.4.1 Στατιστικοί έλεγχοι

Οι βασικότεροι έλεγχοι υψομετρικής ακρίβειας ενός ΨΜΕ πραγματοποιούνται κυρίως με τη σύγκριση με υψομετρικά σημεία ελέγχου (φωτοσταθερά, τριγωνομετρικά σημεία), τα οποία θεωρούνται υψηλής ακρίβειας και είναι γνωστά ως δεδομένα αναφοράς, με τις αντίστοιχες τιμές του ΨΜΕ στις ίδιες οριζοντιογραφικές θέσεις. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται **pixel-to-point** (ή raster-to-point) και θεωρείται ως ο πιο ρεαλιστικός τρόπος αξιολόγησης ενός ΨΜΕ. Επίσης μία ακόμη μέθοδος ελέγχου του προς εξέταση ΨΜΕ είναι η σύγκρισή του με ένα ΨΜΕ αναφοράς στις αντίστοιχες ψηφιακές τιμές, γνωστή και ως μέθοδος **pixel-to-pixel** (ή raster-to-raster).

Τα δεδομένα αναφοράς που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των ΨΜΕ είναι πολύ σημαντικά. Όσον αφορά στα σημεία αναφοράς, αυτά θεωρούνται σημεία ελέγχου, και πρέπει να έχουν συγκεκριμένη κατανομή στο χώρο, ώστε να καλύπτουν όσο το δυνατό καλύτερα το ανάγλυφο του εδάφους. Για μια αυστηρή εκτίμηση της ποιότητας, τα σημεία ελέγχου πρέπει να είναι τρεις φορές ακριβέστερα από την ανοχή του ΨΜΕ.

Γενικά τα σημεία ελέγχου, πρέπει να είναι πολύ καλά ορισμένα, με μεγάλη ακρίβεια της οριζοντιογραφικής τους θέσης και με γνώση της απόλυτης θέσης τους ανάλογα με το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, ενώ επιπλέον προέρχονται από ανεξάρτητες πηγές.

Οι πηγές αυτές των σημείων είναι είτε ο κινηματικός εντοπισμός με GPS, είτε υψηλής ποιότητας DTM που έχει προκύψει από φωτογραμμετρικές μεθόδους ή από δεδομένα LiDAR.

Από τη σύγκριση του υπό εξέταση ΨΜΕ με τα δεδομένα αναφοράς προκύπτουν υπόλοιπα. Τα υπόλοιπα αυτά είναι οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ των πραγματικών σημείων και της επιφάνειας του ΨΜΕ, ενώ τα αποτελέσματα είναι σημειακά. Από τα αποτελέσματα αυτά, υπολογίζονται στατιστικά μεγέθη, που συμβάλλουν στη εκτίμηση της ακρίβειας και ποιότητας των υπό έλεγχο ΨΜΕ. Τα μεγέθη που υπολογίζονται είναι:

➤ Ο μέσος όρος

Ο μέσος όρος καταδεικνύει την ύπαρξη ή μη συστηματικού σφάλματος. Στην περίπτωση που ο μέσος όρος των διαφορών είναι πολύ κοντά στο μηδέν, τότε θεωρείται ότι δεν υπάρχει συστηματικό σφάλμα στο υπό εξέταση ΨΜΕ.

➤ Η διάμεσος

Η διάμεσος είναι η παρατήρηση εκείνη που είναι μεγαλύτερη από το 50% του συνόλου των παρατηρήσεων και λειτουργεί ως δείκτης ύπαρξης συστηματικού σφάλματος.

➤ Η μέγιστη (max) και ελάχιστη τιμή (min) των διαφορών

Και τα δύο αυτά μεγέθη θεωρούνται δείκτες ύπαρξης μεμονωμένων χονδροειδών σφαλμάτων στα ΨΜΕ που μελετώνται, αν και αυτό δε σημαίνει απαραίτητα ότι οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται σε λανθασμένες παρατηρήσεις.

➤ Η τυπική απόκλιση των διαφορών (σ)

Η τυπική απόκλιση, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι η συνηθέστερη μέθοδος εκτίμησης της ακρίβειας, και υποδηλώνει ότι το 68% περίπου των σφαλμάτων εντοπίζεται στην περιοχή $\pm\sigma$, ή με άλλα λόγια ότι υπάρχει πιθανότητα 68%, τα σφάλματα τυχόν επιπλέον μετρήσεων που θα πραγματοποιηθούν με τις ίδιες συνθήκες, να μην υπερβούν το σ . Το μέγεθος αυτό, όπως φαίνεται, δίνει πληροφορίες για το εύρος διακύμανσης του 68% των σφαλμάτων.

Η τυπική απόκλιση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta z - \bar{z})^2}{n-1}} \quad (1)$$

Όπου Δz οι υψομετρικές διαφορές, \bar{z} ο μέσος όρος των παρατηρήσεων και n το πλήθος των παρατηρήσεων.

- Το γραμμικό σφάλμα για επίπεδο εμπιστοσύνης 90% (LE90)

Παρόμοια με την τυπική απόκλιση, το μέγεθος αυτό υποδηλώνει ότι το 90% των σφαλμάτων εντοπίζεται στην περιοχή $\pm LE90$. Με τη σειρά του δίνει πληροφορίες για το εύρος των τιμών του 90% των σφαλμάτων. Το γραμμικό σφάλμα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$LE90 = 1.6449 \times \sigma \quad (2)$$

- Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE)

Το σφάλμα αυτό έχει τιμή μεγαλύτερη από αυτή της τυπικής απόκλισης, καθώς περιλαμβάνει τυχαία και συστηματικά σφάλματα, σε αντίθεση με την τυπική απόκλιση που αναφέρεται μόνο σε τυχαία. Αν οι τιμές των δύο μεγεθών είναι ίσες τότε δεν υπάρχουν συστηματικά σφάλματα στο υπό εξέταση ΨΜΕ. Το RMSE θεωρείται το γενικό σφάλμα του ΨΜΕ και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^i \Delta z^2}{n}} \quad (3)$$

Όπου Δz οι υψομετρικές διαφορές και n το πλήθος των παρατηρήσεων.

Να σημειωθεί επιπλέον, ότι το RMS σφάλμα συγκεντρώνει τη διακύμανση των δεδομένων κάθε κελιού του κανάβου σε ράστερ δεδομένα, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα τοπικής αξιολόγησης της ακρίβειας του ΨΜΕ. Επίσης, ανιχνεύει τα σφάλματα της διαδικασίας φιλτραρίσματος για τα σημεία που δεν ανήκουν στο έδαφος.

- Η γενική ακρίβεια του ΨΜΕ (NSSDA)

Η γενική ακρίβεια υπολογίζεται για δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης (90-95%) από το RMSE. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα National Standard for Spatial Data Accuracy του FGDC, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% η ακρίβεια είναι ίση με $1.95 \times RMSE$.

Όλα τα παραπάνω στατιστικά μεγέθη συμβάλλουν καθοριστικά στην εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων για την καταλληλότητα ενός ΨΜΕ για την εφαρμογή για την οποία προορίζεται.

4.4.2 Οπτικοί έλεγχοι

Μετά την εκτίμηση των στατιστικών μεγεθών, ακολουθεί το στάδιο των οπτικών ελέγχων. Η διαδικασία αυτή γίνεται ώστε να εντοπιστούν ανωμαλίες και περιοχές στις οποίες τα δεδομένα δεν έχουν ταξινομηθεί σωστά, υπάρχουν κενά, ασυνέχειες ή περιοχές με χονδροειδή σφάλματα. Για το λόγο αυτό υπάρχει η δυνατότητα οπτικής

ερμηνείας τόσο των στατιστικών μεγεθών, όσο και άλλων συνιστωσών, όπως είναι οι υψομετρικές καμπύλες, με τελικό στόχο την εκτίμηση της ποιότητας και της ακρίβειας του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

Η οπτικοποίηση των συνιστωσών που εξετάζονται γίνεται με χρήση λογισμικών, τα οποία επιτρέπουν τον έλεγχο σε όλη την έκταση της εικόνας, αλλά και σε συγκεκριμένα σημεία αυτής, ώστε να εντοπιστούν σημαντικές και ευδιάκριτες αλλά και περισσότερο λεπτομερείς ανωμαλίες. Μάλιστα ο οπτικός έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμη και σε επίπεδο εικονοστοιχείου. Για περαιτέρω και ακόμη περισσότερο λεπτομερή έλεγχο, τα δεδομένα μπορούν να παρατηρηθούν σε τρεις διαστάσεις. Με τον τρισδιάστατο έλεγχο μπορούν να εντοπιστούν, κενές περιοχές και περιοχές που επικαλύπτονται. Επίσης υπάρχει δυνατότητα διερεύνησης του κατά πόσο τα υπό έλεγχο ΨΜΕ προσεγγίζουν την τοπογραφική επιφάνεια.

Όσον αφορά στα χονδροειδή σφάλματα, αυτά μπορεί να είναι χαρακτηριστικά που φαίνονται να μη βρίσκονται στη σωστή θέση, μεγάλες κλίσεις σε υδάτινες επιφάνειες ή να σχετίζονται με την ημιτελή αποκατάσταση της συμβολομετρικής φάσης στην περίπτωση των InSAR δεδομένων. Γενικά τα χονδροειδή σφάλματα – που καταγράφονται τόσο τα ίδια όσο και η θέση τους – εντοπίζονται με το συνδυασμό χαρτών, στερεοσκοπικών παρατηρήσεων με τη χρήση φίλτρων αναγλύφου, ιστογραμμάτων, με ενίσχυση του σκιασμένου αναγλύφου ή και με το συνδυασμό ράστερ και διανυσματικών μοντέλων. Επίσης η χρήση 3D ράστερ επιφανειών σε συνδυασμό με σκιασμένο ανάγλυφο μπορεί να προσφέρει ακόμη καλύτερο οπτικό έλεγχο, όπως και η σκίαση της επιφάνειας του ΨΜΕ.

Να σημειωθεί ότι η δυνατότητα εφαρμογής οπτικών ελέγχων επηρεάζεται άμεσα από τον τρόπο καταγραφής/απεικόνισης των ψηφιακών μοντέλων εδάφους, δηλαδή από το αν τα δεδομένα είναι σε διανυσματική ή σε ράστερ μορφή. Όσα αναφέρονται στη συνέχεια αφορούν κυρίως τις ράστερ μορφές δεδομένων.

Μερικές σημαντικές παράμετροι οι οποίες μπορούν να εξεταστούν οπτικά και να δώσουν σημαντικά συμπεράσματα, υπολογίζονται εύκολα από πολλά λογισμικά. Κάποιες από αυτές παρουσιάζονται στη συνέχεια.

➤ *Ισοϋψείς καμπύλες*

Ένας γρήγορος οπτικός έλεγχος του ΨΜΕ μπορεί να γίνει με τη δημιουργία ισοϋψών καμπυλών ώστε να εξεταστεί αν έχουν την κατάλληλη μορφή σε σχέση με το πραγματικό ανάγλυφο της περιοχής. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα σύγκρισης των ισοϋψών ενός ΨΜΕ με τις αντίστοιχες ίδιας ισοδιάστασης του ΨΜΕ αναφοράς και από τις αποκλίσεις να εξαχθούν συμπεράσματα για την ποιότητα του υπό έλεγχο ΨΜΕ.

➤ *Σκίαση*

Η σκίαση είναι μια συνάρτηση με την οποία δημιουργείται μια φωτεινή αναπαράσταση του αναγλύφου από μια υποθετική πηγή φωτός, με αποτέλεσμα μια

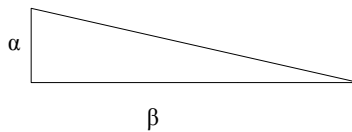
περισσότερο ενισχυμένη απεικόνιση του εδάφους, η οποία αναδεικνύει τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του, ενώ επιπλέον κάνει πιο ευδιάκριτες τις τυχόν ανωμαλίες που περιέχει το ΨΜΕ. Η τεχνική της σκίασης αναγλύφου υπολογίζει την τιμή της φωτεινότητας σε κάθε κελί βασισμένη στην ύπαρξη της υποθετικής πηγής φωτός. Η ενίσχυση του εδάφους με αυτόν τον τρόπο διευκολύνει την παρατήρηση της επιφάνειας και κατά συνέπεια την ανάλυσή της για τον εντοπισμό σφαλμάτων, ενώ δίνεται η δυνατότητα γραφικής αναπαράστασης των τιμών του. Η σκιασμένη ράστερ εικόνα που προκύπτει έχει ακέραιες τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 0 και 255. Η σκίαση είναι ένα βασικό εργαλείο για την εκτίμηση της ποιότητας των ΨΜΕ, καθώς το σκιασμένο ανάγλυφο ενός ΨΜΕ που ελέγχεται για την ακρίβειά του μπορεί να συγκριθεί με το αντίστοιχο ανάγλυφο του ΨΜΕ αναφοράς.

➤ Κλίση

Γενικά για την κλίση ισχύει ότι όσο πιο μικρή είναι η τιμή της τόσο πιο επίπεδο είναι το έδαφος και το αντίστροφο. Η κλίση είναι υπολογισμός που γίνεται για το ΨΜΕ και αφορά σε κάθε κελί κανάβου σε ράστερ δεδομένα ή σε κάθε τρίγωνο στις TIN επιφάνειες, ανάλογα με το είδος απεικόνισής του. Η κλίση είναι το ποσοστό της μέγιστης μεταβολής της τιμής του υψομέτρου για κάθε κελί, ουσιαστικά είναι η γωνία που σχηματίζει μια επιφάνεια του εδάφους με το οριζόντιο επίπεδο, και υπολογίζεται είτε σε μορφή ποσοστού, είτε σε γωνιακό μέγεθος. Γενικά η κλίση μιας επιφάνειας και κατά συνέπεια των σημείων που περιλαμβάνει υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \text{ (γωνιακό μέγεθος)} \quad \text{ή} \quad \theta = \arctan\left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

Όπου θ η κλίση, η οποία είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της υποτείνουσας και της μίας κάθετης πλευράς ενός ορθογωνίου τριγώνου, α η κάθετη πλευρά του τριγώνου και β η οριζόντια, όπως φαίνεται στο σχήμα.



Ο υπολογισμός και η οπτικοποίηση των κλίσεων με διαφοροποιήσεις χρωμάτων, δίνει σημαντικά στοιχεία για τον τύπο του εδάφους και για το πόσο η επιφάνεια του ΨΜΕ ανταποκρίνεται στο πραγματικό ανάγλυφο.

➤ Προσανατολισμός

Μια επιπλέον παράμετρος που μπορεί να υπολογιστεί και να οπτικοποιηθεί στο ΨΜΕ, είναι ο προσανατολισμός (aspect) του εδάφους. Υπολογίζεται προς ποιά διεύθυνση του ορίζοντα «κοιτάει» το κεκλιμένο έδαφος ή διαφορετικά ποιά είναι η διεύθυνση της κλίσης του εδάφους. Μετρίεται δεξιόστροφα από το βορρά σε γωνιακό μέγεθος και η τιμή της υπολογίζεται για κάθε φατνίο του κανάβου του ΨΜΕ. Με τη βοήθεια αυτής της παραμέτρου εντοπίζονται σφάλματα σε σχέση με το πραγματικό ανάγλυφο μέσω του ΨΜΕ αναφοράς ή ακόμη και η ύπαρξη θορύβου στα δεδομένα.

➤ *Υψομετρικές διατομές*

Το προφίλ υψομετρικού αναγλύφου ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους μπορεί να δημιουργηθεί κατά μήκος επιλεγμένων διευθύνσεων. Ουσιαστικά είναι η τομή του ΨΜΕ με ένα κατακόρυφο επίπεδο. Αυτό δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης της τομής του υπό εξέταση ΨΜΕ με την αντίστοιχη τομή του ΨΜΕ αναφοράς, ώστε να ελεγχθεί η προσαρμογή του στο πραγματικό ανάγλυφο και η πιστότητα αναπαράστασής του από αυτό.

➤ *Καμπυλότητα*

Η καμπυλότητα του εδάφους είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα του ΨΜΕ. Υπολογίζεται για όλα τα κελιά του κανάβου του ΨΜΕ και κατά μήκος των γραμμών του. Συγκεκριμένα η τιμή της καμπυλότητας στα σημεία των δεδομένων υπολογίζεται με παρεμβολή από τα τέσσερα σημεία του κανάβου που το περιβάλλουν.

Η καμπυλότητα παρέχει αναλυτική οπτικοποίηση της γεωμορφολογίας του εδάφους προσφέροντας σημαντικές πληροφορίες. Πιο ειδικά, οι εξαιρετικά μεγάλες τιμές καμπυλότητας παρουσιάζονται στις γραμμές ασυνέχειας, οι μεγάλες στις κατοικημένες περιοχές και οι μικρές τιμές στις αγροτικές περιοχές. Επίσης οι μέγιστες μέσες τιμές καμπυλότητας των σημείων του κανάβου αναδεικνύουν οπτικά σημαντικά χαρακτηριστικά όπως ρήγματα και κορυφές. Επιπλέον η καμπυλότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή χαρακτηριστικών όπως οι λεκάνες απορροής, με συνέπεια την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη διάβρωση και την επιφανειακή απορροή.

Η καμπυλότητα στις ράστερ και TIN εικόνες μπορεί να θεωρηθεί ως η δεύτερη παράγωγος της επιφάνειας.

4.4.3 Άλλες μέθοδοι ελέγχου των ΨΜΕ

Εκτός από τις αυστηρές στατιστικές μεθόδους υπάρχουν και **εμπειρικά μοντέλα** για την εκτίμηση της a posteriori ορθότητας των υψομέτρων, καθώς αφορούν όλους τους σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την τοπική ακρίβεια του ΨΜΕ. Η εφαρμογή τους όμως προϋποθέτει την εξάλειψη των συστηματικών σφαλμάτων.

Κάποια τέτοια παραδείγματα εμπειρικών μοντέλων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

➤ *ΨΜΕ από φωτογραμμετρικά δεδομένα*

Ο Kraus (2000), για φωτογραμμετρικά δεδομένα, προτείνει την ακόλουθη εμπειρική μέθοδο για εκτίμηση της ακρίβειας των υψομέτρων, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στο ανοιχτό έδαφος, και αφορά σε αναλυτικά φωτογραμμετρικά όργανα:

$$\sigma_z = \pm \left(0.15\% \times h + \frac{0.15}{c} \times h \times \tan a \right) (\text{mm}) \quad (5)$$

όπου $\tan a$ η κλίση του εδάφους, c η εστιακή απόσταση του φακού, h το ύψος πτήσης, $\frac{h}{c}$ η κλίμακα της εικόνας.

Στην περίπτωση των περιοχών με έντονη βλάστηση, η αβεβαιότητα αυξάνεται περίπου κατά 2m. Γενικά η ορθότητα των μετρήσεων με στερεοσκοπικές μεθόδους δεν είναι τόσο αυξημένη, ενώ εξαρτάται κυρίως από το ύψος πτήσης και τον τύπο της φωτομηχανής (Kraus, 2000), όπως φαίνεται και από την παραπάνω σχέση.

Είναι δυνατός ο προσδιορισμός εκ των προτέρων του βέλτιστου ύψους πτήσης και της κλίμακας της εικόνας, εφόσον είναι γνωστή η μέγιστη κλίση του εδάφους, ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του ΨΜΕ.

➤ *ΨΜΕ από δεδομένα LiDAR*

Ο Karel (2006) προτείνει, επίσης, αντίστοιχη σχέση για την εκτίμηση της ακρίβειας των υψομέτρων από δεδομένα LiDAR:

$$\sigma_z = \pm \left(\frac{6}{\sqrt{n}} + k \times \tan a \right) (\text{cm}) \quad (6)$$

Όπου n (σημεία/ m^2) η πυκνότητα των σημείων, $\tan a$ η κλίση του εδάφους και k ένας παράγοντας που παίρνει τιμές από 30 έως 50.

Η ορθότητα των υψομέτρων όπως φαίνεται, είναι ανεξάρτητη από το ύψος πτήσης. Οι παράγοντες 6 και k προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας 22.000 φωτοσταθερά σε ορεινά και με μικρή κλίση εδάφη.

Μια περισσότερο ακριβής σχέση προτάθηκε από τους Kraus et al. (2006) για τον υπολογισμό της ορθότητας των ΨΜΕ από δεδομένα LiDAR. Η σχέση αυτή περιλαμβάνει την καμπυλότητα του ΨΜΕ και τα υπόλοιπα των υψομετρικών σημείων. Η τυπική απόκλιση των υψομέτρων του ΨΜΕ υπολογίζεται από τη σχέση (Kraus et al., 2006; Karel et al. 2006):

$$\sigma_{DTM} = \pm \sigma_0 \sqrt{q_{a0}} \quad (7)$$

Όπου σ_0 μια αντιπροσωπευτική ακρίβεια των αρχικών δεδομένων ή τυπική απόκλιση αναφοράς και q_{a0} ένας συντελεστής ενός επιπέδου προσαρμοσμένο στα γειτονικά αρχικά δεδομένα, όπου αρχικά δεδομένα τα δεδομένα που έχουν μετρηθεί και δεν έχουν προκύψει από παρεμβολή.

➤ *Ψηφιακά μοντέλα TIN*

Μία αντίστοιχη σχέση έχει προταθεί από τους Zhu et al. (2005), για την εκτίμηση της μέσης ακρίβειας ενός ΨΜΕ που έχει προέλθει από γραμμική παρεμβολή, θεωρώντας τυχαία, ανεξάρτητα και ίσα μεταξύ τους σφάλματα στις κορυφές των TIN μοντέλων:

$$\sigma_H^2 = \frac{1}{2} \sigma_{node}^2 \quad (8)$$

Αυτή η σχέση υποδηλώνει ότι το μέσο σφάλμα των TIN ψηφιακών μοντέλων εδάφους, εξαρτάται από το σφάλμα στις κορυφές των τριγώνων, ενώ είναι ανεξάρτητο από το σχήμα και τη θέση τους.

➤ *Νόμος μετάδοσης σφαλμάτων*

Η εκτίμηση των ΨΜΕ μπορεί να γίνει και με τη μετάδοση σφαλμάτων, κάτι το οποίο όμως δεν είναι ιδιαίτερα εφαρμόσιμο σε ήδη υπάρχοντα ΨΜΕ, λόγω της έλλειψης πληροφοριών για τις επιπτώσεις των διαφόρων παραγόντων στην ποιότητά τους. Επίσης για τον προσδιορισμό της ακρίβειας των παραγόμενων του ΨΜΕ, όπως είναι η κλίση, η σκίαση, η καμπυλότητα, μπορεί να υπολογιστεί η τυπική απόκλιση των υψομέτρων με χρήση και πάλι του νόμου μετάδοσης των σφαλμάτων.

➤ *Τοπική εκτίμηση της ακρίβειας των ΨΜΕ*

Μια ακόμη πρόταση που έχει γίνει από τους Karel και Kraus (2006), είναι ο υπολογισμός του σταθμισμένου RMSE, το οποίο έχει προκύψει από τις διαφορές των υψομέτρων μεταξύ των αρχικών δεδομένων και των αντίστοιχων τιμών της επιφάνειας του ΨΜΕ. Αυτή τους η πρόταση αφορά την τοπική εκτίμηση της ακρίβειας του ΨΜΕ και για αυτό το λόγο εφαρμόζεται σε συγκεκριμένο σημείο του κανάβου κάθε φορά. Μάλιστα η τοπική εκτίμηση θεωρείται πιο αποτελεσματική από τη συνολική, λόγω των χωρικών διακυμάνσεων του εδάφους και κατά συνέπεια της ποιότητας. Το σταθμισμένο RMSE υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i d_i d_i p_i}{\sum_i p_i}} \quad (9)$$

Όπου d_i οι διαφορές των υψομέτρων και p_i το βάρος που υπολογίζεται από τη σχέση

$$p_i = \frac{1}{1 + s_i^2 / r_{a_i}^2} \quad (10)$$

Όπου s_i η απόσταση μεταξύ του σημείου στον κανάβο και του αρχικού σημείου και r_{a_i} η ακτίνα της καμπυλότητας του ΨΜΕ στο αρχικό σημείο προς το σημείο του κανάβου.

Στην περίπτωση που το RMSE είναι μικρότερο από την τυπική απόκλιση της μέτρησης, τότε αντικαθίσταται από αυτή την τιμή. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να υπολογιστούν οι ακρίβειες (ορθότητες) των υψομέτρων στο ΨΜΕ (Kraus et al. 2004; Karel, Kraus, 2006).

Επίσης η τυπική απόκλιση του υψομέτρου του συγκεκριμένου σημείου του κανάβου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (Kraus et al., 2005):

$$\hat{\sigma}_{DTM} = RMSE_{surf} \sqrt{q} \quad (11)$$

Όπου q ένας συντελεστής υψομέτρου ενός επιπέδου προσαρμοσμένο στα γειτονικά αρχικά δεδομένα, ο οποίος έχει προκύψει με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Για το q και για την ακρίβεια του σημείου του κανάβου σε σχέση με τα γειτονικά σημεία δεδομένων ισχύει:

- Αν $q = 1$, τότε το συγκεκριμένο σημείο του κανάβου έχει την ίδια ακρίβεια με τα γύρω δεδομένα.
- Αν $q < 1$, τότε το σημείο του κανάβου έχει υψηλότερη ακρίβεια από τα γύρω σημεία.
- Αν $q > 1$, τότε το σημείο του κανάβου έχει μικρότερη ακρίβεια από τα γύρω σημεία.

Σύμφωνα με τους Karel και Kraus (2006) και τους Kraus et al. (2006), η τοπική ακρίβεια του ΨΜΕ, η οποία θεωρείται πολύ σημαντική για την εκτίμηση του ΨΜΕ, επηρεάζεται και μπορεί να προσδιοριστεί από:

- την πυκνότητα των σημείων,
- την καμπυλότητα του εδάφους,
- το σταθμισμένο RMSE,
- την απόσταση μεταξύ των σημείων του κανάβου και των κοντινότερων αρχικών δεδομένων, και από
- την τυπική απόκλιση.

Γενικά με το συνδυασμό αρχικών δεδομένων – που δεν έχουν προέλθει από παρεμβολή - και του ίδιου του ΨΜΕ, οι ακρίβειες που υπολογίζονται είναι αντιπροσωπευτικές της περιοχής γύρω από ένα σημείο του κανάβου. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να εντοπιστούν σφάλματα και ακατάλληλες περιοχές ή περιοχές με προβλήματα, μέσω της οπτικής ερμηνείας των μεγεθών που αναφέρθηκαν πιο πάνω.

Κεφάλαιο 5

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύντομη περιγραφή της περιοχής που μελετήθηκε, ενώ επιπλέον παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή των ελέγχων. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα αναφοράς και στα δεδομένα ελέγχου, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά.

5.1 Περιοχή Μελέτης

Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους που δόθηκαν για την εφαρμογή των ελέγχων, αφορούσαν στην περιοχή των Μεσογείων, στην Ανατολική Αττική.

Συγκεκριμένα η περιοχή μελέτης εκτείνεται από 37°57.00 Β, 23°51.90 Α βορειοδυτικά έως 37°47.28 Β, 24°1.46 Α νοτιοανατολικά και η έκτασή της υπολογίζεται στα 252 km². Περιλαμβάνει τους οικισμούς, Μαρκόπουλο, Καλύβια, Πόρτο Ράφτη, Κουβαρά, Κερατέα και τμήμα του οικισμού του Κορωπίου και της Αρτέμιδος. Επίσης σε αυτή βρίσκεται τμήμα του αεροδρομίου των Σπάτων.



Εικόνα 5.1-Θέση της περιοχής μελέτης στο νομό Αττικής.



Εικόνα 5.2-Περιοχή μελέτης σε μεγέθυνση, οικισμοί που περιλαμβάνει και οικισμοί που την περιβάλλουν.

Επιπλέον η περιοχή συνορεύει με τους οικισμούς της Αγίας Μαρίνας, την Παιανία και τα Σπάτα (Εικόνα 5.2).

5.1.1 Ανάγλυφο

Γενικά η περιοχή θεωρείται ήπιου αναγλύφου με κάποιες εξάρσεις κυρίως νότια και ανατολικά, καθώς σε αυτή βρίσκονται κάποιοι ορεινοί όγκοι. Το όρος Μερέντα είναι ένας γνωστός ορεινός όγκος της περιοχής, το οποίο βρίσκεται μεταξύ της Κερατέας, του Μαρκόπουλου και των Καλυβίων και έχει μέγιστο υψόμετρο 613m, ενώ η βόρεια πλευρά του καλύπτεται από τα λατομεία του Μαρκόπουλου (Εικόνα 5.3). Επίσης στην περιοχή βρίσκεται τμήμα του Πάνειου όρους, το οποίο είναι το υψηλότερο βουνό των Μεσογείων (648m) και βρίσκεται μεταξύ των οικισμών της Κερατέας και των Καλυβίων. Στην περιοχή επίσης συναντώνται αρκετά ρέματα και παραθαλάσσιες περιοχές (π.χ. Πόρτο Ράφτη).



Εικόνα 5.3-Λατομεία Μαρκοπούλου, βόρεια του όρους Μερέντα.

5.2 Δεδομένα Αναφοράς

Για την αξιολόγηση της ακρίβειας και της ποιότητας των υπό έλεγχο ΨΜΕ, είναι απαραίτητα κάποια αρχικά δεδομένα ή δεδομένα αναφοράς, τα οποία θεωρούνται υψηλής ακρίβειας. Σε σύγκριση με αυτά τα δεδομένα κρίνεται αν και κατά πόσο τα υπό μελέτη ψηφιακά μοντέλα εδάφους είναι ακριβή.

Τα δεδομένα αυτά είναι:

- Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της πρώην Κτηματολόγιο Α.Ε. (τόρα Εθνικό Κτηματολόγιο & Χαρτογράφηση Α.Ε.) με βήμα 5m.

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της Κτηματολόγιο Α.Ε. χρησιμοποιήθηκε ως μοντέλο αναφοράς για τους ελέγχους raster – to – raster. Θεωρήθηκε υψηλότερης ακρίβειας, λόγω του μικρότερου βήματος σε σχέση με τα υπόλοιπα, καθώς επίσης λόγω των φωτογραμμετρικών μεθόδων που εφαρμόστηκαν για την παραγωγή του. Επίσης, ήταν γνωστά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του και η μεθοδολογία παραγωγής του, καθώς και η ακρίβεια του προϊόντος, πληροφορίες οι οποίες δεν ήταν διαθέσιμες για το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ. Επιπλέον η δημιουργία του έγινε σε επίπεδο χώρας, συνεπώς υπερτερούσε των αντίστοιχων παγκόσμιων ΨΜΕ.

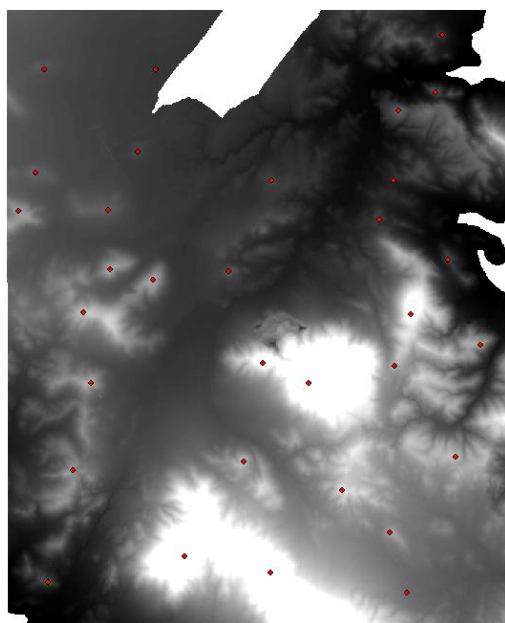
Αν και τα υψομετρικά μοντέλα της Κτηματολόγιο Α.Ε. έχουν ελεγχθεί και πιστοποιηθεί για την ακρίβειά τους (Καββάδας, 2010), ελέγχεται η ακρίβεια και αυτού του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, τόσο με τη μέθοδο raster – to – point σε σχέση με τα τριγωνομετρικά σημεία και τα σημεία ελέγχου, όσο και με οπτικούς ελέγχους, για να διαπιστωθεί κατά πόσο ανταποκρίνεται στο ανάγλυφο της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 5.1-Βασικά χαρακτηριστικά των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων της Κτηματολόγιο Α.Ε.

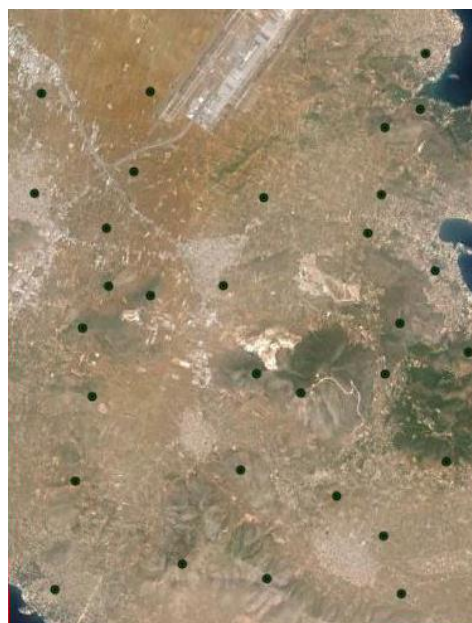
Χαρακτηριστικό	Προδιαγραφή
Μέγεθος Εικονοστοιχείου στο Έδαφος:	5,00μ
Περιμετρική επικάλυψη:	300μ
Τύπος αρχείου:	ESRI FloatingPointGrid
Διανομή πινακίδων:	ITRF κλίμακας 1:5000
Διαστάσεις πινακίδας στο έδαφος:	4600μ*3600μ
Αριθμός πινακίδων:	13.350
Γεωμετρική Ακρίβεια:	RMSE _z ≤ 2,00μ
Απόλυτη υψομετρική ακρίβεια:	≤ 3,92μ, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%

Πηγή: Καββάδας, 2010

- Τριγωνομετρικά σημεία της περιοχής από τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού.



Εικόνα 5.4-Κατανομή τριγωνομετρικών σημείων στην περιοχή (ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής).



Εικόνα 5.5-Κατανομή τριγωνομετρικών σημείων (GoogleEarth).

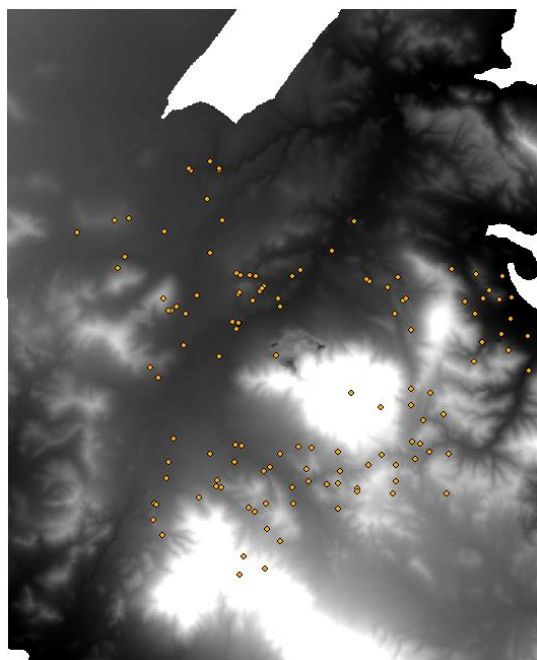
Τα τριγωνομετρικά σημεία της περιοχής είναι 33, αλλά τελικά χρησιμοποιήθηκαν τα 31, καθώς τα 2 βρίσκονται πάνω σε κτίρια (στη βάση του σταυρού στον τρούλο εκκλησιών) κάτι το οποίο δεν εξυπηρετεί σε ψηφιακά μοντέλα εδάφους. Η κατανομή τους παρουσιάζεται στις Εικόνες 5.4 και 5.5. Γνωστά για τα τριγωνομετρικά σημεία, πέρα από τις συντεταγμένες τους, είναι ο χαρακτηρισμός τους και τα ύψη βάθρων, όπου αυτά υπάρχουν. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες των τριγωνομετρικών σημείων.

Πίνακας 5.2-Συντεταγμένες τριγωνομετρικών σημείων περιοχής.

α/α	X	Y	H
1	489288.70	4197507.01	122.44
2	492405.13	4197506.91	80.37
3	499121.94	4196351.62	139.35
4	500139.98	4196862.45	135.15
5	500324.53	4198457.88	90.46
6	489046.51	4194653.44	146.29
7	488571.11	4193592.89	221.22
8	491893.73	4195229.05	98.88
9	491081.90	4193622.98	134.83
10	495602.45	4194419.12	97.08
11	498981.18	4194442.63	71.41
12	498573.79	4193346.91	98.37
13	490371.68	4190776.32	277.28
14	491128.81	4191961.88	236.43
15	492320.81	4191671.96	238.87
16	494400.31	4191922.57	122.79
17	499460.07	4190739.73	413.44
18	500480.56	4192237.18	112.25
19	490597.53	4188822.82	239.49
20	495355.09	4189386.06	429.25
21	496634.19	4188816.52	613.62
22	499005.24	4189307.87	273.38
23	501398.65	4189888.74	235.16
24	490078.83	4186418.72	220.99
25	494818.45	4186649.07	274.92
26	497555.11	4185862.20	313.25
27	500707.02	4186780.82	265.53
28	489395.75	4183314.01	117.06
29	493173.27	4184046.11	636.98
30	498878.96	4184703.78	235.93
31	499352.29	4183038.28	163.08

➤ Σημεία από μετρήσεις κινηματικού εντοπισμού GPS.

Οι μετρήσεις για την απόκτηση των σημείων ελέγχου, πραγματοποιήθηκαν τον μήνα Ιούλιο 2013 και κάλυπταν σχεδόν όλη την περιοχή και κυρίως το κεντρικό τμήμα της (Εικόνα 5.6), με στόχο την καλύτερη δυνατή κάλυψη του αναγλύφου. Παρόλα αυτά αντιμετωπίστηκαν δυσκολίες σε κάποια σημεία, είτε λόγω της δύσβατης περιοχής, είτε λόγω της αδυναμίας πρόσβασης σε κάποια τμήματα κυρίως εξαιτίας των ιδιοκτησιών που υπήρχαν σε αυτά ή και λόγω έλλειψης σήματος από δορυφόρους.



Εικόνα 5.6-Κατανομή των σημείων ελέγχου
(ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής)



Εικόνα 5.7-Κατανομή σημείων ελέγχου
(GoogleEarth)

Τα σημεία που επιλέχθηκαν να μετρηθούν ήταν κυρίως στους πρόποδες και στις κορυφές λόφων και βουνών καθώς επίσης και στις ρεματιές (μισγάγγειες), με στόχο την καταγραφή των υψηλότερων και χαμηλότερων σημείων της περιοχής. Επίσης μετρήσεις λήφθηκαν και σε ήπιο ανάγλυφο.

Τα σημεία μετρήθηκαν με τη μέθοδο του γρήγορου κινηματικού εντοπισμού (RTK) με όργανο της Leica (GPS 1200) αλλά και με τη μέθοδο του post processing kinematic (PPK), με όργανο Trimble 4700 (GPS Total Station). Τα σημεία που μετρήθηκαν με την πρώτη μέθοδο ήταν 112, ενώ με τη δεύτερη 14. Η ακρίβεια και στις δύο περιπτώσεις ήταν καλύτερη των 3cm.

Για τα 112 σημεία οι μετρήσεις έδιναν απευθείας την οριζοντιογραφική τους θέση X, Y στο ΕΓΣΑ87 και το γεωμετρικό τους υψόμετρο, h. Η μετατροπή του γεωμετρικού υψόμετρου σε ορθομετρικό H, έγινε με το εργαλείο μετατροπής της HEPOS (hepos transformation tool), που βρίσκεται στην επίσημη σελίδα της (<http://www.hepos.gr/>), και το οποίο εγκαταστάθηκε στον Η/Υ. Στη συνέχεια εισήχθη ο πίνακας με τις συντεταγμένες X, Y, h και μετατράπηκε με μια επιλογή σε X, Y, H.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μέτρηση των 14 σημείων, ήταν η τοποθέτηση της βάση του οργάνου σε γνωστό τριγωνομετρικό σημείο της περιοχής και στη συνέχεια η καταγραφή των σημείων ενδιαφέροντος με τη βοήθεια του δέκτη. Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε στον Η/Υ, ενώ το πρόγραμμα έδωσε συντεταγμένες X, Y στο ΕΓΣΑ87 και ορθομετρικό υψόμετρο H. Συνεπώς στην περίπτωση αυτή δε χρειάστηκε κάποιο είδος μετασχηματισμού.

Πίνακας 5.3-Συντεταγμένες σημείων ελέγχου περιοχής.

a/a	X (m)	Y (m)	H (m)	a/a	X (m)	Y (m)	H (m)
1	492301.52	4191656.65	240.24	64	497681.04	4187268.18	225.99
2	492352.18	4191584.92	227.75	65	497400.67	4186656.04	271.49
3	492682.98	4191374.16	98.09	66	497387.42	4186570.22	250.66
4	492195.47	4189527.23	94.47	67	496900.84	4186110.75	182.77
5	492004.46	4189807.32	141.17	68	496588.36	4186752.72	168.19
6	493790.33	4190085.68	70.68	69	496890.76	4186778.94	249.50
7	494313.51	4190958.93	87.64	70	496935.91	4187092.72	174.67
8	494306.27	4190957.59	87.14	71	496877.46	4187598.49	234.67
9	494150.74	4190995.44	70.96	72	496204.07	4187708.95	182.05
10	495263.84	4190116.63	145.31	73	498395.02	4187257.87	242.06
11	494236.15	4190795.57	63.56	74	498318.54	4186521.12	255.75
12	495326.76	4191592.35	67.03	75	498398.09	4186834.15	222.95
13	495392.55	4191396.97	48.35	76	499715.84	4186523.65	206.39
14	495902.89	4192337.29	60.51	77	498890.35	4187427.93	170.20
15	495704.36	4192174.73	48.74	78	499277.53	4187604.89	149.91
16	493884.46	4193633.49	68.73	79	499766.59	4187552.72	194.71
17	493471.77	4194184.49	73.54	80	498808.16	4187877.20	187.38
18	493061.84	4194937.71	63.14	81	499046.23	4187803.04	213.03
19	492989.05	4194986.36	69.55	82	499119.37	4188427.97	164.21
20	493546.84	4195161.36	68.50	83	499292.50	4189133.29	211.62
21	493789.64	4194932.72	68.20	84	499651.60	4188572.34	208.65
22	493803.77	4194995.67	55.53	85	498797.92	4189251.66	207.12
23	493545.25	4192799.11	74.81	86	498786.05	4188817.46	206.29
24	492353.21	4193335.93	80.88	87	498571.79	4191536.59	103.33
25	491434.96	4193688.85	116.01	88	498666.13	4191597.05	113.52
26	491081.99	4193623.24	134.80	89	498456.29	4192158.37	76.50
27	490087.39	4193305.00	104.76	90	498187.70	4191895.06	87.82
28	491332.78	4192693.69	87.31	91	497704.42	4192034.87	62.71
29	491152.06	4192394.57	139.94	92	497619.18	4192101.37	79.05
30	493702.90	4186693.40	149.01	93	498782.23	4190764.63	159.16
31	493836.91	4186685.34	176.03	94	498370.93	4191192.45	97.64
32	494725.53	4186039.74	193.03	95	496735.91	4192838.46	32.38
33	494570.31	4186141.72	215.16	96	497314.69	4193616.71	32.97
34	495003.15	4186249.20	206.28	97	499840.73	4192362.93	66.61
35	495029.57	4185598.59	221.00	98	500845.38	4191809.33	69.13
36	494426.07	4184871.84	369.96	99	501100.59	4191582.55	67.63
37	494980.33	4184562.00	400.74	100	500480.85	4192237.20	112.36
38	494318.57	4184388.26	493.47	101	501184.15	4192185.03	0.51
39	495391.91	4185280.83	222.92	102	501427.53	4191631.04	0.65
40	495729.77	4186251.81	157.25	103	500455.59	4191200.71	61.00
41	495704.15	4186684.67	132.13	104	500193.44	4191506.81	98.62
42	496058.23	4187144.35	199.41	105	500681.68	4191586.43	35.78
43	496122.22	4186829.27	148.22	106	501399.31	4191059.49	3.65
44	495392.38	4187553.68	135.52	107	500435.47	4189952.52	170.16
45	495854.85	4187741.16	156.89	108	501147.74	4190681.19	24.87
46	494387.57	4187769.38	105.08	109	500653.24	4190468.27	81.31
47	494224.95	4187774.33	99.00	110	501329.81	4190256.61	91.72
48	495115.89	4187211.63	114.80	111	501834.53	4190621.13	10.51
49	494947.71	4187109.37	129.54	112	501857.49	4189718.22	37.22
50	493744.11	4186859.10	159.00	113	494299.26	4191700.76	86.63
51	494190.32	4187325.79	112.52	114	494326.86	4191760.79	97.70
52	493550.84	4187556.07	115.92	115	494660.03	4191539.70	76.85
53	492469.36	4187343.15	103.11	116	494865.06	4191792.41	71.05
54	492599.30	4187955.11	94.02	117	494948.55	4191907.79	83.39
55	492414.28	4186919.95	108.42	118	494917.59	4191858.31	77.20
56	492112.24	4186260.88	127.65	119	494755.54	4192172.19	68.54
57	492162.24	4186224.31	120.40	120	494590.61	4192206.20	73.00
58	492070.37	4185833.35	147.63	121	494248.11	4192264.42	97.30
59	492311.36	4185431.07	165.21	122	492879.66	4190385.55	76.46
60	493272.96	4186405.97	181.01	123	492539.33	4191268.95	113.57
61	498040.52	4187528.09	248.94	124	492478.95	4191290.04	132.21
62	498012.14	4188757.72	468.31	125	492913.29	4191195.21	75.46
63	497228.97	4189142.28	574.33	126	493200.87	4191685.70	74.24

5.3 Δεδομένα Ελέγχου

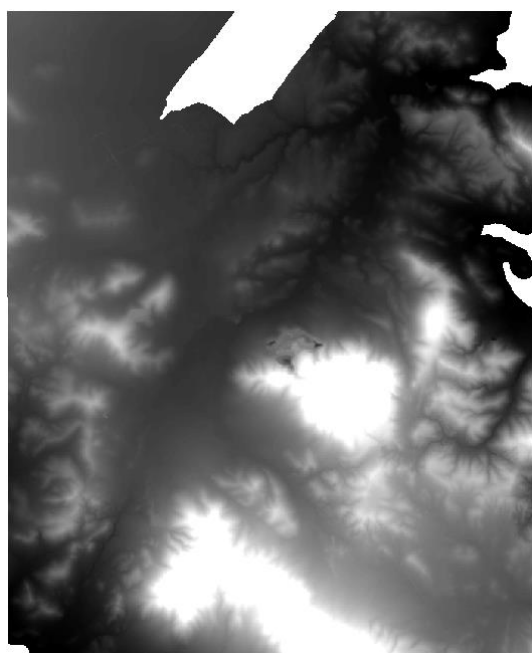
Τα δεδομένα ελέγχου είναι τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους τα οποία υπόκεινται στον έλεγχο ποιότητας και ακρίβειας. Αυτά είναι τα εξής:

- Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της Κτηματολόγιο Α.Ε. με βήμα 5m, το οποίο αναλύθηκε παραπάνω. Αν και θεωρήθηκε μοντέλο αναφοράς στον έλεγχο raster-to-raster, ελέγχθηκε με σημεία GPS και τριγωνομετρικά σημεία, για να επιβεβαιωθεί η ακρίβειά του και να αξιολογηθεί η προσαρμογή του στο τοπικό ανάγλυφο.
- Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του ΟΚΧΕ με βήμα 10m. Το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ καλύπτει όλη την Αττική και προέκυψε από αεροφωτογραφίες κλίμακας 1:15.000, οι οποίες ελήφθησαν τον Ιούλιο του 2010. Το ΨΜΕ δημιουργήθηκε με αυτόματες διαδικασίες χωρίς διορθώσεις από τον χειριστή.
- Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους από δεδομένα SRTM με βήμα 67m. Αναλυτική αναφορά στα δεδομένα SRTM έγινε στην Ενότητα 3.2.
- Το GDEM v.2 (δεύτερης έκδοσης) του δέκτη ASTER, με βήμα 27m, το οποίο παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.1.4.

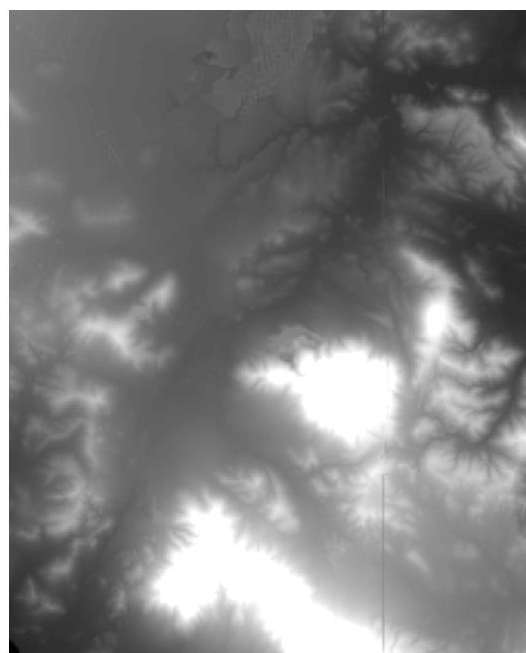
Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι το βήμα των δύο τελευταίων ΨΜΕ, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, θα έπρεπε να είναι 90m και 30m αντίστοιχα. Αυτό δε συμβαίνει στην προκειμένη περίπτωση λόγω της μετατροπής των ψηφιακών μοντέλων εδάφους της περιοχής, από το WGS84 στο ΕΓΣΑ87, αλλά και εξαιτίας του γεωγραφικού μήκους και πλάτους της περιοχής.

Παρακάτω παρουσιάζονται και τα τέσσερα ελεγχθέντα ψηφιακά μοντέλα εδάφους της περιοχής ενδιαφέροντος (Εικόνα 5.8).

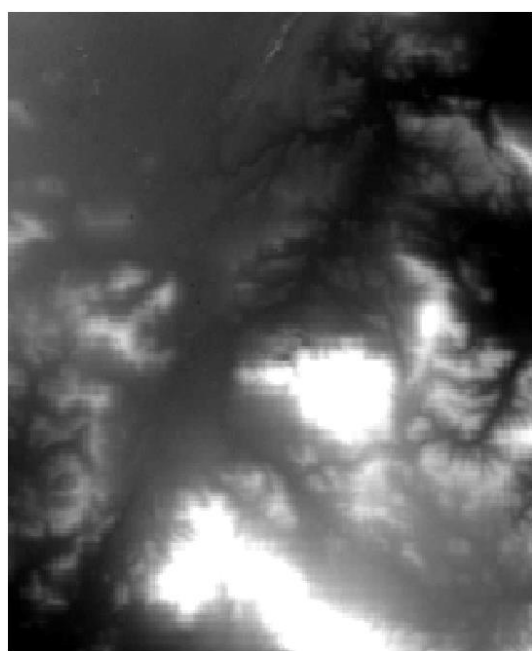
Όπως παρατηρείται, το ΨΜΕ SRTM φαίνεται να είναι αυτό με τη χαμηλότερη ανάλυση, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω του μεγαλύτερου βήματος σε σχέση με τα υπόλοιπα. Ακολουθεί το ASTER GDEM, καθώς και αυτό έχει μεγαλύτερο βήμα σε σχέση με αυτό της Κτηματολόγιο Α.Ε. και του ΟΚΧΕ, στα οποία με μια πρώτη ματιά δε φαίνεται κάποια εμφανής διαφορά. Επίσης το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. έχει κενά στη θέση του αεροδρομίου και στις υδάτινες επιφάνειες.



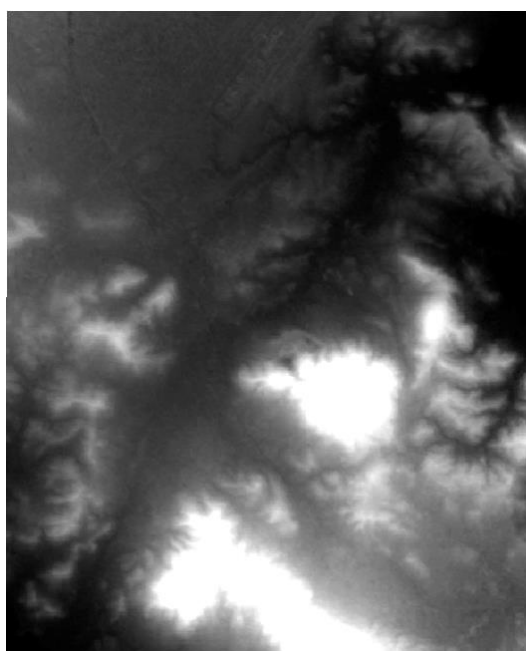
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 5.8-Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους της περιοχής, (α) Κτηματολόγιο Α.Ε., (β) ΟΚΧΕ ΟΕ, (γ) SRTM, (γ) ASTER GDEM v.2.

Κεφάλαιο 6

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΛΕΓΧΩΝ

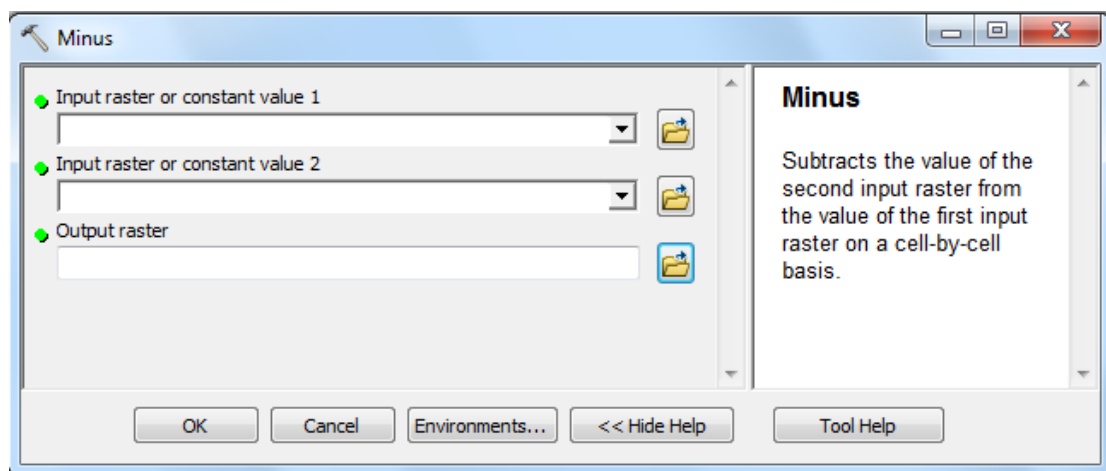
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον έλεγχο των ψηφιακών μοντέλων εδάφους. Αρχικά γίνεται ο στατιστικός έλεγχος με τις μεθόδους raster – to – raster και raster – to – point και στη συνέχεια ο οπτικός έλεγχος, με οπτικοποίηση διάφορων συνιστωσών, όπως είναι η κλίση, το υψομετρικό προφίλ κ.α. Επίσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και κάποια πρώτα συμπεράσματα.

6.1 Στατιστικοί Έλεγχοι

Οι στατιστικοί έλεγχοι αφορούν στην ερμηνεία των στατιστικών μεγεθών που υπολογίζονται. Από τις υψομετρικές διαφορές που προκύπτουν είτε με τον raster – to – raster, είτε με τον raster – to – point έλεγχο, υπολογίζονται διάφορα στατιστικά μεγέθη και εξάγονται συμπεράσματα από τις τιμές τους. Όλα τα στατιστικά μεγέθη που υπολογίζονται αφορούν τις υψομετρικές διαφορές (Ζγνωστό-Ζελεγχόμενο).

6.1.1 Έλεγχος raster – to – raster

Χρησιμοποιώντας το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. ως αναφοράς, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, αφαιρείται κάθε φορά από αυτό, κάθε υπό έλεγχο ΨΜΕ. Η αφαίρεση γίνεται με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS, με την εντολή minus, από το μενού 3DAnalyst, RasterMath.



Εικόνα 6.1-Εντολή αφαίρεσης εικόνων στο ArcGIS.

Με τη χρήση αυτής της εντολής, η αφαίρεση γίνεται στα κοινά τμήματα των δύο ΨΜΕ και για κάθε εικονοστοιχείο, με διατήρηση του μεγέθους φατνίου του προς έλεγχο ΨΜΕ. Το αποτέλεσμα της αφαίρεσης είναι μια νέα εικόνα η οποία περιέχει

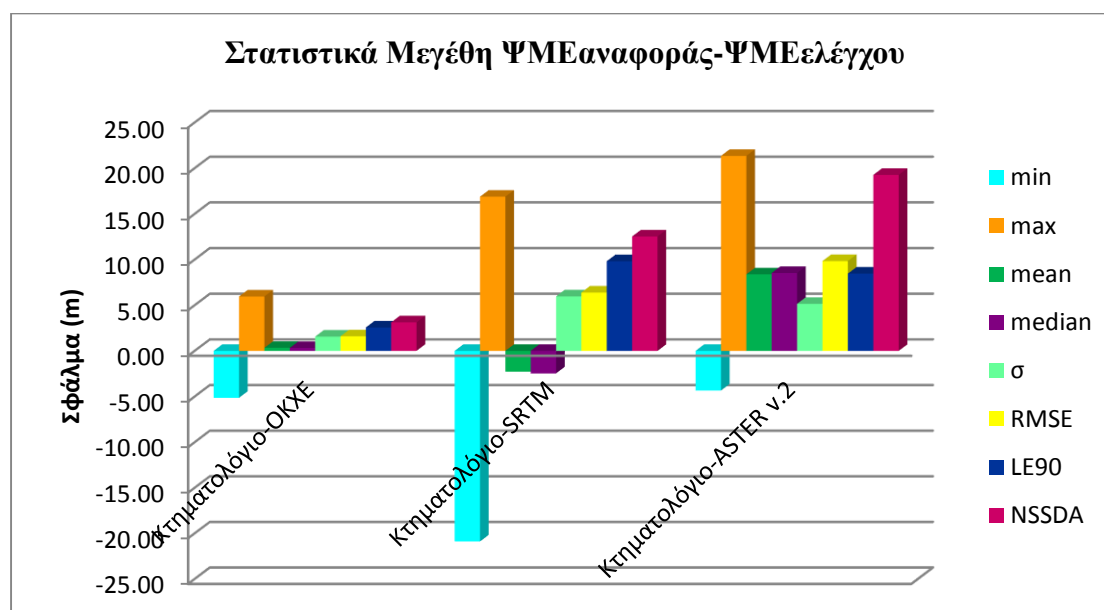
σαν τρίτη διάσταση τις τιμές των υψομετρικών διαφορών. Από αυτές τις τιμές στη συνέχεια υπολογίζονται τα στατιστικά μεγέθη.

Να αναφερθεί ότι το ArcGIS, δίνει από μόνο του κάποια στατιστικά μεγέθη για κάθε εικόνα και συγκεκριμένα τη μέγιστη τιμή, την ελάχιστη, το μέσο όρο και την τυπική απόκλιση. Παρόλα αυτά δε δίνει επιπλέον σημαντικά μεγέθη όπως είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, η διάμεσος κ.α.

Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Matlab. Αρχικά, εξήχθη ο πίνακας των τιμών της εικόνας που προήλθε από την εκάστοτε αφαίρεση από το ArcGIS, δηλαδή ο πίνακας που περιέχει για κάθε εικονοστοιχείο την αντίστοιχη υψομετρική διαφορά, σε ένα αρχείο (.txt), και εισήχθη στο λογισμικό Matlab. Σε αυτό έγιναν οι υπολογισμοί των υπόλοιπων στατιστικών μεγεθών, με τη σύνταξη ενός κώδικα αλλά και με εντολές που υπάρχουν στο λογισμικό. Μάλιστα υπολογίστηκαν ξανά και επιβεβαιώθηκαν τα στατιστικά μεγέθη που δίνει το ArcGIS. Στη συνέχεια αφαιρέθηκαν τα χονδροειδή σφάλματα, υπολογίζοντας τα όρια $\text{mean} \pm 2\sigma$, εκτός των οποίων εντοπίζονται τα σφάλματα αυτά. Αφού αφαιρέθηκαν, υπολογίστηκαν εκ νέου τα στατιστικά μεγέθη, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1 και στο παρακάτω διάγραμμα.

Πίνακας 6.1-Στατιστικά μεγέθη σε μέτρα, ΨΜΕ αναφοράς-ΨΜΕ ελέγχου.

	min	max	mean	median	σ	RMSE	LE90	NSSDA
ΔZ_{OKXE}	-5.15	5.95	0.33	0.32	1.56	1.59	2.56	3.12
ΔZ_{SRTM}	-20.89	16.88	-2.28	-2.47	5.97	6.39	9.82	12.52
ΔZ_{ASTER}	-4.34	21.34	8.38	8.53	5.14	9.83	8.47	19.27



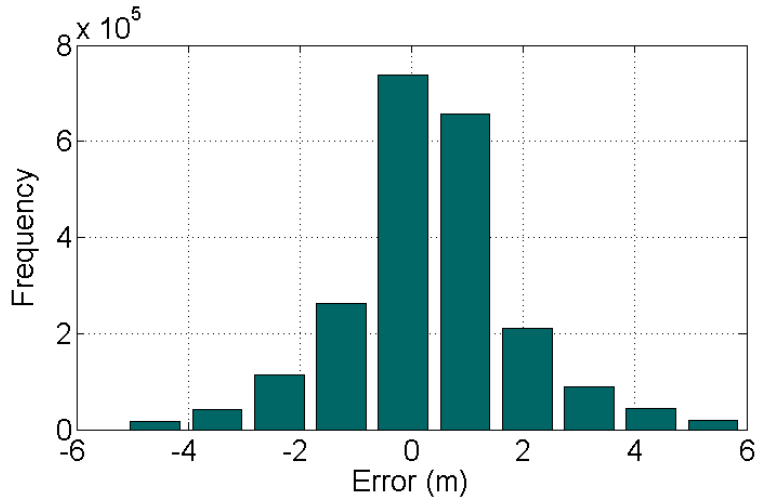
Διάγραμμα 6.1 –Στατιστικά μεγέθη ελέγχου με ΨΜΕ αναφοράς.

Τα συμπεράσματα από αυτό τον έλεγχο είναι τα εξής:

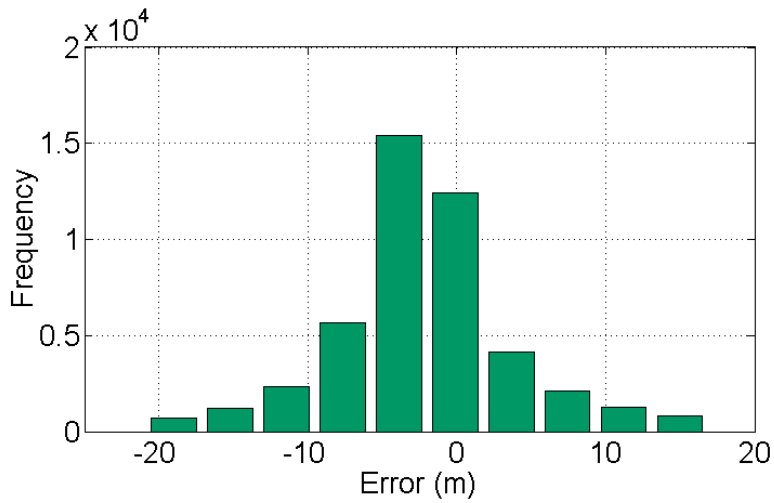
- Ο μέσος όρος των διαφορών με το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ δεν είναι κοντά στο μηδέν, παρόλα αυτά τα 33cm είναι μέσα στην αβεβαιότητα των μεθόδων, συνεπώς δεν προκύπτει σαφής συστηματική διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων. Επίσης, παρατηρείται μια μικρή διαφορά στις τιμές της τυπικής απόκλισης και του RMS σφάλματος. Συστηματικό σφάλμα εντοπίζεται στις περιπτώσεις των άλλων δύο ΨΜΕ και κυρίως σε αυτό του ASTER, καθώς τόσο ο μέσος όρος, όσο και η αρκετά μεγάλη διαφορά στις τιμές της τυπικής απόκλισης και του RMSE υποδηλώνουν την ύπαρξη συστηματικών σφαλμάτων σε αυτό.
- Η διάμεσος των διαφορών με το ΨΜΕ του SRTM, δηλώνει ότι το 50% των διαφορών είναι μικρότερο των -2.47m, κάτι το οποίο υποδηλώνει μια συστηματική μετατόπιση του ΨΜΕ SRTM και μάλιστα φαίνεται να βρίσκεται «υψηλότερα» από αυτό της Κτηματολόγιο Α.Ε.
- Από το γραμμικό σφάλμα LE90, με πιθανότητα 90% τη μικρότερη διακύμανση σφαλμάτων παρουσιάζει το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του ΟΚΧΕ καθώς αυτά εντοπίζονται μεταξύ των ορίων $\pm 2.56m$, σε αντίθεση με αυτό του SRTM που το 90% των σφαλμάτων εντοπίζονται μεταξύ των ορίων $\pm 9.82m$ και του ASTER που τα όρια είναι ελαφρώς μικρότερα.
- Επίσης, από την τυπική απόκλιση φαίνεται ότι το 68% των σφαλμάτων, στην περίπτωση του ΨΜΕ ΟΚΧΕ, αναμένεται εντός των ορίων $\pm 1.56m$, ενώ μεγαλύτερο εύρος σφαλμάτων για την αντίστοιχη πιθανότητα εντοπίζεται στις άλλες δύο περιπτώσεις και κυρίως σε αυτή του ΨΜΕ SRTM που αναμένεται μεταξύ $\pm 5.97m$.
- Τις μεγαλύτερες μέγιστες και ελάχιστες διαφορές με το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., παρουσιάζει το ΨΜΕ του SRTM.
- Τέλος, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, καλύτερη είναι η ακρίβεια στην περίπτωση του ΨΜΕ του ΟΚΧΕ, σε αντίθεση με τις άλλες δύο περιπτώσεις και ιδιαίτερα με αυτή του ASTER, το οποίο παρουσιάζει τη χειρότερη όλων (19.27m).

Από όλα τα παραπάνω, στην περίπτωση του ελέγχου της ακρίβειας των ΨΜΕ με τη μέθοδο raster – to – raster, εξάγεται το συμπέρασμα ότι περισσότερο ακριβές είναι το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ, καθώς φαίνεται να «πλησιάζει» περισσότερο το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. Λιγότερο ακριβές μοιάζει να είναι το ΨΜΕ που έχει προκύψει από δεδομένα SRTM, αν και δεν υπάρχει σημαντική διαφορά με αυτό του δέκτη ASTER.

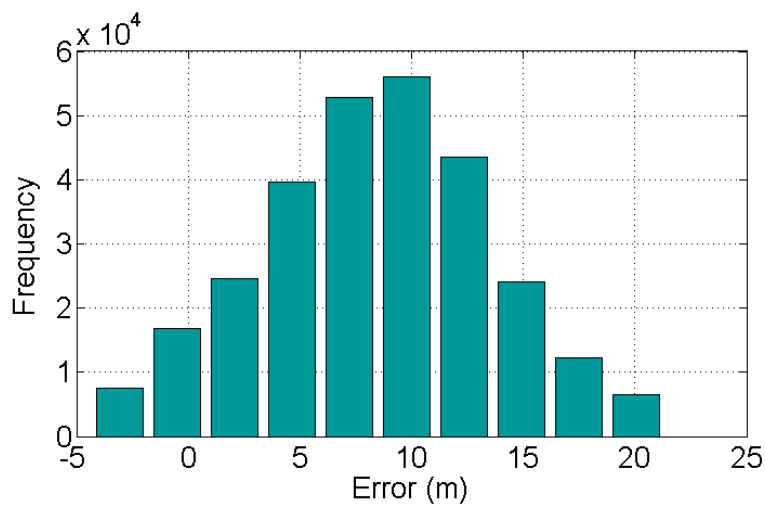
Επιπλέον υπολογίστηκαν τα ιστογράμματα συχνοτήτων των υψομετρικών διαφορών σε κάθε περίπτωση ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Τα ιστογράμματα υπολογίστηκαν σε περιβάλλον Matlab, με ομαδοποίηση των στοιχείων του εκάστοτε πίνακα υψομετρικών διαφορών και υπολογισμό της συχνότητας εμφάνισής τους. Τα αποτελέσματα ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.2-Ιστόγραμμα συχνοτήτων υψομετρικών διαφορών ΨΜΕ ΟΚΧΕ με ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε.



Διάγραμμα 6.3-Ιστόγραμμα συχνοτήτων υψομετρικών διαφορών ΨΜΕ SRTM με ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε.

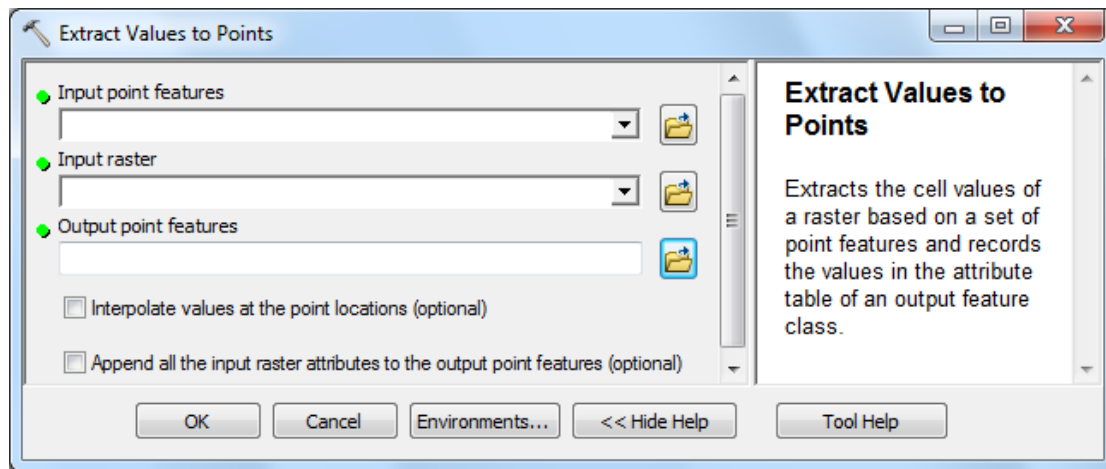


Διάγραμμα 6.4-Ιστόγραμμα συχνοτήτων υψομετρικών διαφορών ΨΜΕ ASTER με ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε.

Όπως φαίνεται στα παραπάνω ιστογράμματα, γενικά επιβεβαιώνονται τα αποτελέσματα από τον έλεγχο των στατιστικών μεγεθών. Συγκεκριμένα, παρατηρούνται μικρές διαφορές μεταξύ ΨΜΕ ΟΚΧΕ και Κτηματολόγιο Α.Ε., καθώς τα περισσότερα σφάλματα εντοπίζονται στην περιοχή γύρω από το μηδέν. Στην περίπτωση του SRTM, οι περισσότερες διαφορές εντοπίζονται στα 0-5m περίπου, ενώ μεγαλύτερες είναι οι αποκλίσεις του ΨΜΕ του ASTER από το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., όπου η πλειονότητα των διαφορών βρίσκονται μεταξύ των 7-10 μέτρων κυρίως. Επιπλέον, οι περισσότερες διαφορές στην περίπτωση του ASTER είναι θετικές, κάτι το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα της συστηματικής μετατόπισης του μοντέλου σε χαμηλότερα επίπεδα από το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε.

6.1.2 Έλεγχος με τριγωνομετρικά σημεία

Ο έλεγχος με τη χρήση των γνωστών τριγωνομετρικών σημείων της περιοχής (μέθοδος raster-to-point), έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS και συγκεκριμένα με την εντολή «Extract values to points», από το μενού Spatial Analyst του ArcToolbox (Εικόνα 6.2). Το εργαλείο αυτό δέχεται ως δεδομένα εισόδου, ένα αρχείο σημειακής καταγραφής (.shp) στο οποίο είναι καταγεγραμμένη η θέση της υψομετρικής πληροφορίας με το αντίστοιχο υψόμετρο, και ένα ΨΜΕ. Το αποτέλεσμα είναι, επίσης, ένα αρχείο σημειακής καταγραφής στο οποίο είναι καταγεγραμμένες οι αντίστοιχες τιμές υψομέτρου που προέκυψαν από το εκάστοτε ΨΜΕ.



Εικόνα 6.2-Εντολή εξαγωγής υψομετρικής πληροφορίας σε συγκεκριμένες οριζοντιογραφικές θέσεις.

Αφού εξήχθησαν για τα δεδομένα τριγωνομετρικά σημεία τα αντίστοιχα υψόμετρα από κάθε ΨΜΕ, επεξεργάστηκαν σε υπολογιστικό φύλλο του excel. Εκεί υπολογίστηκαν οι διαφορές $Z_{\text{τριγωνομετρικό}} - Z_{\text{ΨΜΕ}}$ και για αυτές υπολογίστηκαν διάφορα στατιστικά μεγέθη.

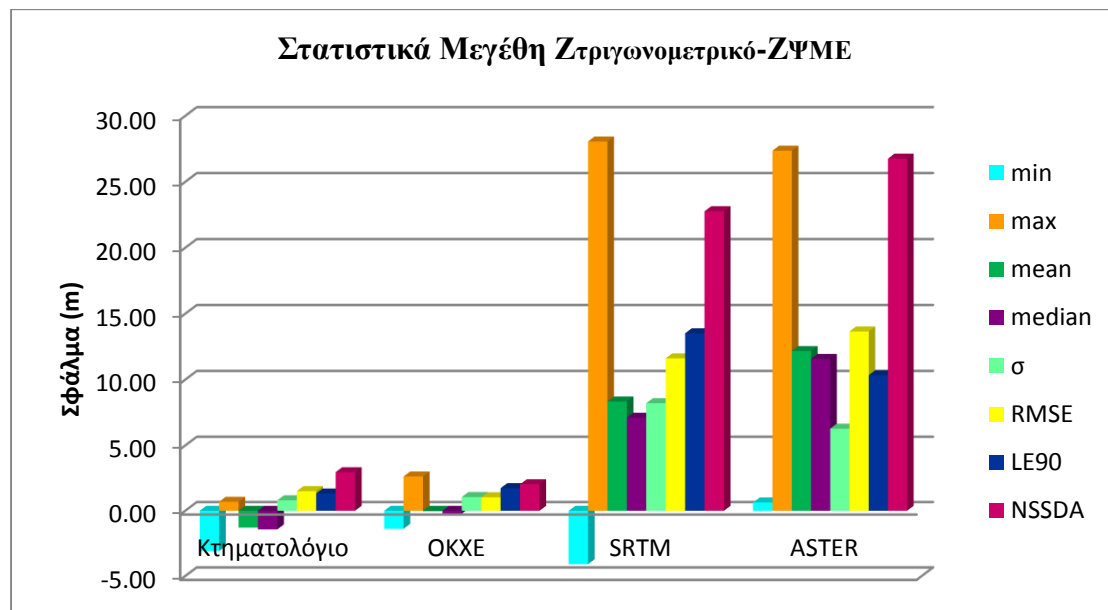
Ακολούθησε ο υπολογισμός των ορίων, εντός των οποίων οι υψομετρικές διαφορές δεν περιέχουν χονδροειδή σφάλματα. Τα όρια αυτά προσδιορίστηκαν από τη σχέση $\text{mean} \pm 2\sigma$ και όσες υψομετρικές διαφορές βρίσκονταν εκτός αυτών των τιμών, αφαιρέθηκαν για κάθε ΨΜΕ. Έτσι στην περίπτωση των ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., του ΟΚΧΕ και του SRTM αφαιρέθηκαν 2 τριγωνομετρικά σημεία που

παρουσίαζαν χονδροειδές σφάλμα σε σχέση με αυτά, ενώ στην περίπτωση του ASTER αφαιρέθηκε 1 σημείο.

Τα στατιστικά μεγέθη υπολογίστηκαν εκ νέου και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2 και στο παρακάτω διάγραμμα.

Πίνακας 6.2-Στατιστικά μεγέθη σε μέτρα, Τριγωνομετρικό-ΨΜΕ.

	min	max	mean	median	σ	RMSE	LE90	NSSDA
$\Delta Z_{\text{κτημ.}}$	-3.08	0.69	-1.28	-1.42	0.81	1.51	1.32	2.96
$\Delta Z_{\text{ΟΚΧΕ}}$	-1.38	2.63	-0.04	-0.22	1.06	1.04	1.74	2.04
ΔZ_{SRTM}	-4.09	28.06	8.35	7.12	8.22	11.62	13.52	22.77
ΔZ_{ASTER}	0.64	27.36	12.17	11.58	6.29	13.65	10.34	26.76



Διάγραμμα 6.5-Στατιστικά μεγέθη ελέγχου με τριγωνομετρικά σημεία.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι τα εξής:

- Στην περίπτωση του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., παρατηρείται ένα συστηματικό σφάλμα της τάξης των -1.28m , καθώς ο μέσος όρος των διαφορών είναι διάφορος του μηδενός. Το ίδιο παρατηρείται στα ΨΜΕ των SRTM και ASTER με αντίστοιχα συστηματικά σφάλματα των 8.35 και 12.17m , αντίστοιχα. Το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ φαίνεται να μην έχει συστηματικό σφάλμα, αφού ο μέσος όρος των διαφορών είναι πολύ κοντά στο μηδέν.
- Μεγάλες διαφορές μεταξύ τυπικής απόκλισης και RMS σφάλματος, παρατηρούνται στις περιπτώσεις του SRTM και κυρίως του ASTER, κάτι το οποίο επιβεβαιώνει την ύπαρξη συστηματικού σφάλματος. Επιπλέον, μικρότερη διαφορά εντοπίζεται στην περίπτωση του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., ενώ ελάχιστη διαφορά μεταξύ αυτών των τιμών παρατηρείται στο ΨΜΕ

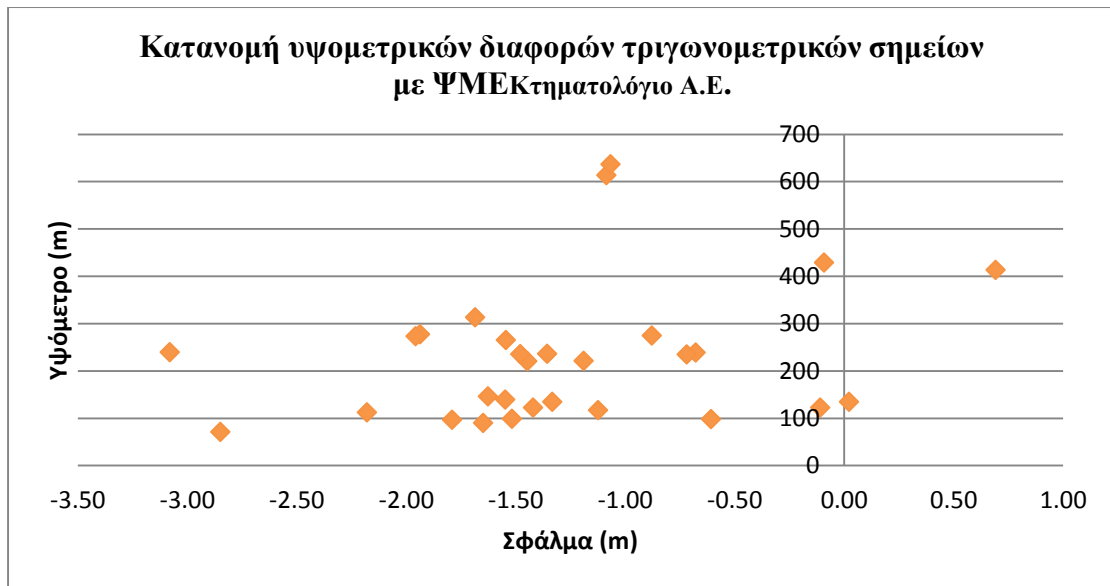
του ΟΚΧΕ, κάτι το οποίο επιβεβαιώνει την απουσία συστηματικού σφάλματος.

- Το γενικό σφάλμα του ΨΜΕ του ΟΚΧΕ είναι το μικρότερο όλων και ίσο με 1.04m, ενώ ακολουθεί αυτό της Κτηματολόγιο Α.Ε., με σφάλμα 1.51m και τελευταίο του ASTER με σφάλμα 13.65m.
- Καλύτερη ακρίβεια για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% παρατηρείται στην περίπτωση του ΨΜΕ του ΟΚΧΕ (2.04m) και ακολουθεί το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. με 2.96m, η οποία είναι εντός των προβλεπόμενων ορίων. Αντίθετα, η χειρότερη ακρίβεια για το ίδιο επίπεδο εμπιστοσύνης εμφανίζεται στο ΨΜΕ του ASTER και συγκεκριμένα με μέτρο 26.76m, κάτι το οποίο δε συνάδει με τις προδιαγραφές του μοντέλου, οι οποίες θέλουν την ακρίβεια αυτή στα 17m.
- Η τυπική απόκλιση στην περίπτωση του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. δηλώνει ότι το 68% των σφαλμάτων εντοπίζεται στην περιοχή $\pm 0.81m$, το οποίο είναι και το μικρότερο εύρος, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα ΨΜΕ και κυρίως με αυτό του SRTM, του οποίου το 68% των σφαλμάτων βρίσκεται εντός των ορίων $\pm 8.22m$.
- Αντίστοιχα ισχύουν και για το γραμμικό σφάλμα LE90, όπου στο ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. φαίνεται το 90% των σφαλμάτων να βρίσκεται εντός των ορίων $\pm 1.32m$, το οποίο είναι και το μικρότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα ΨΜΕ, με χειρότερο και πάλι το ΨΜΕ SRTM με τα αντίστοιχα όρια να είναι $\pm 13.52m$.
- Τέλος, μεγαλύτερες μέγιστες και ελάχιστες διαφορές εντοπίζονται στον έλεγχο των ΨΜΕ SRTM και ASTER.

Συνεπώς στον έλεγχο με τριγωνομετρικά σημεία, φαίνεται ότι το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ παρουσιάζει την καλύτερη ακρίβεια για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και το μικρότερο γενικό σφάλμα, ενώ δεν φαίνεται να έχει συστηματικά σφάλματα. Παρόλα αυτά, από την τυπική απόκλιση και το γραμμικό σφάλμα LE90, παρατηρείται ότι για το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. το μεγαλύτερο ποσοστό των σφαλμάτων εντοπίζεται σε πιο μικρά όρια τιμών, σε σχέση με το αντίστοιχο του ΟΚΧΕ.

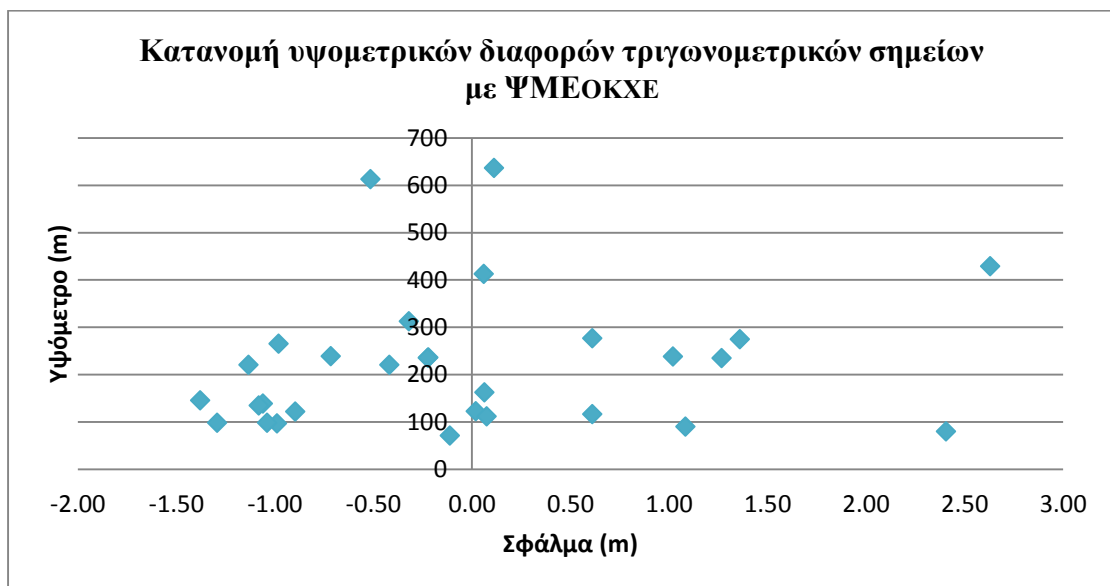
Τέλος, από τα παραπάνω μοιάζει να ανταποκρίνεται λιγότερο στην πραγματικότητα το ΨΜΕ του ASTER, καθώς μειονεκτεί σε σχέση με το ΨΜΕ του SRTM σε όλες τις παραμέτρους που εξετάζονται, αν και το μεγαλύτερο ποσοστό των σφαλμάτων εντοπίζεται σε στενότερα όρια τιμών από το ΨΜΕ SRTM.

Επιπλέον δημιουργήθηκαν διαγράμματα κατανομής των υψομετρικών διαφορών που υπολογίστηκαν για όλα τα ΨΜΕ, σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους. Από τα διαγράμματα αυτά έγινε εμφανής η πιθανή μετατόπιση των ψηφιακών μοντέλων σε σχέση με τα τριγωνομετρικά σημεία, ενώ εντοπίστηκαν και τα υψόμετρα στα οποία παρατηρούνται τα μεγαλύτερα σφάλματα σε κάθε περίπτωση.



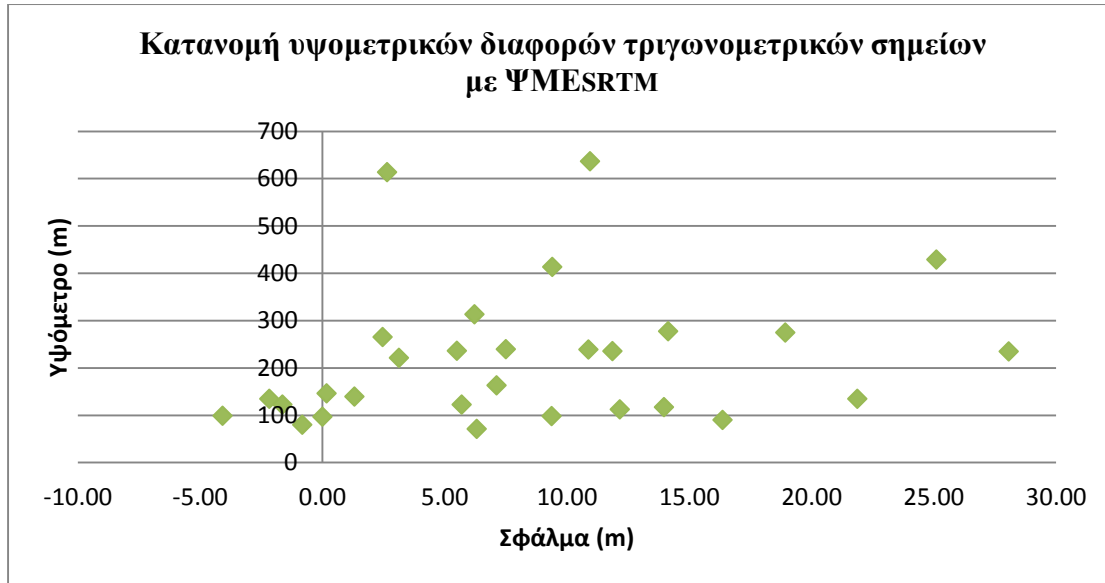
Διάγραμμα 6.6-Κατανομή υψομετρικών διαφορών τριγωνομετρικών σημείων με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της Κτηματολόγιο Α.Ε., σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους.

Από αυτό το διάγραμμα κατανομής, παρατηρείται ότι οι περισσότερες υψομετρικές διαφορές είναι αρνητικές, με πολύ λίγες εξαιρέσεις. Αυτό σημαίνει ότι το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. βρίσκεται «υψηλότερα» σε σχέση με τα τριγωνομετρικά σημεία, με μια μέση μετατόπιση της τάξης των 1-2m περίπου.



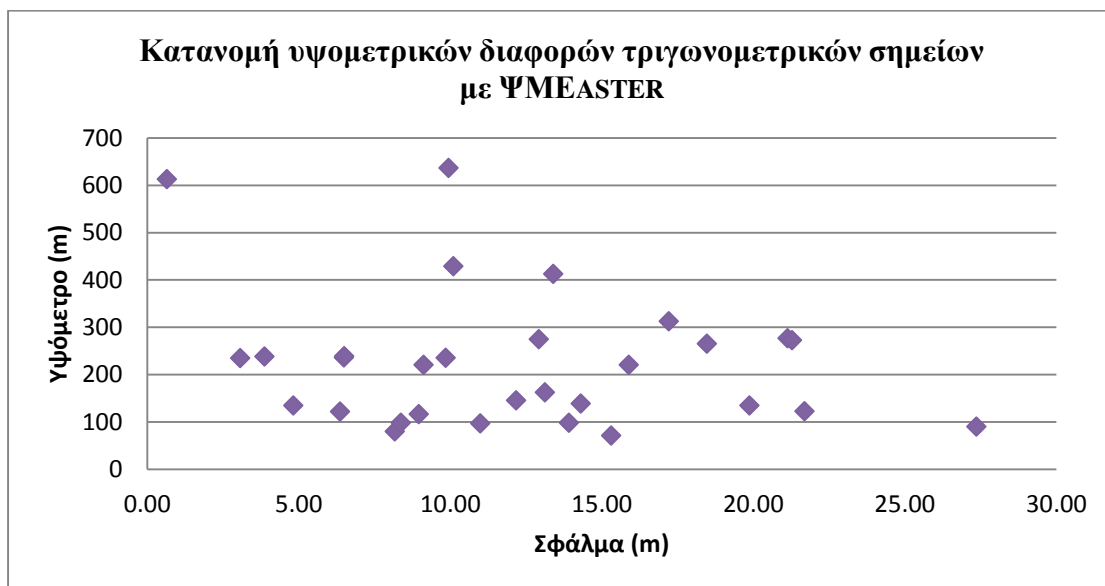
Διάγραμμα 6.7-Κατανομή υψομετρικών διαφορών τριγωνομετρικών σημείων με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του ΟΚΧΕ, σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους.

Σε αυτό το διάγραμμα, δεν παρατηρείται ενιαία συμπεριφορά των υψομετρικών διαφορών. Οι αρνητικές υψομετρικές διαφορές είναι συγκεντρωμένες μεταξύ του 0 και των -1.5m περίπου, ενώ οι θετικές υψομετρικές διαφορές είναι περισσότερο διασκορπισμένες και κυμαίνονται από 0 έως 3m περίπου.



Διάγραμμα 6.8-Κατανομή υψομετρικών διαφορών τριγωνομετρικών σημείων με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους SRTM, σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, η πλειοψηφία των υψομετρικών διαφορών είναι θετικές και με μεγάλο εύρος διακύμανσης, καθώς εντοπίζονται από 0 έως 30m. Συνεπώς το ΨΜΕ του SRTM βρίσκεται χαμηλότερα από τα τριγωνομετρικά σημεία, χωρίς ένα σταθερό μέτρο μετατόπισης (υποεκτίμηση των υψομέτρων).



Διάγραμμα 6.9-Κατανομή υψομετρικών διαφορών τριγωνομετρικών σημείων με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους SRTM, σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους.

Σε αυτή την περίπτωση όλες οι υψομετρικές διαφορές είναι θετικές, κατά συνέπεια το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του ASTER βρίσκεται χαμηλότερα από τα τριγωνομετρικά σημεία, χωρίς όμως σταθερό μέτρο μετατόπισης, καθώς οι διαφορές κυμαίνονται από 0 έως 30m περίπου (υποεκτίμηση των υψομέτρων).

Γενικά τα μεγαλύτερα σφάλματα, σε όλες τις περιπτώσεις, εντοπίζονται κυρίως σε υψόμετρα της τάξης των 100-300m.

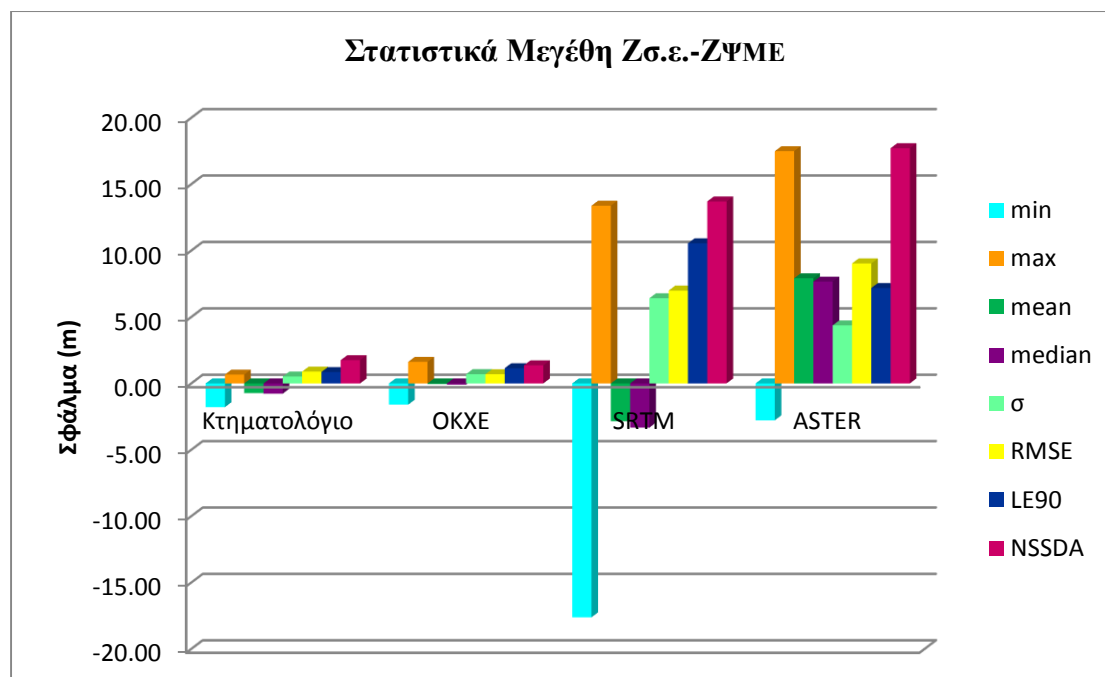
6.1.3 Έλεγχος με σημεία μετρημένα με GPS

Έλεγχος των ΨΜΕ, ξανά με τη μέθοδο raster-to-point, έγινε και με τα σημεία ελέγχου που μετρήθηκαν με GPS, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με τον έλεγχο με τριγωνομετρικά σημεία και με τη χρήση του ίδιου εργαλείου του ArcGIS.

Τα αποτελέσματα από αυτή τη διαδικασία επεξεργάστηκαν σε φύλλο excel και υπολογίστηκαν τα στατιστικά μεγέθη. Ακολούθησε η αφαίρεση των χονδροειδών σφαλμάτων, με τον υπολογισμό των ορίων $\text{mean} \pm 2\sigma$. Οι υψομετρικές διαφορές εκτός αυτών των ορίων θεωρούνται χονδροειδή σφάλματα και αφαιρέθηκαν. Σε κάθε ΨΜΕ εντοπίστηκαν τέτοια σφάλματα σε διαφορετικά σημεία. Στην περίπτωση του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. αφαιρέθηκαν 6 σημεία, στο ΨΜΕ του ΟΚΧΕ 3 σημεία, σε αυτό του SRTM 8 σημεία και στο ΨΜΕ του ASTER αφαιρέθηκαν 6 σημεία. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν εκ νέου τα στατιστικά μεγέθη, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3 και στο Διάγραμμα 6.10.

Πίνακας 6.3-Στατιστικά μεγέθη σε μέτρα, Ζσ.ε.-ΖΨΜΕ.

	min	max	mean	median	σ	RMSE	LE90	NSSDA
$\Delta Z_{\text{κτημ.}}$	-1.79	0.67	-0.73	-0.77	0.52	0.90	0.86	1.75
$\Delta Z_{\text{ΟΚΧΕ}}$	-1.60	1.63	-0.05	-0.09	0.70	0.70	1.15	1.36
ΔZ_{SRTM}	-17.61	13.39	-2.84	-3.32	6.42	6.99	10.56	13.71
ΔZ_{ASTER}	-2.78	17.50	7.92	7.67	4.37	9.04	7.19	17.71



Διάγραμμα 6.10-Στατιστικά μεγέθη με σημεία ελέγχου.

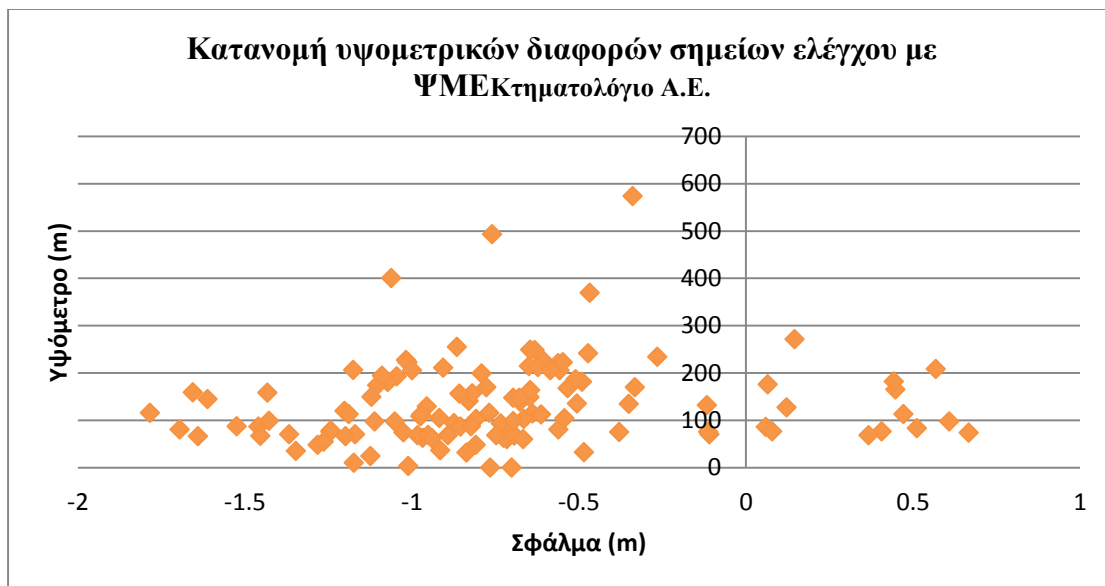
Τα συμπεράσματα από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι τα εξής:

- Ο μέσος όρος στην περίπτωση του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., υποδηλώνει την ύπαρξη συστηματικών σφαλμάτων με μέγεθος της τάξης των -73cm . Αντίστοιχα και στα ΨΜΕ των SRTM και ASTER, που το συστηματικό σφάλμα είναι περίπου -2.84m και 7.92m αντίστοιχα. Αντίθετα το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ φαίνεται να μην έχει συστηματικό σφάλμα, καθώς ο μέσος όρος των υψομετρικών διαφορών είναι σχεδόν ίσος με μηδέν.
- Το γενικό σφάλμα για το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. είναι 90cm , ενώ καλύτερο είναι του ΨΜΕ του ΟΚΧΕ, το οποίο είναι στα 70cm . Μεγαλύτερα είναι τα σφάλματα στα άλλα δυο ΨΜΕ με αυτό του ASTER να εμφανίζει το μεγαλύτερο (9.04m).
- Η διαφορά της τυπικής απόκλισης και του RMS σφάλματος είναι μηδενική στην περίπτωση του ΨΜΕ του ΟΚΧΕ, επιβεβαιώνοντας την απουσία συστηματικού σφάλματος. Μικρότερη διαφορά εντοπίζεται στις περιπτώσεις των ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. και του SRTM σε σχέση με το ΨΜΕ του ASTER.
- Την καλύτερη ακρίβεια για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% την παρουσιάζει το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ (1.36m), με το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. να ακολουθεί (1.75m). Χαμηλότερη ακρίβεια εμφανίζει το ΨΜΕ του ASTER η οποία είναι 17.71m , κάτι που μπορεί να θεωρηθεί εντός των προδιαγραφών του.
- Η διάμεσος στις περιπτώσεις των ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., του ΟΚΧΕ και του SRTM είναι αρνητική, κάτι που υποδηλώνει μια συστηματική μετατόπιση των ΨΜΕ «πάνω» από τα σημεία ελέγχου (υπερεκτίμηση υψομέτρων).
- Σύμφωνα με την τυπική απόκλιση, το 68% των σφαλμάτων, στο ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., εντοπίζεται στην περιοχή $\pm 0.52\text{m}$, ενώ στο ΨΜΕ του ΟΚΧΕ βρίσκεται εντός των ορίων $\pm 0.70\text{m}$. Συνεπώς, το 68% των σφαλμάτων του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο, έχει μικρότερο εύρος σε σχέση με το αντίστοιχο του ΟΚΧΕ. Αντίθετα, μεγαλύτερα είναι τα όρια των σφαλμάτων κυρίως στην περίπτωση του SRTM, τα οποία εντοπίζονται εντός της περιοχής $\pm 6.42\text{m}$.
- Αντίστοιχα για το γραμμικό σφάλμα LE90, από τις τιμές του οποίου συμπεραίνεται ότι το 90% των σφαλμάτων στην περίπτωση του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. έχει και πάλι το μικρότερο εύρος τιμών, αφού αυτά εντοπίζονται μεταξύ των ± 0.86 μέτρων, σε αντίθεση με το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ που βρίσκονται εντός των ± 1.15 μέτρων. Όμοια με τα προηγούμενα, χειρότερο είναι το 90% των σφαλμάτων στην περίπτωση του ΨΜΕ του SRTM, που εντοπίζονται εντός των τιμών $\pm 10.56\text{m}$.
- Μεγαλύτερες μέγιστες και ελάχιστες διαφορές παρατηρούνται στο ΨΜΕ του SRTM, ενώ εντοπίζονται κυρίως μεγάλες αρνητικές τιμές, κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι σε κάποια σημεία ελέγχου αυτό το ΨΜΕ παρουσιάζει μέγιστη απόκλιση από αυτά σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα (βρίσκεται πάνω από τα σημεία ελέγχου).

Στον έλεγχο αυτό, με χρήση σημείων μετρημένων με GPS, παρατηρείται γενικά μια μείωση των μεγεθών σε σχέση με τον έλεγχο με τριγωνομετρικά σημεία. Αυτό πιθανόν οφείλεται, τόσο στο ότι τα τριγωνομετρικά σημεία είναι σαφώς λιγότερα από τα σημεία ελέγχου, όσο και στο ότι γενικά βρίσκονται σε υψηλές θέσεις, που αποτελούν δυσμενέστερες περιπτώσεις, και, προφανώς, το ανάγλυφο δεν περιγράφεται ικανοποιητικά από αυτά.

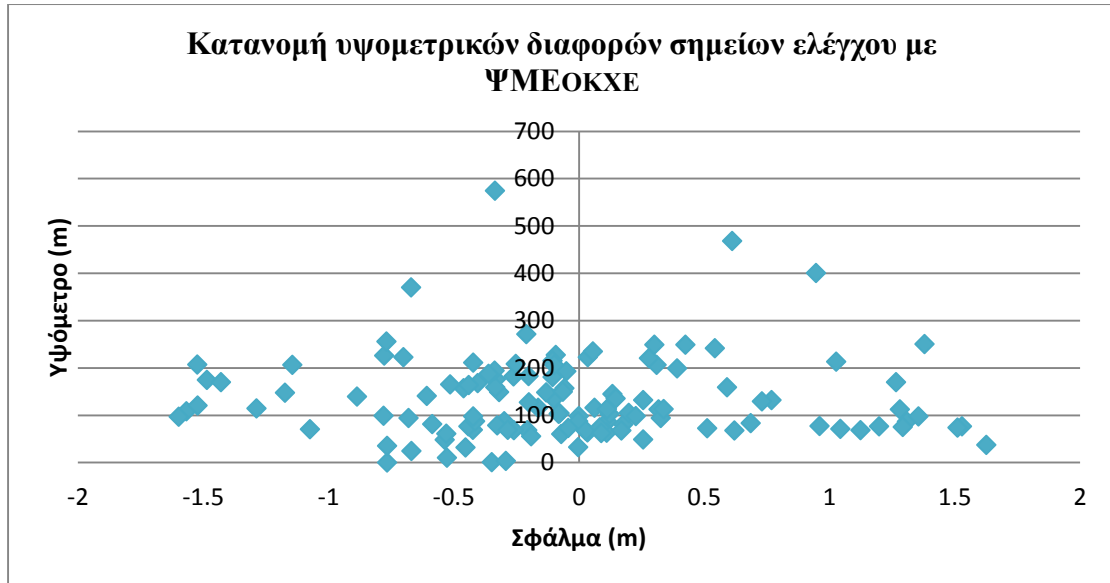
Και σε αυτή την περίπτωση, το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ φαίνεται να μην περιέχει συστηματικά σφάλματα, ενώ επιπλέον παρουσιάζει καλύτερη ακρίβεια για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% σε σχέση με το ΨΜΕ του Κτηματολόγιο Α.Ε., όπως και καλύτερο γενικό σφάλμα. Παρόλα αυτά, η τυπική απόκλιση και το γραμμικό σφάλμα για επίπεδο εμπιστοσύνης 90% είναι μικρότερα στην περίπτωση του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των σφαλμάτων κυμαίνεται σε μικρότερο εύρος τιμών σε σχέση με το αντίστοιχο του ΟΚΧΕ. Επιπλέον, λιγότερο επιτυχημένα περιγράφει το ανάγλυφο της περιοχής το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του δέκτη ASTER.

Και για τον έλεγχο με σημεία GPS, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα κατανομής των υψομετρικών διαφορών με τα ΨΜΕ, σε σχέση με τα υψόμετρα εμφάνισής τους. Τα αποτελέσματα ακολουθούν.



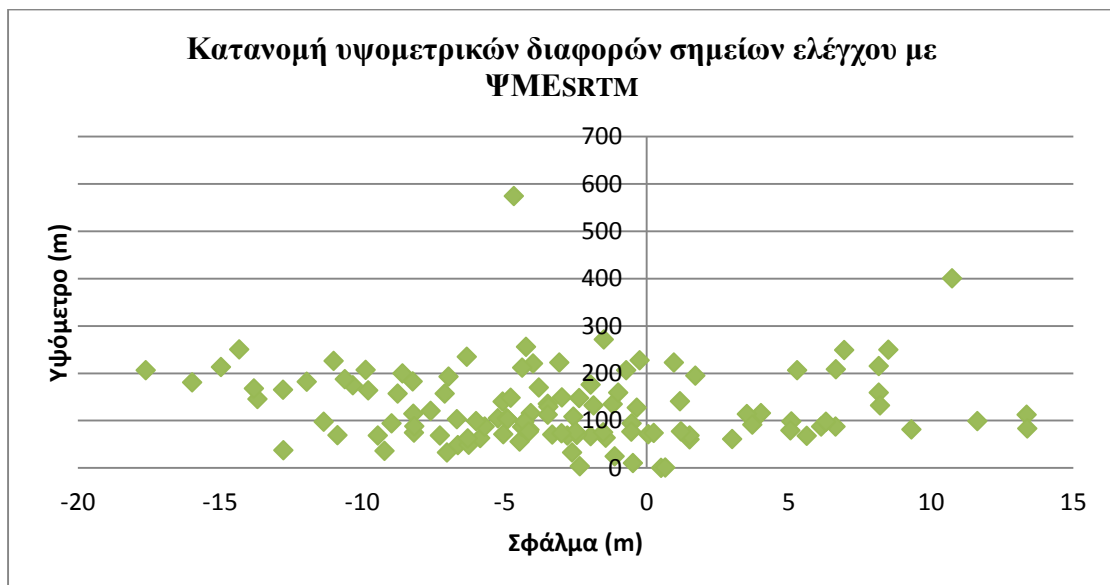
Διάγραμμα 6.11-Κατανομή υψομετρικών διαφορών σημείων ελέγχου με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της Κτηματολόγιο Α.Ε., σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους.

Όπως φαίνεται από την παραπάνω κατανομή, η πλειοψηφία των σημείων είναι μεταξύ των υψομέτρων 0-300m. Οι περισσότερες υψομετρικές διαφορές είναι αρνητικές, κάτι το οποίο υποδηλώνει μια μετατόπιση των 75cm περίπου προς τα «πάνω» του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. σε σχέση με τα σημεία ελέγχου. Να σημειωθεί ότι τα μεγαλύτερα σφάλματα εντοπίζονται σε υψόμετρα των 100m περίπου, ενώ τα περισσότερα βρίσκονται στην περιοχή -1m έως -0.5m.



Διάγραμμα 6.12-Κατανομή υψομετρικών διαφορών σημείων ελέγχου με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του ΟΚΧΕ, σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους.

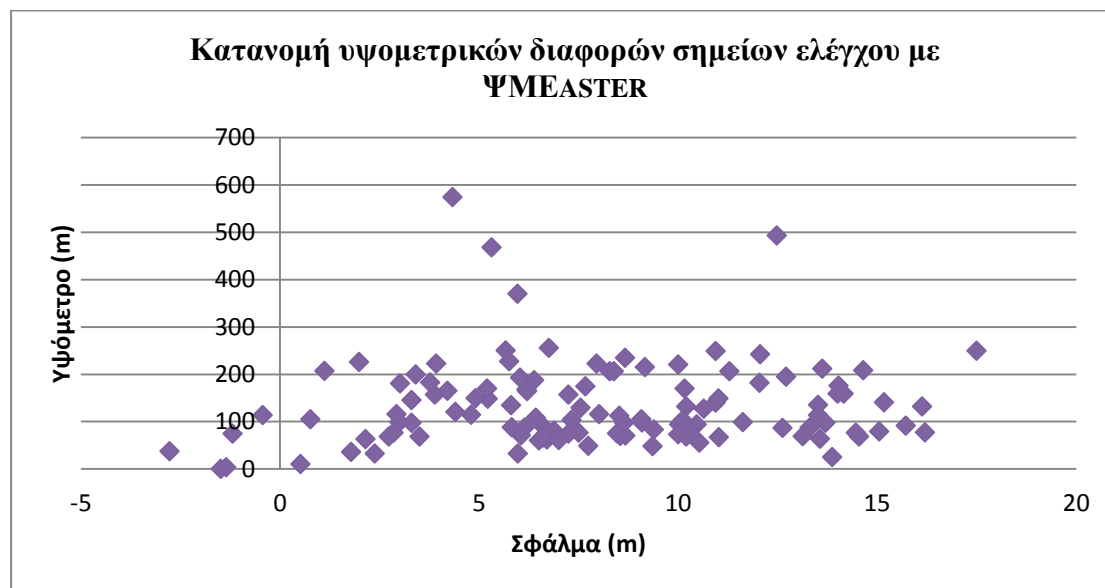
Στον έλεγχο για το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ, οι περισσότερες υψομετρικές διαφορές παρατηρείται ότι βρίσκονται εντός των τιμών -0.5m έως 0.5m . Τα μεγαλύτερα σφάλματα εντοπίζονται και πάλι σε σημεία με υψόμετρο περίπου 100m , ενώ δεν παρατηρείται συστηματική μετατόπιση του ΨΜΕ, καθώς οι διαφορές είναι τόσο θετικές όσο και αρνητικές. Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, η κατανομή των σφαλμάτων μπορεί να χαρακτηριστεί ως συμμετρική.



Διάγραμμα 6.13-Κατανομή υψομετρικών διαφορών σημείων ελέγχου με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του SRTM, σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους.

Όπως παρατηρείται στην κατανομή των υψομετρικών διαφορών στην περίπτωση του SRTM, τα περισσότερα σφάλματα εντοπίζονται μεταξύ -7m και 0 . Οι μεγαλύτερες διαφορές παρουσιάζονται σε σημεία με υψόμετρα 100 και 200m . Επίσης, η πλειοψηφία των διαφορών είναι αρνητική, κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι το ΨΜΕ

βρίσκεται «υψηλότερα» σε σχέση με τα σημεία ελέγχου, χωρίς όμως ένα σταθερό μέτρο μετατόπισης, καθώς το εύρος των διαφορών είναι μεγάλο.



Διάγραμμα 6.14- Κατανομή υψομετρικών διαφορών σημείων ελέγχου με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του ASTER, σε σχέση με το υψόμετρο εμφάνισής τους.

Στην παραπάνω κατανομή των υψομετρικών διαφορών για το ΨΜΕ του ASTER, παρατηρείται ότι σχεδόν όλα τα σφάλματα είναι θετικά, συνεπώς το ΨΜΕ βρίσκεται «χαμηλότερα» από τα μετρημένα σημεία ελέγχου της περιοχής, χωρίς ωστόσο ένα σταθερό μέτρο μετατόπισης, καθώς το εύρος διακύμανσης των τιμών είναι αρκετά μεγάλο. Οι μεγαλύτερες διαφορές εντοπίζονται σε σημεία με υψόμετρο μέχρι 250m περίπου.

6.1.4 Σύγκριση των ελέγχων με τριγωνομετρικά σημεία και σημεία GPS

Σε αυτό το σημείο γίνεται μια σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των ελέγχων με τριγωνομετρικά σημεία και με σημεία GPS. Για να διαπιστωθεί ποιός έλεγχος δίνει καλύτερα αποτελέσματα και είναι περισσότερο ασφαλής για την αξιολόγηση των ΨΜΕ, συγκεντρώθηκαν τα βασικά στατιστικά μεγέθη στον Πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.4-Συγκριτικός πίνακας ελέγχων με τριγωνομετρικά σημεία και σημεία GPS

Έλεγχος ΨΜΕ	Έλεγχος με τριγωνομετρικά σημεία					Έλεγχος με σημεία GPS				
	mean	σ	RMSE	LE90	NSSDA	mean	σ	RMSE	LE90	NSSDA
KT	-1.28	0.81	1.51	1.32	2.96	-0.73	0.52	0.90	0.86	1.75
OKXE	-0.04	1.06	1.04	1.74	2.04	-0.05	0.70	0.70	1.15	1.36
SRTM	8.35	8.22	11.62	13.52	22.77	-2.84	6.42	6.99	10.56	13.71
ASTER	12.17	6.29	13.65	10.34	26.76	7.92	4.37	9.04	7.19	17.71

Όπως φαίνεται στον προηγούμενο πίνακα, στον έλεγχο με σημεία GPS τα στατιστικά μεγέθη είναι σαφώς μικρότερα σε σχέση με τα αντίστοιχα του ελέγχου με τριγωνομετρικά σημεία, δίνοντας πολύ καλύτερα σφάλματα και ακρίβειες, και ειδικότερα στην περίπτωση των ψηφιακών μοντέλων ASTER και SRTM οι διαφορές

αυτές είναι εντονότερες. Κατά τα άλλα η συμπεριφορά των ΨΜΕ και στις δύο περιπτώσεις είναι ίδια, αν εξαιρεθεί η περίπτωση του SRTM που παρουσιάζει συστηματικό σφάλμα διαφορετικού προσήμου. Η διαφορά αυτή στα αποτελέσματα των δύο ελέγχων, πιθανότατα σχετίζεται τόσο με τον αρκετά μεγαλύτερο αριθμό των σημείων GPS σε σχέση με τα τριγωνομετρικά σημεία, όσο και με το ότι τα τριγωνομετρικά σημεία βρίσκονται σε θέσεις με μεγάλο υψόμετρο, για να εξυπηρετούν το σκοπό για τον οποίο ιδρύθηκαν, ενώ τα σημεία GPS είναι καταναμημένα ώστε να περιγράφουν όσο το δυνατό καλύτερα το ανάγλυφο της περιοχής. Συνεπώς συμπεραίνεται ότι ο έλεγχος με σημεία GPS ενδείκνυται για τον έλεγχο της ακρίβειας και της ποιότητας ΨΜΕ συγκριτικά με τα τριγωνομετρικά σημεία, αν το ζητούμενο είναι ένας πιο λεπτομερής και εκτενής έλεγχος.

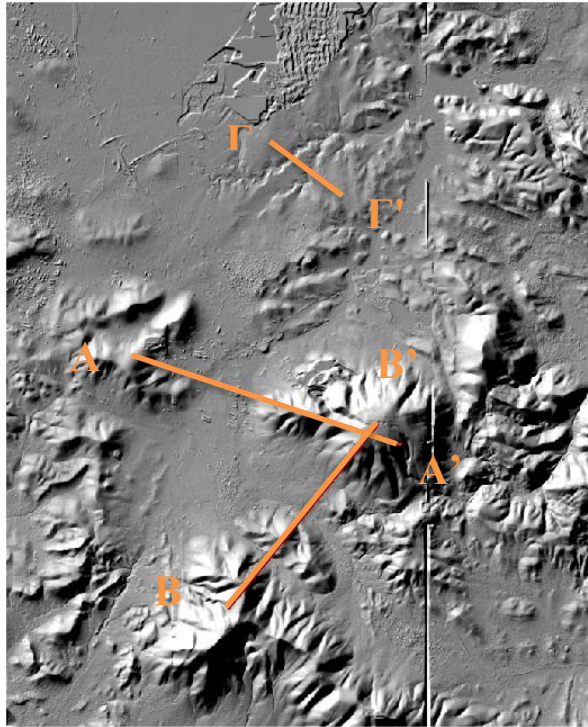
6.2 Οπτικοί Έλεγχοι

Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους αξιολογήθηκαν επιπλέον με οπτικές μεθόδους, ώστε να διαπιστωθεί η προσαρμογή και η εναρμόνιση τους με το ανάγλυφο της περιοχής. Δημιουργήθηκαν τόσο υψομετρικά προφίλ, όσο και εικόνες με χρωματικές παλέτες οι οποίες παρουσίαζαν διάφορα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και ελέγχθηκε κατά πόσο συνάδουν με αυτή και ποιο ψηφιακό μοντέλο ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματική γήινη επιφάνεια.

6.2.1 Δημιουργία υψομετρικού προφίλ

Το υψομετρικό προφίλ της περιοχής δημιουργήθηκε με τομές του εδάφους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.3, με διευθύνσεις ΝΔ-ΒΑ, Α-Δ και κατά μήκος μιας μικρής τομής, σε περιοχή κοντά στο αεροδρόμιο των Σπάτων, στην οποία εντοπίστηκε ύπαρξη ρεμάτων.

Οι τομές που επιλέχθηκαν καλύπτουν όσο το δυνατόν καλύτερα το βασικό ανάγλυφο της περιοχής και τους δύο κύριους ορεινούς όγκους που ανήκουν σε αυτήν.

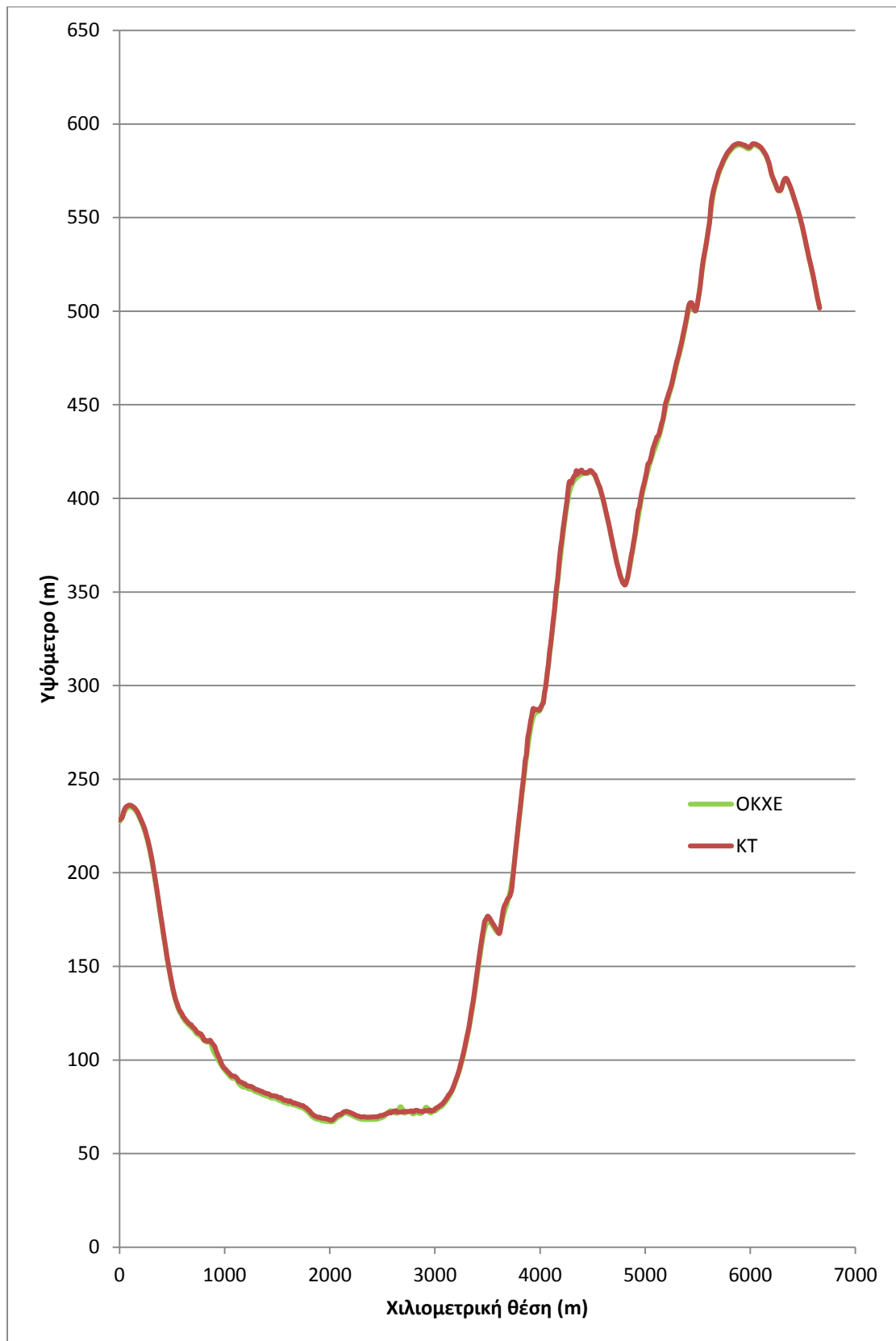


Εικόνα 6.3-Διευθύνσεις δημιουργίας υψομετρικού προφίλ μέσω τομών του εδάφους

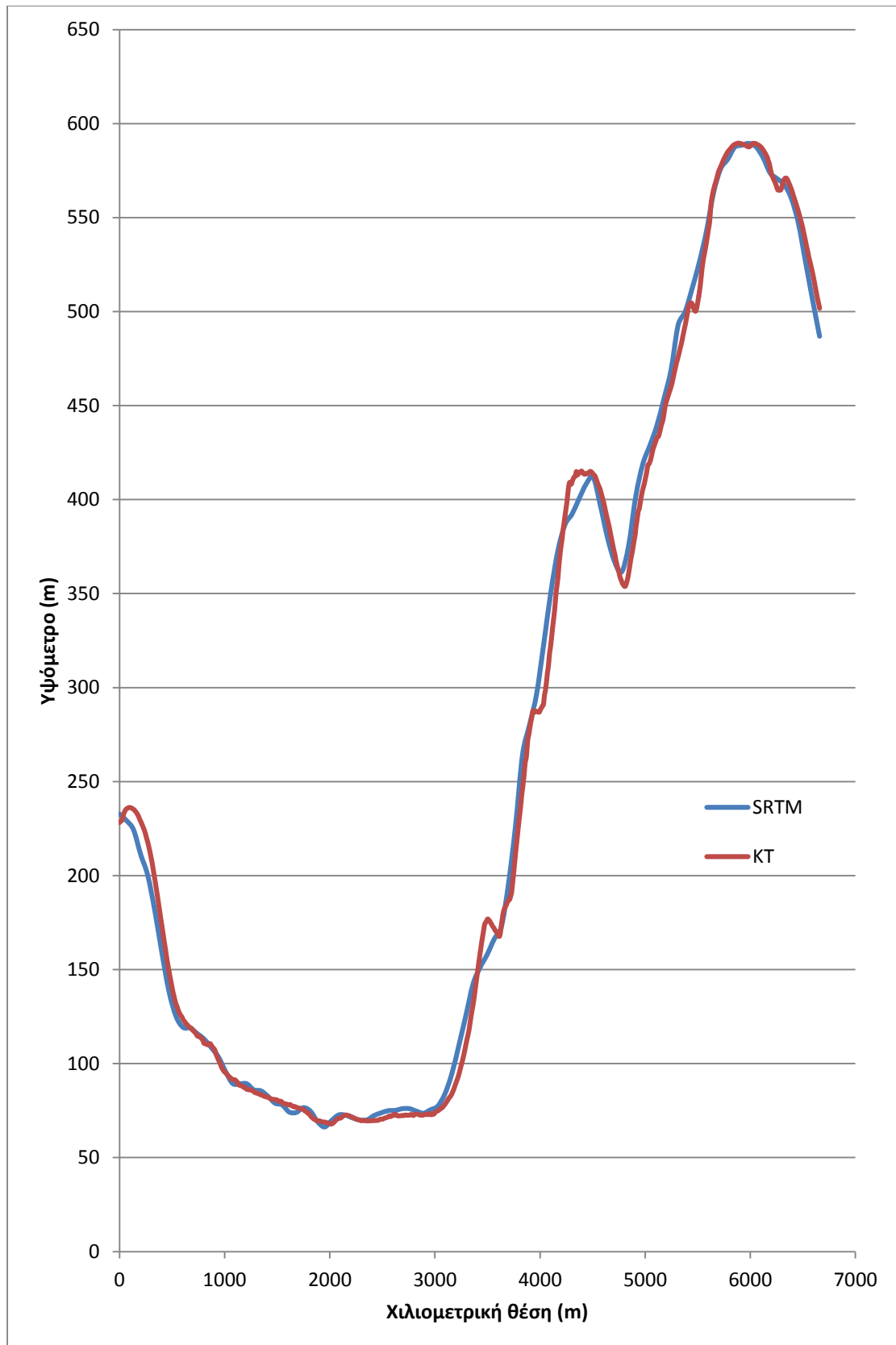
Τα υψομετρικά προφίλ δημιουργήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS, αποθηκεύοντας τις διευθύνσεις σε γραμμικό επίπεδο (.shp), και στη συνέχεια μετατρέποντάς τις σε τρισδιάστατες οντότητες έχοντας κάθε φορά ως υπόβαθρο το εκάστοτε ΨΜΕ. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα εισήχθησαν στο excel, όπου και απεικονίστηκαν τα υψομετρικά προφίλ.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα υψομετρικά προφίλ και στις τρεις περιπτώσεις.

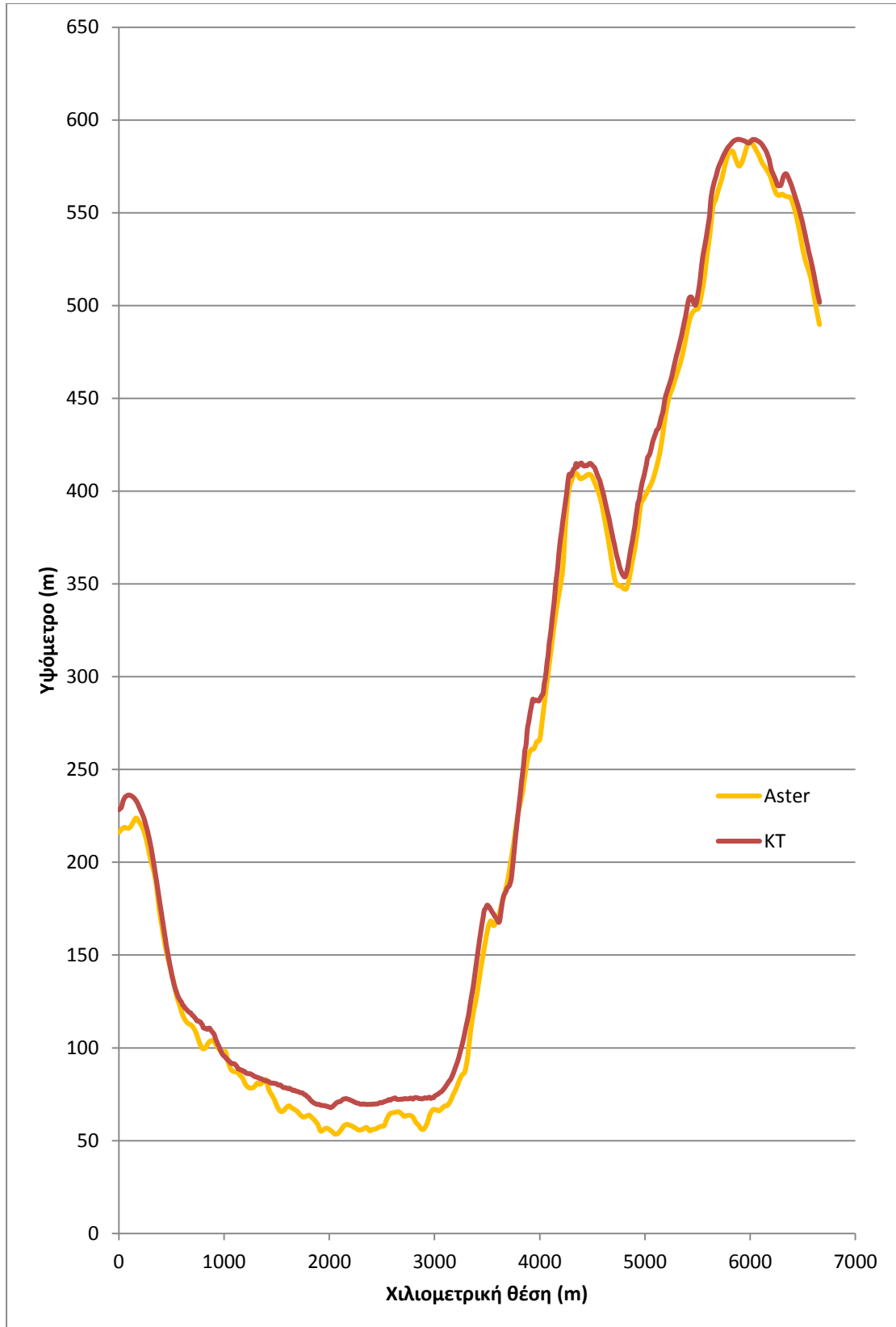
➤ Τομή εδάφους ΑΑ' στη διεύθυνση Δ-Α.



Διάγραμμα 6.15-Σύγκριση υψομετρικών προφίλ, ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. και ΨΜΕ ΟΚΧΕ, στη διεύθυνση Δ-Α.



Διάγραμμα 6.16-Σύγκριση υψομετρικών προφίλ ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. και ΨΜΕ SRTM, στη διεύθυνση Δ-Α.

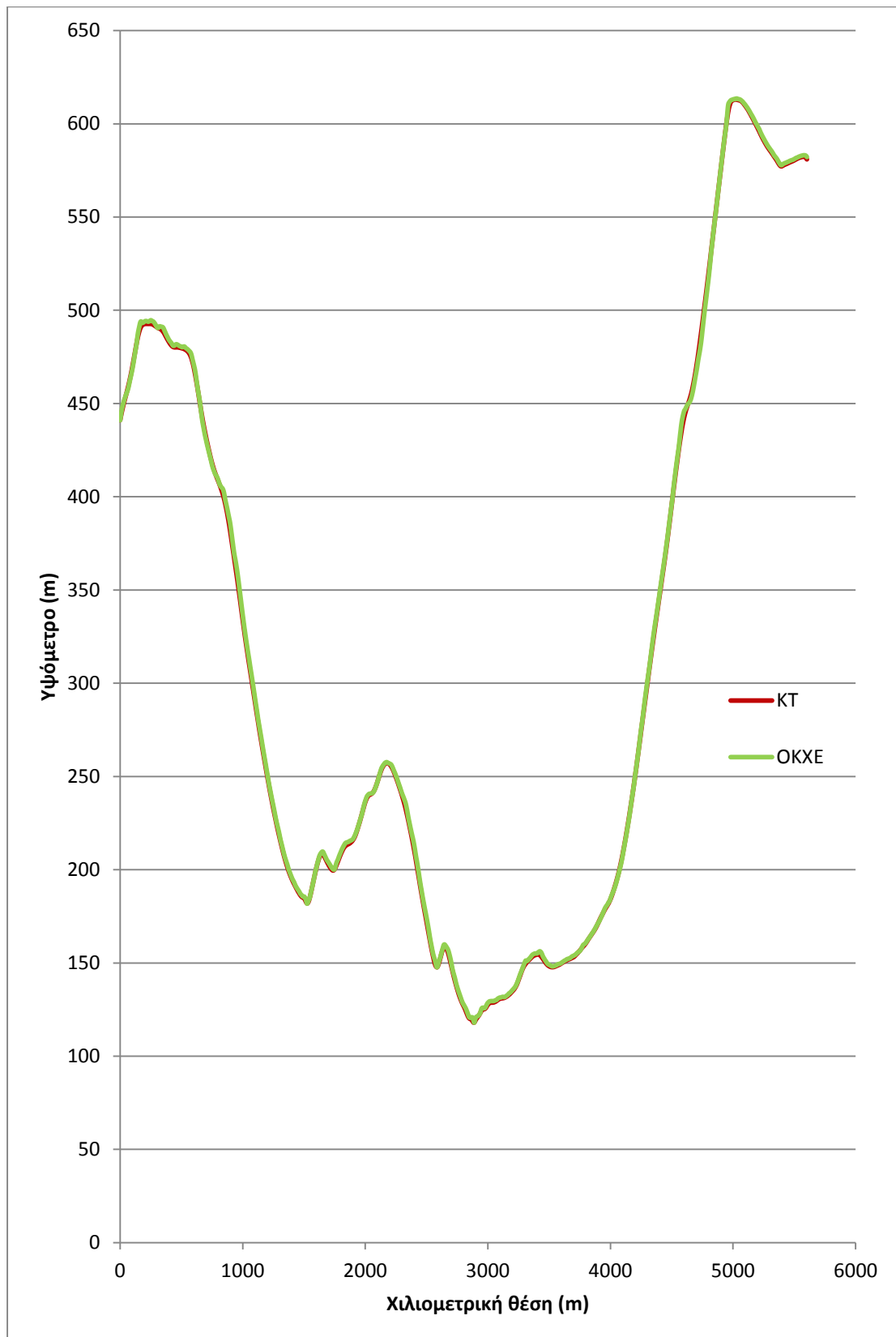


Διάγραμμα 6.17-Σύγκριση υψομετρικών προφίλ ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. και ΨΜΕ ASTER, στη διεύθυνση Δ-Α.

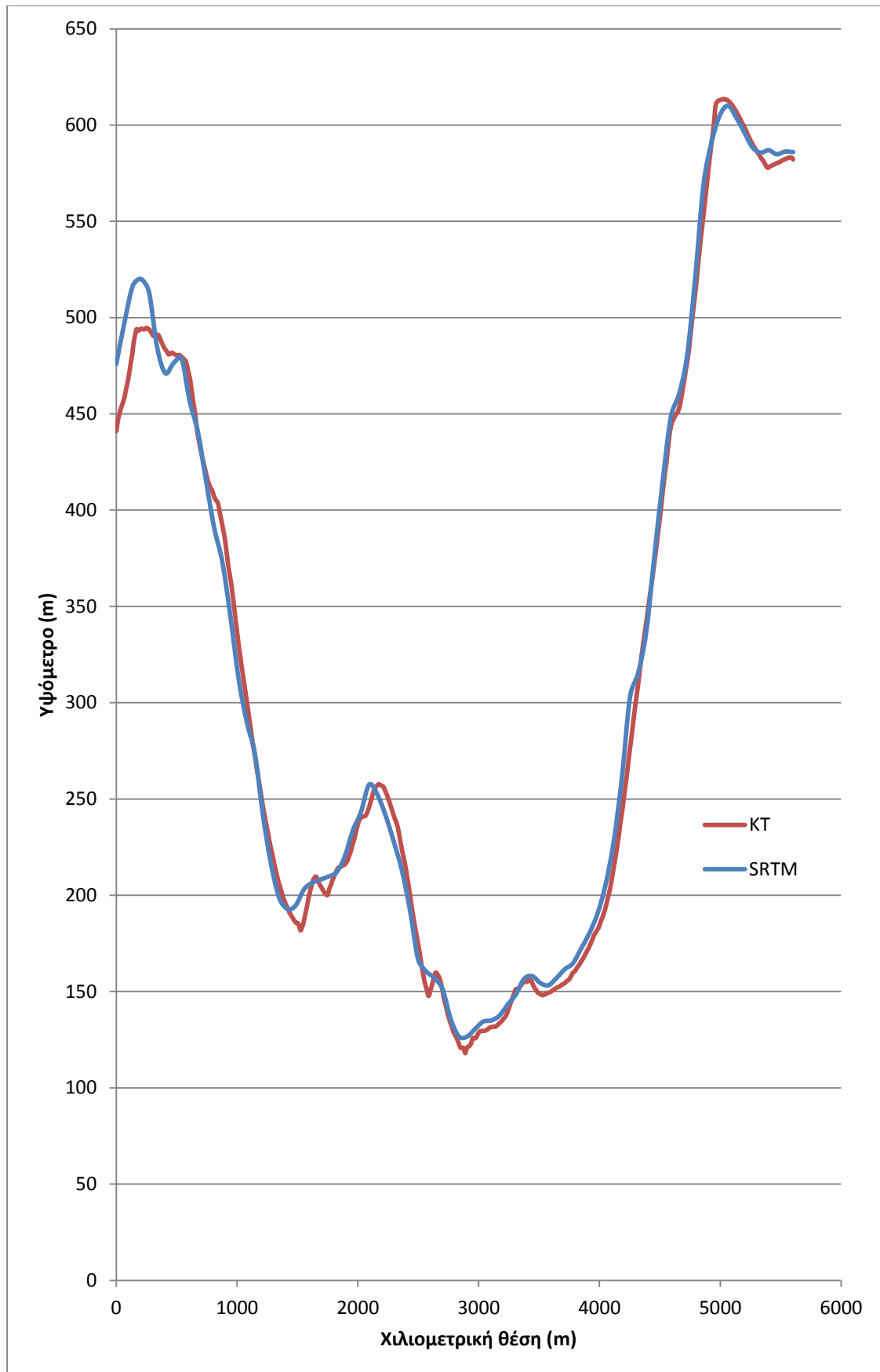
Παρατηρούνται τα εξής:

- Τα υψομετρικά προφίλ του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. και του ΨΜΕ του ΟΚΧΕ, βρίσκονται πολύ κοντά, χωρίς ιδιαίτερες αποκλίσεις μεταξύ τους. Πολύ μικρές διαφοροποιήσεις εντοπίζονται με δυσκολία στο πιο χαμηλό τμήμα του προφίλ το οποίο βρίσκεται σχεδόν σε επίπεδο έδαφος (χλμ. θέση 1 έως 3km), όπως επίσης στη θέση των 3.5km στον άξονα x, που το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ φαίνεται να μην ακολουθεί ακριβώς τη μορφή του εδάφους, ενώ μοιάζει να είναι χαμηλότερα από το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε.
- Το προφίλ του ΨΜΕ SRTM, «ακολουθεί» το ανάγλυφο σε γενικές γραμμές, αν και εμφανίζεται πιο εξομαλυμένο. Δεν ακολουθεί πλήρως τη μορφολογία του εδάφους, κυρίως σε τοπικά υψομετρικά μέγιστα, καθώς κάποιες εξάρσεις τις παρουσιάζει περισσότερο ομαλοποιημένες σε σχέση με το υψομετρικό προφίλ του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., στο οποίο φαίνονται πιο τραχιές. Οι περισσότερες έντονες διαφοροποιήσεις εντοπίζονται σε υψόμετρα μεγαλύτερα των 100 μέτρων. Τέλος εντοπίζεται μια μικρή οριζοντιογραφική μετάθεση του υψομετρικού προφίλ του ΨΜΕ SRTM αριστερά από το αντίστοιχο προφίλ του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε.
- Παρατηρείται μια συστηματική μετατόπιση του ΨΜΕ ASTER, σε σχέση με το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., καθώς βρίσκεται χαμηλότερα από αυτό σε όλο το μήκος της γραμμής, κυρίως, όμως, στο πεδινό-ομαλό τμήμα με χαμηλό υψόμετρο. Σε αδρές γραμμές το ΨΜΕ του ASTER, «ακολουθεί» τη μορφολογία του εδάφους, όπως και τις εξάρσεις. Σε υψόμετρα μικρότερα των 100 μέτρων, το ΨΜΕ του ASTER, παρουσιάζει ανωμαλίες χωρίς να υπάρχουν, όπως φαίνεται από το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε.

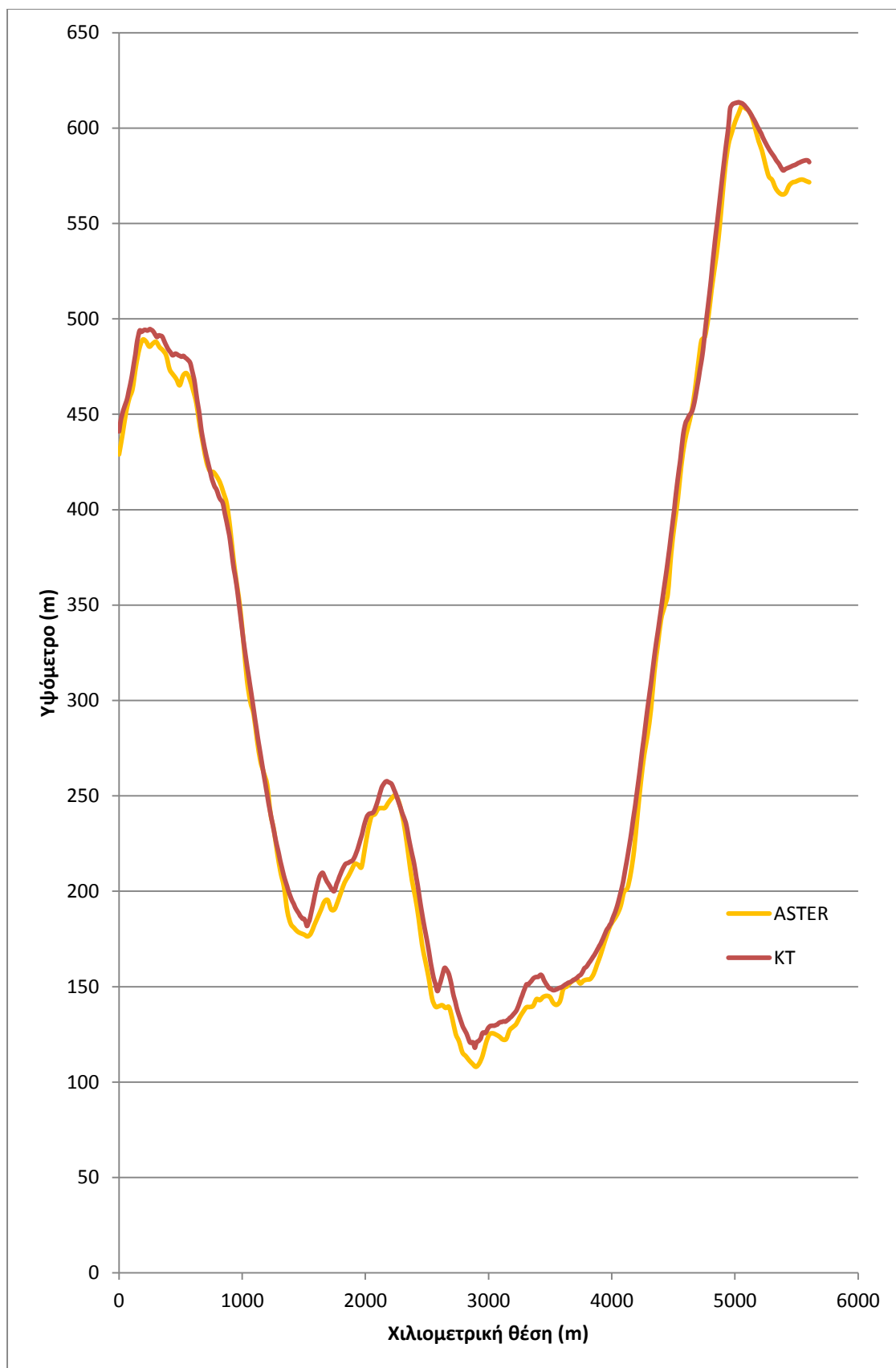
➤ Τομή του εδάφους ΒΒ' στη διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



Διάγραμμα 6.18-Σύγκριση υψομετρικών προφίλ ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. με ΨΜΕ ΟΚΧΕ, στη διεύθυνση Α-Δ.



Διάγραμμα 6.19-Σύγκριση υψομετρικών προφίλ ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. και ΨΜΕ SRTM, στη διεύθυνση Α-Δ.

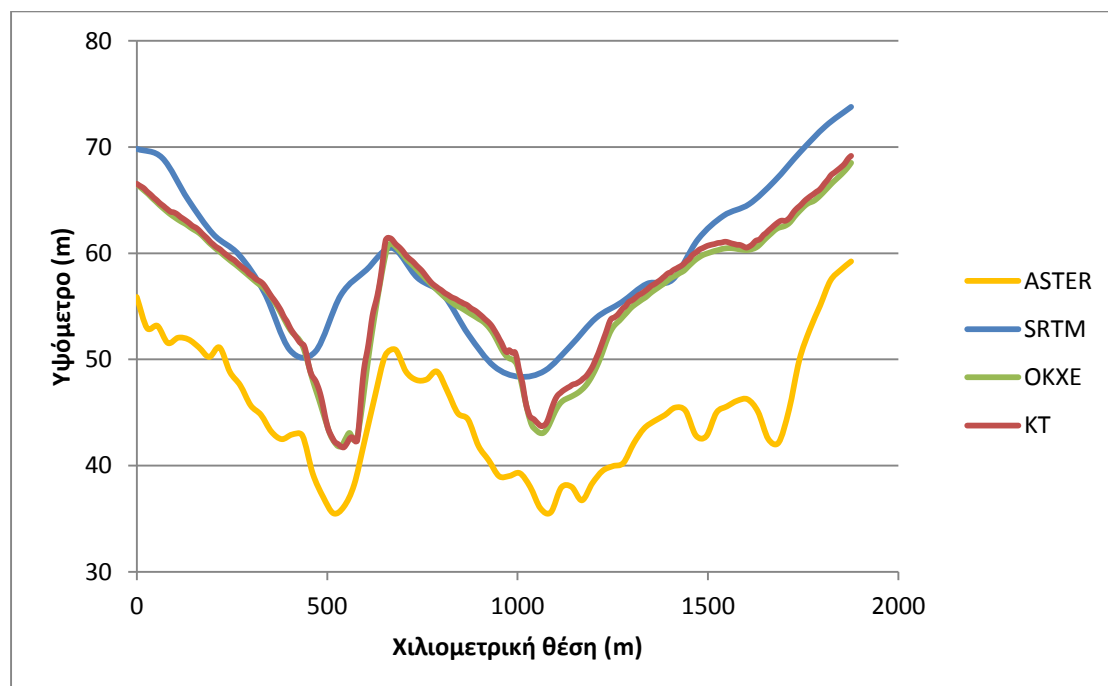


Διάγραμμα 6.20-Σύγκριση υψομετρικών προφίλ ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. και ΨΜΕ ASTER, στη διεύθυνση Α-Δ.

Παρατηρούνται τα εξής:

- Τα υψομετρικά προφίλ των ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. και του ΟΚΧΕ φαίνεται να έχουν ελάχιστες διαφορές σε όλο το μήκος της γραμμής κατά την οποία εξήχθη το υψομετρικό προφίλ. Συγκεκριμένα εντοπίζονται μικρές ανωμαλίες στην τομή του ΨΜΕ ΟΚΧΕ, στις χιλιομετρικές θέσεις 3-4km και 200-800m.
- Το ΨΜΕ SRTM παρουσιάζει έντονη διαφοροποίηση στα υψόμετρα 450-500m, στην αρχή της τομής, όπου το ΨΜΕ SRTM βρίσκεται περίπου 30m, υψηλότερα από το αντίστοιχο της Κτηματολόγιο Α.Ε., ενώ δεν ακολουθεί το ανάγλυφο καθώς παρουσιάζει ανύπαρκτη έξαρση. Σε γενικές γραμμές, και σε αυτή την τομή, αναπαριστάται το ανάγλυφο αρκετά καλά, εκτός από περιοχές που υπάρχουν εναλλαγές (από τη χλμ. θέση 1.5 έως 4km της τομής), όπου είναι περισσότερο ομαλό, σε σχέση με το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. Και σε αυτή την τομή, όπως και στην ΑΑ', παρατηρείται μια συστηματική οριζοντιογραφική μετάθεση του υψομετρικού προφίλ του ΨΜΕ SRTM αριστερά από το αντίστοιχο προφίλ του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε.
- Το ΨΜΕ του ASTER βρίσκεται και σε αυτή την περίπτωση συστηματικά χαμηλότερα σε σχέση με το αντίστοιχο του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. Παρατηρείται σχεδόν κοινή συμπεριφορά σε έντονες αλλαγές κλίσεων, ενώ σε περιοχές που η κλίση είναι περισσότερο ομαλή (από χλμ θέση 1.5 έως 4 km της τομής), όπου και παρουσιάζονται περισσότερες ανωμαλίες στο έδαφος, το ΨΜΕ ASTER δεν «ακολουθεί» πλήρως το ανάγλυφο της περιοχής.

➤ Τομή του εδάφους ΓΓ' στο ρέμα νότια του αεροδρομίου.



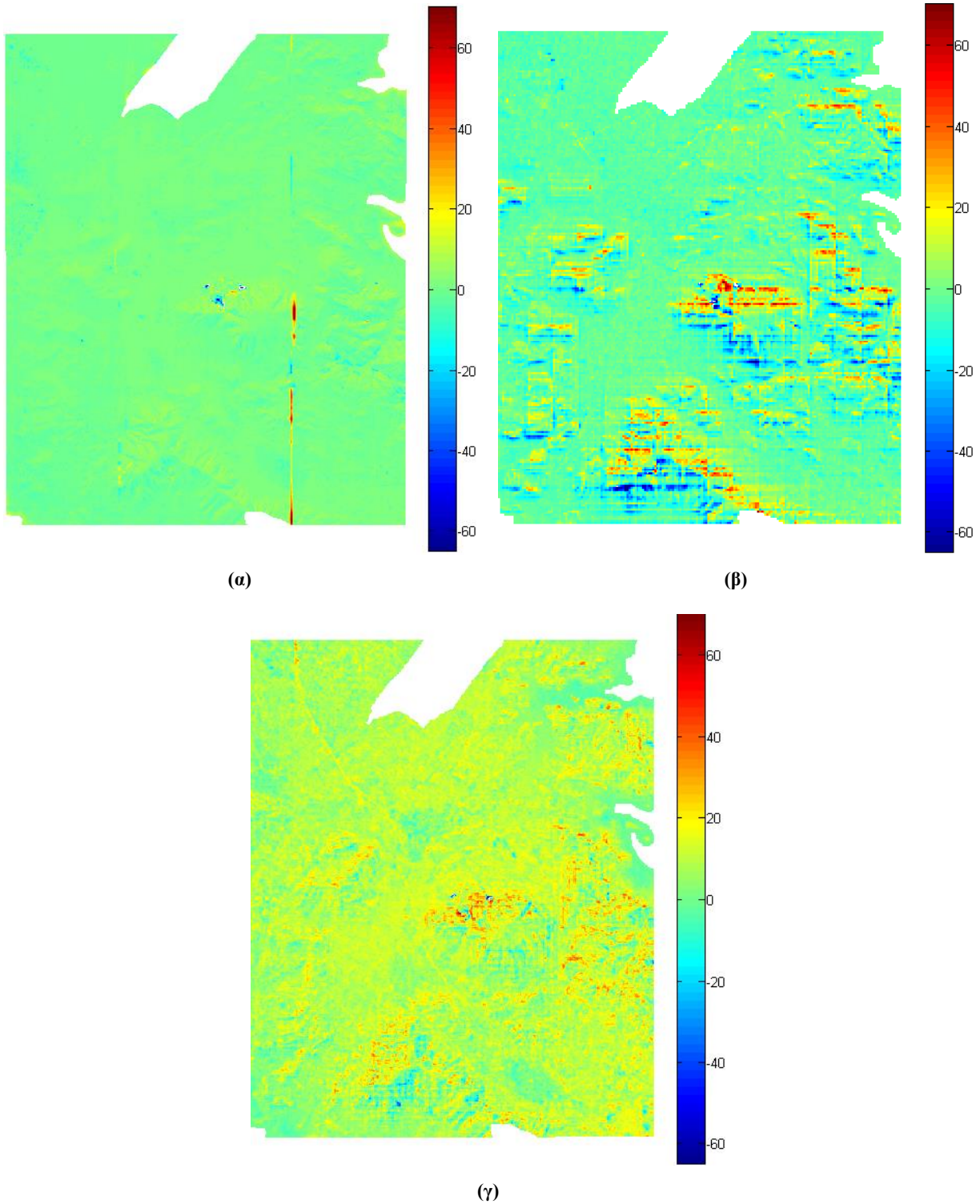
Διάγραμμα 6.21-Σύγκριση υψομετρικών προφίλ, στο ρέμα νότια του αεροδρομίου, για όλα τα ΨΜΕ.

Γενικά παρατηρούνται τα εξής:

- Το προφίλ του ΨΜΕ ASTER βρίσκεται συστηματικά χαμηλότερα από το αντίστοιχο της Κτηματολόγιο Α.Ε. και μάλιστα με μέση διαφορά 10 μέτρων.
- Το προφίλ του ΨΜΕ SRTM, φαίνεται να είναι υψηλότερα από το αντίστοιχο του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., με μικρότερες διαφορές στα υψηλότερα υψόμετρα (65-80m), οι οποίες φθάνουν μέχρι τα 3m. Αντίθετα, στα χαμηλά υψόμετρα το ΨΜΕ του SRTM μοιάζει να μην ακολουθεί τη μορφολογία του εδάφους, με την απόκλιση από το αντίστοιχο ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. να φτάνει μέχρι τα 10m. Επίσης φαίνεται να υπάρχει μια οριζοντιογραφική μετατόπιση κυρίως στα χαμηλότερα σημεία, σε σχέση με το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε.
- Τέλος, το προφίλ του ΨΜΕ του ΟΚΧΕ, μοιάζει να συμβαδίζει με το αντίστοιχο της Κτηματολόγιο Α.Ε., με μικρές αποκλίσεις, ενώ φαίνεται να βρίσκεται λίγο χαμηλότερα από το αντίστοιχο προφίλ του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε.

6.2.2 Οπτικοποίηση υψομετρικών διαφορών

Ακολουθούν οι υψομετρικές διαφορές των υπό εξέταση ΨΜΕ ως προς το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., ώστε να επαληθευθούν τα αποτελέσματα των υψομετρικών προφίλ που προηγήθηκαν. Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων έγινε με χρήση του λογισμικού Matlab.



Εικόνα 6.4-Οπτικοποίηση των υψομετρικών διαφορών των ΨΜΕ με το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., (α) διαφορές με το ΨΜΕ ΟΚΧΕ, (β) διαφορές με το ΨΜΕ SRTM, (γ) διαφορές με το ΨΜΕ ASTERv2.

Όπως παρατηρείται (Εικόνα 6.4(α)), οι διαφορές του ΨΜΕ του ΟΚΧΕ με το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. είναι μικρές και χωρίς διαφοροποιήσεις σε όλο το εύρος της περιοχής, εκτός από την περιοχή που το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ παρουσιάζει μια ανωμαλία (μια κάθετη γραμμή) - που πιθανόν οφείλεται σε λανθασμένη σύνδεση δύο διαδοχικών μοντέλων - όπου εκεί οι τιμές είναι μεγαλύτερες. Επίσης διαφορές εντοπίζονται και στην περιοχή του λατομείου (περίπου στο κέντρο της περιοχής), που σε ορισμένα σημεία παρατηρείται έντονη αρνητική διαφορά (σκούρο μπλε χρώμα).

Στην περίπτωση του SRTM (Εικόνα 6.4(β)), οι μεγαλύτερες θετικές υψομετρικές διαφορές εντοπίζονται στα μεγαλύτερα υψόμετρα, όπου το ανάγλυφο είναι πιο έντονο με απότομες κλίσεις. Σε γενικές γραμμές όμως, οι διαφορές ανάμεσα στα δύο μοντέλα είναι κυρίως αρνητικές, περίπου στα -10m, κάτι που υποδηλώνει μια συστηματική μετατόπιση του ΨΜΕ SRTM, σε σχέση με το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. και μάλιστα, το ΨΜΕ SRTM, βρίσκεται υψηλότερα από το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. Επίσης παρατηρείται ότι περιοχές με προσανατολισμό νότιο και νοτιοδυτικό παρουσιάζουν υψηλό αρνητικό σφάλμα, ενώ περιοχές με προσανατολισμό βόρειο και βορειοδυτικό παρουσιάζουν υψηλό θετικό σφάλμα. Αυτό σημαίνει ότι το ΨΜΕ SRTM βρίσκεται υψηλότερα και χαμηλότερα αντίστοιχα σε σχέση με αυτό της Κτηματολόγιο Α.Ε. (Αναλυτικά για τους προσανατολισμούς στην ενότητα 6.2.4).

Στην περίπτωση του ΨΜΕ ASTER (Εικόνα 6.4(γ)), παρατηρείται σε όλο το εύρος της περιοχής μια σταθερή συμπεριφορά των σφαλμάτων, χωρίς έντονες διαφοροποιήσεις. Οι υψομετρικές διαφορές είναι σχεδόν σε όλη την περιοχή θετικές, δηλαδή το ΨΜΕ του ASTER βρίσκεται συστηματικά χαμηλότερα από το αντίστοιχο της Κτηματολόγιο Α.Ε. Και εδώ όμως, εντοπίζονται περιοχές με μεγαλύτερα σφάλματα, πιο περιορισμένες από ότι στην περίπτωση του SRTM, αλλά και πάλι στις θέσεις όπου το ανάγλυφο είναι περισσότερο έντονο και στην περιοχή του λατομείου. Πάντως, αξιοσημείωτο είναι ότι στις παραθαλάσσιες περιοχές το φαινόμενο της συστηματικότητας αντιστρέφεται, με την εμφάνιση αρνητικών υψομετρικών διαφορών. Δηλαδή, στις παραθαλάσσιες περιοχές το ΨΜΕ του ASTER βρίσκεται υψηλότερα από το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε.

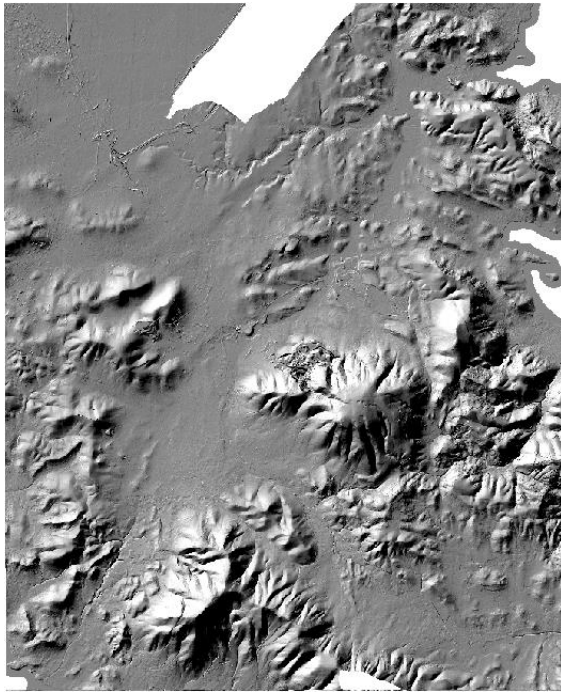
6.2.3 Σκίαση (Hillshade)

Η σκίαση των ΨΜΕ πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS, από το ArcToolbox, και με την εντολή “*SpatialAnalyst>SurfaceAnalysis>Hillshade*”.

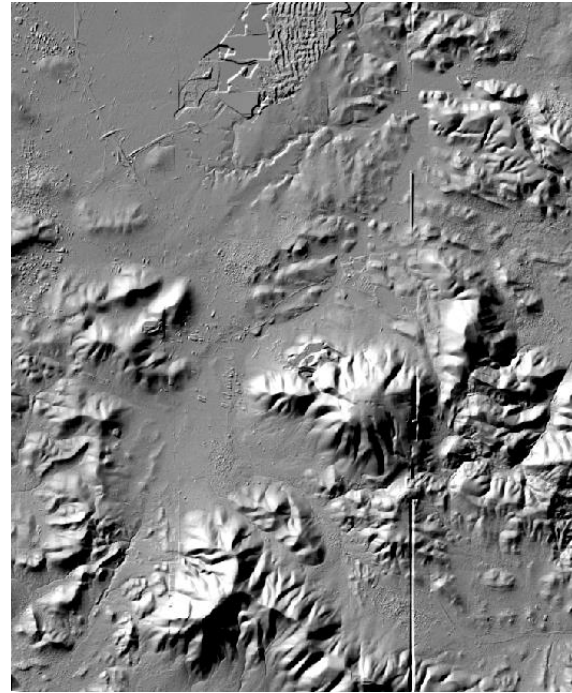
Η χρήση της σκίασης του αναγλύφου, βοηθάει στο να εντοπιστούν πιθανές ανωμαλίες και σφάλματα στο ΨΜΕ, καθώς ενισχύει την επιφάνεια του εδάφους, κάνοντάς το περισσότερο ευδιάκριτο και κατανοητό σε σχέση με αυτό καθαυτό το ΨΜΕ.

Όπως προκύπτει, και από την παρατήρηση της Εικόνα 6.5, το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. παρουσιάζει ένα κενό στα νότια της περιοχής, ενώ αυτό του ΟΚΧΕ φαίνεται να παρουσιάζει μια ανωμαλία - μια κάθετη γραμμή σε βύθισμα, το

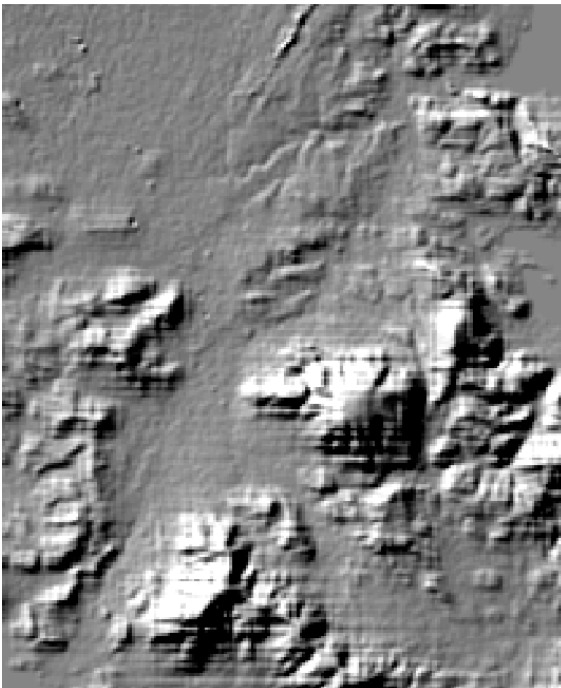
οποίο πιθανότατα οφείλεται στη λανθασμένη ένωση δύο διαδοχικών φωτογραμμετρικών μοντέλων, όπως έχει αναφερθεί. Σε γενικές γραμμές η σκίαση των δύο μοντέλων δε διαφέρει, ενώ αποδίδει όλα τα χαρακτηριστικά του εδάφους το ίδιο έντονα. Να σημειωθεί, ότι τα θαλάσσια τμήματα απεικονίζονται λανθασμένα από το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ, καθώς φαίνονται να έχουν υφή (ανάγλυφο), ενώ θα έπρεπε να είναι λεία, όπως είναι σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, με αποτέλεσμα να μη διαχωρίζονται από την ακτογραμμή.



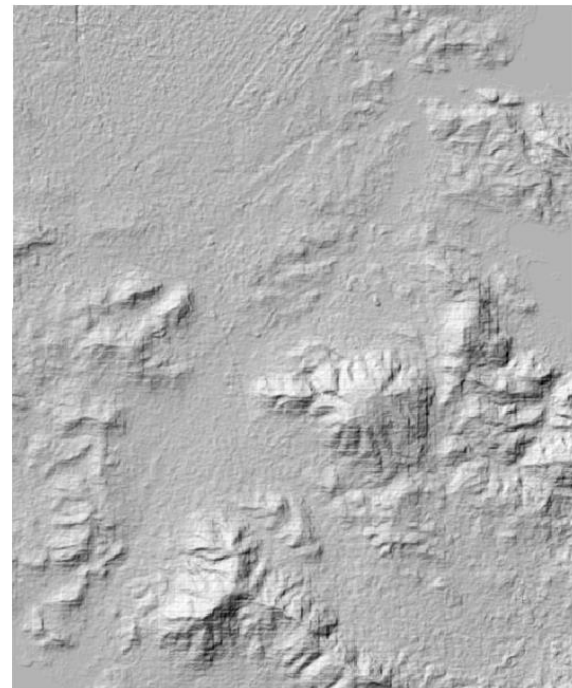
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 6.5-Σκίαση αναγλύφου, (α) ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε., (β) ΨΜΕΟΚΧΕ, (γ) ΨΜΕSRTM, (δ) ΨΜΕ ASTER.

Το ΨΜΕ του SRTM, δεν αποδίδει με λεπτομέρεια το ανάγλυφο της περιοχής, αλλά σε πολύ αδρές γραμμές, με αποτέλεσμα να φαίνεται ομαλοποιημένο σε σχέση με το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. και του ΟΚΧΕ. Παρόλα αυτά, οι υδάτινες επιφάνειες απεικονίζονται λείες, ενώ εντοπίζονται με σχετική δυσκολία τα δύο νησάκια της

περιοχής. Αιτία για όλα τα παραπάνω είναι προφανώς η ανάλυση των αρχικών δεδομένων.

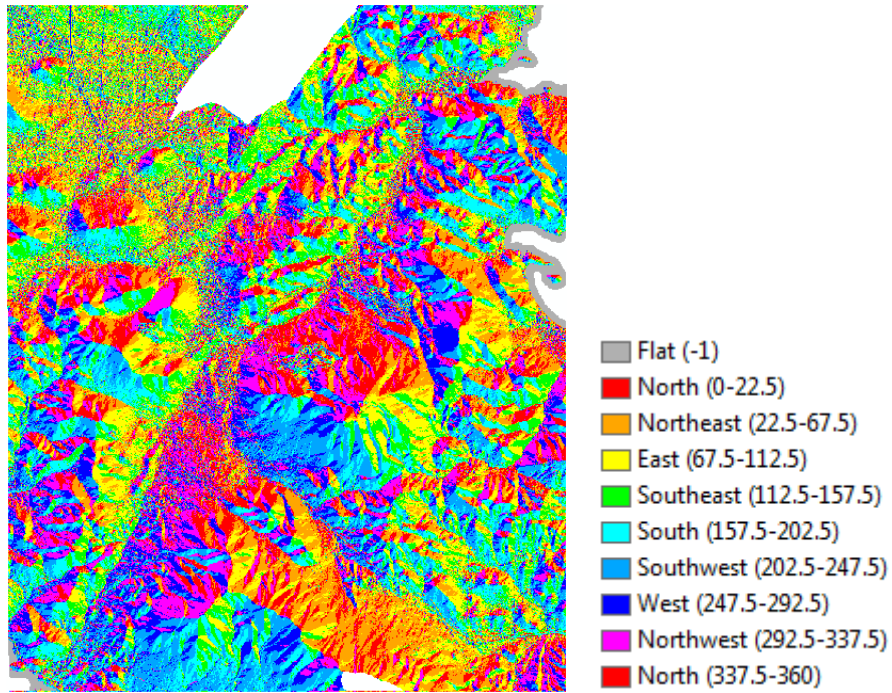
Τέλος, στην περίπτωση του ASTER, η σκίαση δίνει πιο «αχνά» αποτελέσματα, με συνέπεια το ανάγλυφο να μην παρουσιάζεται με την ίδια ένταση σε σχέση με τα υπόλοιπα, μειονεκτώντας και αυτό σε επίπεδο λεπτομέρειας. Όμως απεικονίζει σωστά τις υδάτινες επιφάνειες, διαχωρίζοντάς τις επαρκώς από το ηπειρωτικό τμήμα. Και σε αυτή την περίπτωση το αποτέλεσμα θα χαρακτηριζόταν ως ιδιαίτερα ομαλοποιημένο. Επιπλέον, το έδαφος γενικά παρουσιάζεται με τραχιά υφή, κάτι που πιθανόν υποδηλώνει την ύπαρξη θορύβου.

6.2.4 Προσανατολισμός (aspect)

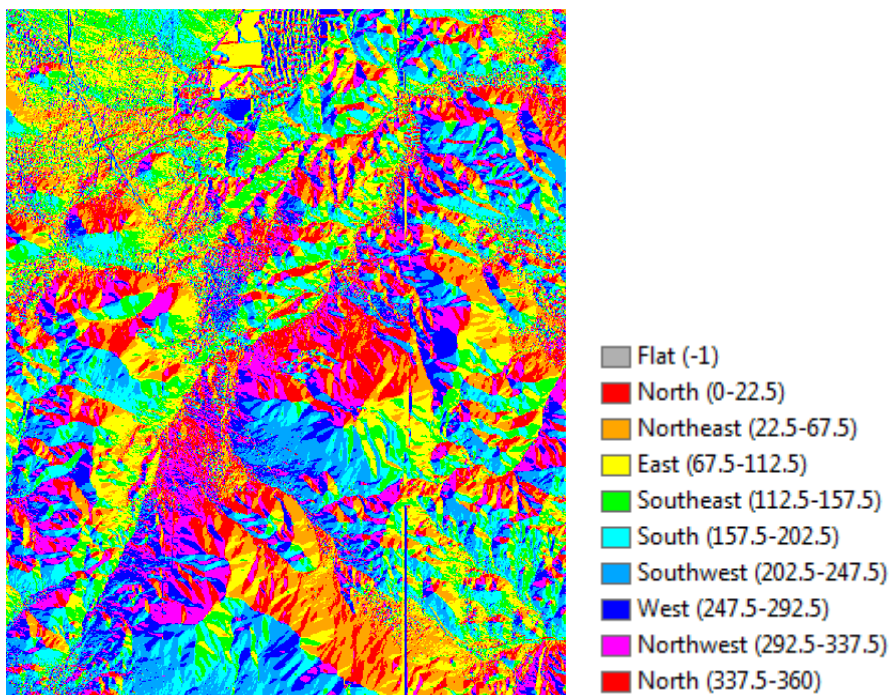
Ακολούθησε η διαδικασία δημιουργίας του προσανατολισμού της επιφάνειας του αναγλύφου στην περιοχή μελέτης. Ο προσανατολισμός υπολογίστηκε στο ArcGIS, από το μενού “*SpatialAnalyst>SurfaceAnalysis>Aspect*”, του ArcToolbox. Το εργαλείο αυτό κατηγοριοποιεί τις υπολογισμένες τιμές σε διευθύνσεις στο χώρο. Οι τιμές που υπολογίζονται είναι σε μοίρες από 0 έως 359.9. Για κάθε ΨΜΕ ο προσανατολισμός παρουσιάζεται στις Εικόνες 6.6 – 6.9.

Σε γενικές γραμμές, η συμπεριφορά των ΨΜΕ είναι παρόμοια. Η βασική διαφορά είναι τα τμήματα της θάλασσας, που περιλαμβάνονται σε όλα τα ΨΜΕ, εκτός από το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. στο οποίο βρίσκεται ένα τμήμα της κατά μήκος της ακτογραμμής. Παρόλα αυτά, ο προσανατολισμός της είναι σωστός, δηλαδή φαίνεται επίπεδη, σε όλα τα ΨΜΕ, εκτός από αυτό του ΟΚΧΕ, στο οποίο εμφανίζεται ως επιφάνεια με πολλούς προσανατολισμούς. Ακόμη, στην περίπτωση του SRTM, εντοπίζεται ακόμη και ένα από τα δύο νησάκια, στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής, τα οποία είναι ευδιάκριτα στην περίπτωση του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. και του ASTER.

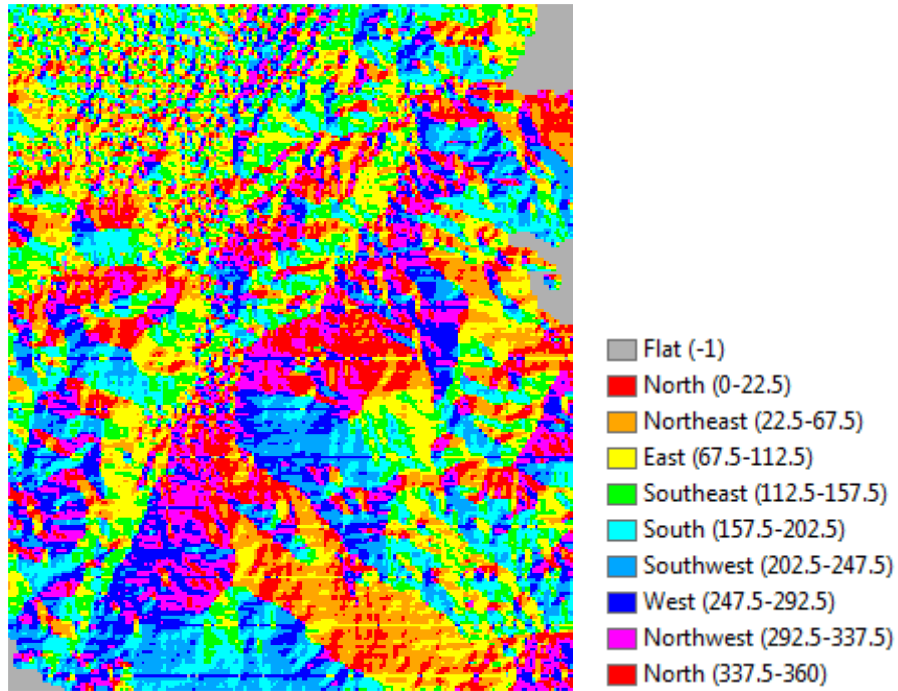
Επίσης, στην περίπτωση του ASTER, εντοπίζεται αρκετός θόρυβος σχεδόν σε όλο το εύρος της περιοχής, ενώ λιγότερος φαίνεται να είναι στο αποτέλεσμα του ΨΜΕ SRTM. Γενικά, λιγότερο ευδιάκριτο είναι το αποτέλεσμα του υπολογισμού του προσανατολισμού, σε όλες τις περιπτώσεις, στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής και συγκεκριμένα δυτικά του αερολιμένα των Σπάτων, αν και εκεί το έδαφος είναι σχετικά επίπεδο. Επίσης, το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. φαίνεται να παρουσιάζει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις λεπτομέρειες, αν και σε σχέση με το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ, ίσως εμφανίζει περισσότερο θόρυβο σε κάποια τμήματα.



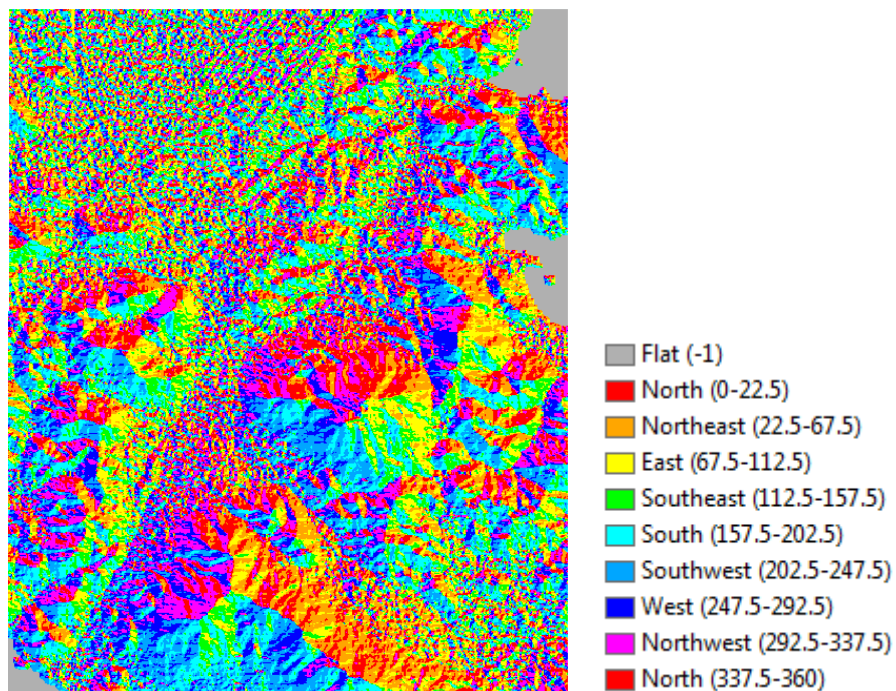
Εικόνα 6.6-Προσανατολισμός περιοχής, ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε.



Εικόνα 6.7-Προσανατολισμός περιοχής, ΨΜΕ ΟΚΧΕ.



Εικόνα 6.8-Προσανατολισμός περιοχής, ΨΜΕ SRTM.

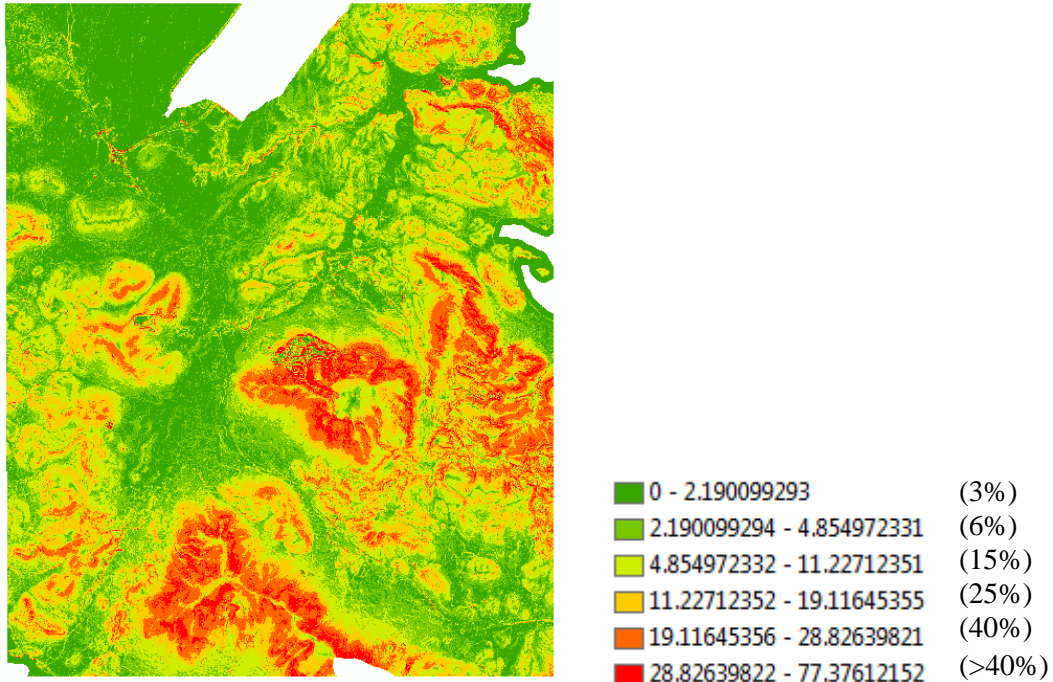


Εικόνα 6.9-Προσανατολισμός περιοχής, ΨΜΕ ASTER.

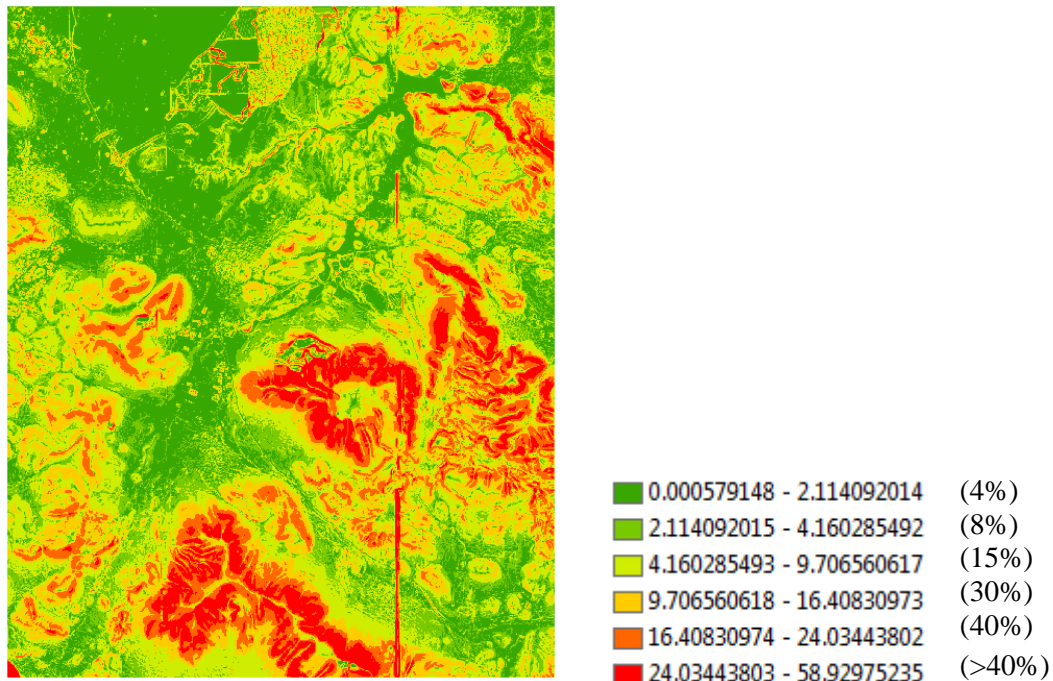
6.2.5 Κλίσεις (slope)

Από το ίδιο μενού για τον υπολογισμό του προσανατολισμού, με την επιλογή αυτή τη φορά της εντολής “Slope”, υπολογίστηκαν οι κλίσεις του αναγλύφου σε μοίρες. Και

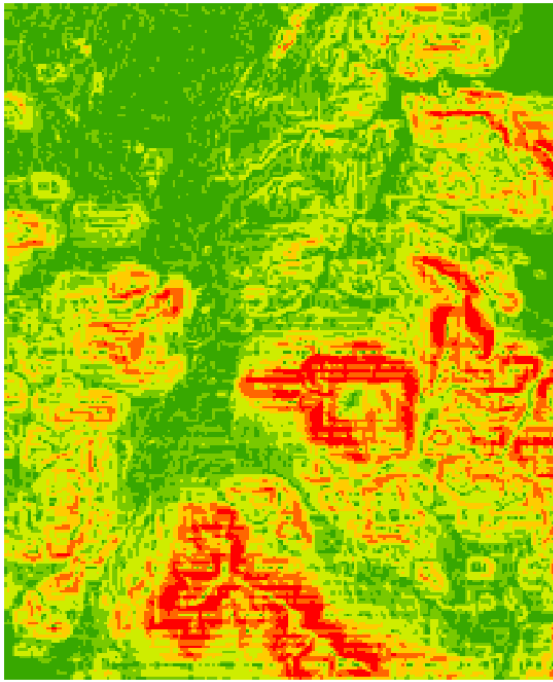
πάλι το λογισμικό κατηγοριοποιεί αυτόματα τις τιμές που υπολογίζει σε κλίσεις. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις επόμενες εικόνες.



Εικόνα 6.10-Κλίσεις περιοχής, ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε.

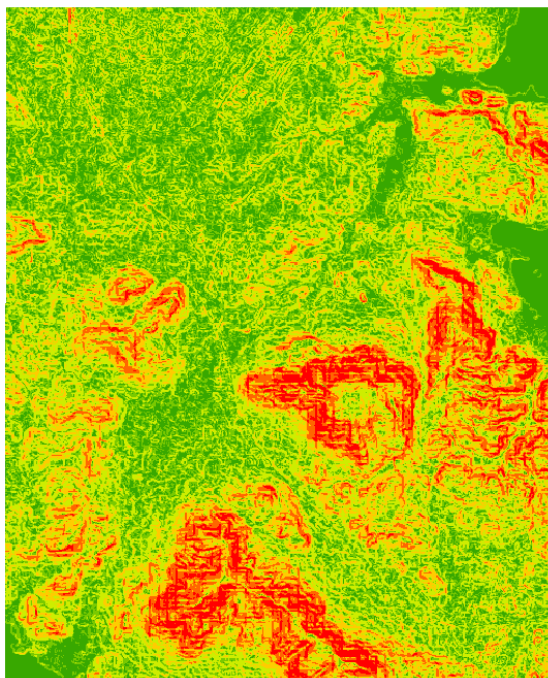


Εικόνα 6.11-Κλίσεις περιοχής, ΨΜΕ ΟΚΧΕ.



0 - 1.72940845	(4%)
1.729408451 - 3.733095117	(8%)
3.733095118 - 8.645062376	(17%)
8.645062377 - 15.12885916	(30%)
15.12885917 - 23.38096415	(45%)
23.38096416 - 50.10206604	(>45%)

Εικόνα 6.12-Κλίσεις περιοχής, ΨΜΕ SRTM.



0 - 2.391077538	(4%)
2.391077539 - 4.959256296	(10%)
4.959256297 - 10.34975227	(20%)
10.34975228 - 17.46520695	(30%)
17.46520696 - 26.52124019	(50%)
26.5212402 - 54.98305893	(>50%)

Εικόνα 6.13-Κλίσεις περιοχής, ΨΜΕ ASTER.

Οι κλίσεις για το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ, φαίνεται να είναι περισσότερο έντονες σε σχέση με τις αντίστοιχες του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο, ενώ και πάλι παρουσιάζει σφάλματα στις υδάτινες επιφάνειες και κυρίως στο τμήμα που βρίσκεται νότια και δυτικά, το οποίο εμφανίζει ανύπαρκτη έντονη κλίση. Επίσης, και εδώ εντοπίζεται η κάθετη γραμμή που μοιάζει με τσάκιση, στο ΨΜΕ του ΟΚΧΕ, με περισσότερο έντονη κλίση,

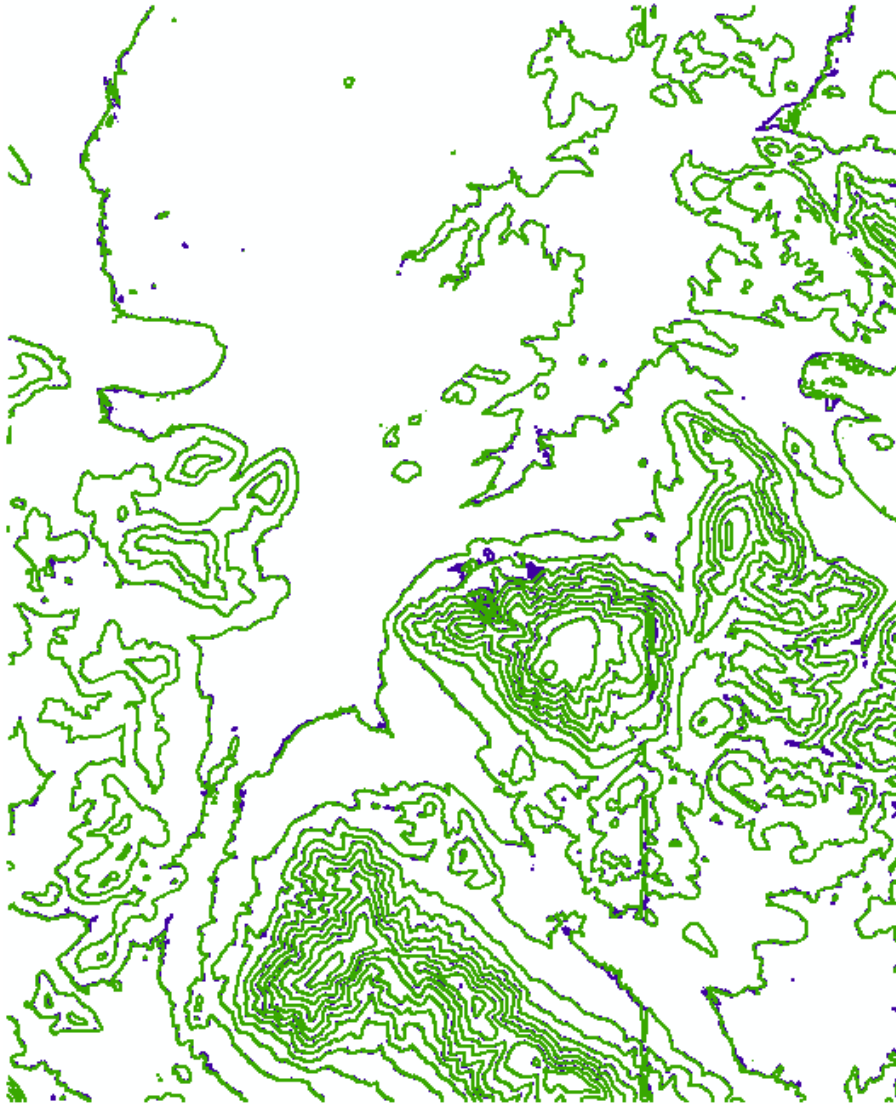
που όπως έχει ήδη αναφερθεί, πιθανότατα οφείλεται σε λανθασμένη ένωση δύο διαδοχικών μοντέλων.

Οι κλίσεις για το ΨΜΕ του SRTM συνάδουν με την πραγματικότητα σε αδρές γραμμές, αν και παρουσιάζουν μικρή λεπτομέρεια, κάτι που οφείλεται στη χαμηλή ανάλυση των αρχικών δεδομένων. Παρόλα αυτά τα τμήματα της θάλασσας απεικονίζονται σωστά, δηλαδή χωρίς κλίση. Για το ΨΜΕ του δέκτη ASTER, κυρίως οι μεγάλες κλίσεις ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, ενώ οι μικρότερες δεν απεικονίζονται σωστά, καθώς φαίνεται να εμπλέκονται με τις μεσαίες. Γενικά στο αποτέλεσμα μοιάζει να υπάρχει παρουσία θορύβου.

6.2.6 Ισοΰψεις καμπύλες (contours)

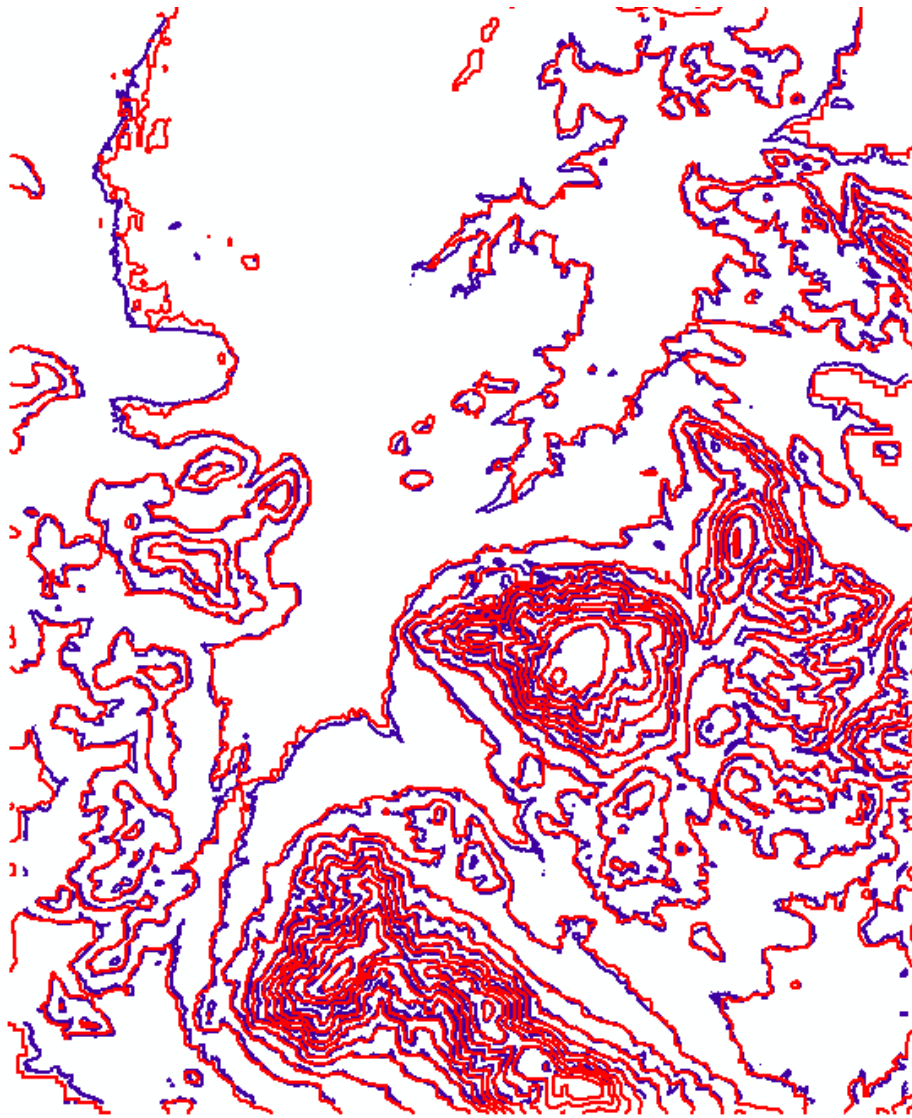
Οι ισοΰψεις καμπύλες υπολογίστηκαν από το μενού “*SpatialAnalyst>SurfaceAnalysis>Aspect*”, του ArcToolbox του ArcGIS και για ισοδιάσταση 50m, σχεδιάστηκαν αυτόματα για το εκάστοτε ΨΜΕ, χωρίς καμία άλλη πληροφορία.

Στη συνέχεια οι ισοΰψεις του κάθε ΨΜΕ συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., το οποίο θεωρήθηκε αναφοράς, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Εικόνα 6.14-Ισοϋψείς ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. (μπλε γραμμή) και ΨΜΕ ΟΚΧΕ (πράσινη γραμμή).

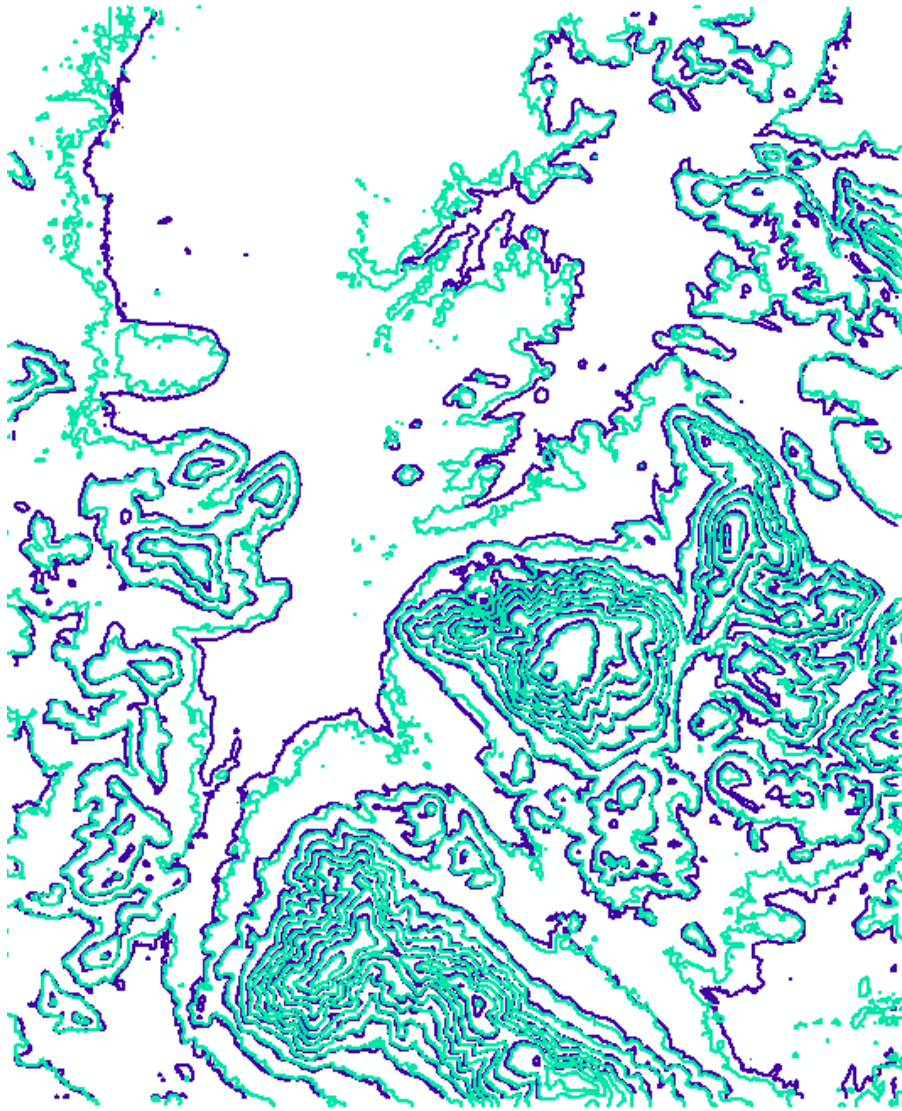
Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, οι ισοϋψείς καμπύλες των δύο ψηφιακών μοντέλων εδάφους, σχεδόν σε όλη την περιοχή έχουν μικρές διαφορές. Σφάλματα εντοπίζονται κυρίως στις υδάτινες επιφάνειες, που όπως έχει ήδη διαπιστωθεί από τα προηγούμενα, το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ δεν απεικονίζει σωστά, με αποτέλεσμα να εμφανίζει καμπύλες πάνω σε αυτές. Επίσης, στο βόρειο και δυτικό τμήμα της περιοχής και κοντά στην ακτογραμμή (ανατολικά), οι ισοϋψείς των δύο μοντέλων δεν συμπίπτουν, όπως και στο λατομείο. Σε γενικές γραμμές όμως το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ, αναπαριστά με πιστότητα το ανάγλυφο της περιοχής.



Εικόνα 6.15-Ισοϋψείς ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. (μπλε γραμμή) και ΨΜΕ SRTM (κόκκινη γραμμή).

Παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των ισοϋψών των δύο ΨΜΕ. Διαφορές εντοπίζονται τόσο στη μορφή τους, όσο και στη θέση τους, καθώς εντοπίζονται μετατοπίσεις των ισοϋψών του SRTM σε σχέση με τις αντίστοιχες του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. Συγκεκριμένα οι ισοϋψείς του ΨΜΕ του SRTM, παρατηρούνται να είναι περισσότερο ομαλές όταν οι αντίστοιχες του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. είναι λιγότερο ομαλές και το αντίθετο. Επίσης, οι ισοϋψείς των ακτογραμμών στην περίπτωση του ΨΜΕ SRTM παρουσιάζουν έντονες ανωμαλίες.

Γενικά, οι μεγάλες διαφοροποιήσεις μεταξύ των ισοϋψών των δύο ΨΜΕ εντοπίζονται, κυρίως, σε χαμηλότερα υψόμετρα και περισσότερο στο βόρειο και δυτικό τμήμα της περιοχής.



Εικόνα 6.16- Ισοϋψείς ΨΜΕ Κτηματολόγιο Α.Ε. (μπλε γραμμή) και ΨΜΕ ASTER (γαλάζια γραμμή).

Και σε αυτή την περίπτωση, οι έντονες διαφοροποιήσεις εντοπίζονται κυρίως σε μικρά υψόμετρα και περιλαμβάνουν οριζοντιογραφική μετάθεση, ενώ γενικά οι υψομετρικές καμπύλες του ΨΜΕ ASTER είναι περισσότερο τραχιές. Επιπλέον, εντοπίζονται κλειστές μεμονωμένες καμπύλες χωρίς να υφίστανται στην πραγματικότητα.

Αντίθετα, σε μεγαλύτερα υψόμετρα η συμπεριφορά του ΨΜΕ του ASTER είναι πολύ καλύτερη. Παρόλα αυτά, όπως παρατηρείται, από το κεντρικό μέχρι το βόρειο τμήμα της περιοχής, καθώς επίσης και στο νοτιοανατολικό, οι αποκλίσεις (οριζοντιογραφική μετάθεση) μεταξύ των ισοϋψών των δύο μοντέλων είναι αρκετά έντονες. Επιπλέον το ΨΜΕ του ASTER, περιγράφει αρκετά ικανοποιητικά τις περιοχές κοντά στις ακτογραμμές, όπως επίσης και τα δύο νησάκια, αν και με μια μικρή μετατόπιση σε σχέση με τις αντίστοιχες υψομετρικές καμπύλες του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε.

Ανακεφαλαιώνοντας, όλοι οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν παραπάνω προσφέρουν σημαντικά αποτελέσματα για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των υπό

έλεγχο ΨΜΕ. Οι στατιστικοί έλεγχοι ειδικά, δίνουν συγκεκριμένα αριθμητικά αποτελέσματα, και μπορούν ίσως να θεωρηθούν περισσότερο αποτελεσματικοί. Παρόλα αυτά και οι οπτικοί έλεγχοι είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για την αξιολόγηση ενός ΨΜΕ, καθώς μπορούν να αναδείξουν οπτικά, σφάλματα και αστοχίες οι οποίες δεν εντοπίζονται διαφορετικά. Σε όλες τις περιπτώσεις, υπεισέρχονται σφάλματα που υπάρχουν στα δεδομένα αναφοράς.

Αναφέρεται ότι η περίπτωση του ελέγχου raster-to-raster ίσως μειονεκτεί έναντι των ελέγχων με σημεία γνωστού υψομέτρου, λόγω των σφαλμάτων που αποδείχθηκε ότι περιέχει το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. Επίσης, η οπτικοποίηση των υψομετρικών διαφορών των ΨΜΕ με το ΨΜΕ αναφοράς, αλλά και η σύγκριση των τομών των ψηφιακών μοντέλων δίνουν σημαντικά αποτελέσματα, ενώ ο υπολογισμός των κλίσεων δίνει πολύ χρήσιμες πληροφορίες για την σωστή αναπαράσταση του αναγλύφου από τα ΨΜΕ και για τον εντοπισμό αστοχιών που πιθανόν παρουσιάζουν. Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί, ότι οι δείκτες που παρέχουν ουσιαστικότερες πληροφορίες είναι κυρίως οι στατιστικοί έλεγχοι, η οπτικοποίηση των τομών και των υψομετρικών διαφορών των υπό έλεγχο μοντέλων με το ΨΜΕ αναφοράς, και ο υπολογισμός των κλίσεων της περιοχής.

Καταλήγοντας, σημειώνεται, ότι οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν, καταδεικνύουν ότι το λιγότερο ακριβές παγκόσμιο μοντέλο για την περιοχή είναι το ΨΜΕ του ASTER. Το υψομετρικό αυτό μοντέλο παρουσίασε χειρότερα αποτελέσματα συγκριτικά με το ΨΜΕ SRTM, στους περισσότερους ελέγχους, ενώ αποδείχθηκε ότι περιέχει θόρυβο, με αποτέλεσμα να μην αναπαριστά με πιστότητα το ανάγλυφο της περιοχής.

Κεφάλαιο 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται συνολικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τους στατιστικούς αλλά και τους οπτικούς ελέγχους, που προηγήθηκαν στο κεφάλαιο 6. Γίνεται μια αναφορά ξεχωριστά σε κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους και στα αποτελέσματα του κάθε ελέγχου, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των ελέγχων μεταξύ τους και εξετάζεται αν αυτά συνάδουν με τις προδιαγραφές των προϊόντων, όπου αυτές είναι διαθέσιμες. Στη συνέχεια γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έλεγχο των ΨΜΕ.

7.1 Ακρίβεια Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους της Κτηματολόγιο Α.Ε.

Το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. θεωρήθηκε αρχικά ως μοντέλο αναφοράς, καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πληροφορία που περιέχει είναι η πιο πυκνή σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα, λόγω του μεγέθους φατνίου, το οποίο είναι 5m. Επίσης, ένας ακόμη λόγος είναι ότι έχει παραχθεί με εφαρμογή φωτογραμμετρικών μεθόδων, οι οποίες θεωρούνται ιδιαίτερα ακριβείς.

Παρόλα αυτά, το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. ελέγχθηκε με τη μέθοδο raster-to-point, με χρήση των τριγωνομετρικών σημείων της περιοχής και των σημείων ελέγχου που μετρήθηκαν με GPS. Επίσης, έγιναν και οπτικοί έλεγχοι της ποιότητας του προϊόντος. Τα αποτελέσματα συνοπτικά είναι τα εξής:

- Εντοπίστηκε ύπαρξη μικρού μεγέθους συστηματικού σφάλματος, σύμφωνα με τους στατιστικούς ελέγχους. Το αποτέλεσμα αυτό επαληθεύθηκε από τα διαγράμματα κατανομής των υψομετρικών διαφορών, από τα οποία διαπιστώθηκε συστηματική μετατόπιση του ΨΜΕ, «πάνω» από τα τριγωνομετρικά και τα σημεία ελέγχου (υπερεκτίμηση υψομέτρων).
- Η ακρίβεια του ΨΜΕ, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, είναι εντός των προδιαγραφών του, αν και χαμηλότερη από την αντίστοιχη του ΨΜΕ του ΟΚΧΕ.
- Από τους οπτικούς ελέγχους, διαπιστώθηκε η ύπαρξη κενού στα νότια της περιοχής, ενώ κατά τα άλλα το μοντέλο περιγράφει πολύ καλά το πραγματικό ανάγλυφο και υπερτερεί έναντι του ΨΜΕ του ΟΚΧΕ.
- Απεικονίζει σωστά τις ακτογραμμές.
- Διαπιστώθηκε ύπαρξη θορύβου δυτικά του αερολιμένα των Σπάτων, κατά τον οπτικό έλεγχο με χρήση του προσανατολισμού.

7.2 Ακρίβεια Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους του OKXE OE

Το ΨΜΕ του OKXE, ελέγχθηκε τόσο με στατιστικούς όσο και με οπτικούς ελέγχους. Να σημειωθεί ότι δεν διατίθενται προδιαγραφές για την ακρίβεια του εν λόγω μοντέλου. Τα συμπεράσματα είναι τα εξής:

- Δεν περιέχει συστηματικά σφάλματα, σύμφωνα με τους ελέγχους raster-to-point, τόσο με τα τριγωνομετρικά σημεία της περιοχής, όσο και με τα σημεία ελέγχου που μετρήθηκαν με GPS.
- Παρουσιάζει το μικρότερο γενικό σφάλμα και την μεγαλύτερη ακρίβεια για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.
- Εμφανίζει μεγαλύτερα όρια τιμών για το μεγαλύτερο ποσοστό των σφαλμάτων σε σύγκριση με το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε.
- Έχει τις μικρότερες υψομετρικές διαφορές από το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., στον έλεγχο raster-to-raster, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την απεικόνιση των συγκεκριμένων διαφορών.
- Παρουσιάζει συμμετρία υψομετρικών διαφορών σε όλες τις περιπτώσεις.
- Φαίνεται να «ακολουθεί» το ανάγλυφο της περιοχής με παρόμοιο τρόπο με το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε.
- Παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες τιμές στατιστικών μεγεθών στον έλεγχο με τριγωνομετρικά σημεία, σε σχέση με τα σημεία ελέγχου.
- Διαπιστώθηκε, από τον οπτικό έλεγχο με τη σκίαση αναγλύφου, μια υψομετρική ασυνέχεια-ανωμαλία, με γραμμική μορφή και διεύθυνσης Β-Ν, με τη μορφή βυθίσματος, που πιθανώς οφείλεται σε εσφαλμένη σύνδεση διαδοχικών φωτογραμμετρικών μοντέλων κατά τη διαδικασία παραγωγής του ΨΜΕ.
- Εντοπίστηκε αδυναμία απεικόνισης των υδάτινων επιφανειών, οι οποίες εμφανίζονται με ανάγλυφο.
- Παρατηρήθηκαν σφάλματα στην απόδοση των ακτογραμμών.

7.3 Ακρίβεια Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους SRTM

Όσον αφορά στο ΨΜΕ SRTM, τα συμπεράσματα από τους στατιστικούς ελέγχους, αλλά και τους οπτικούς, είναι τα εξής:

- Διαπιστώθηκε η ύπαρξη συστηματικού σφάλματος σε όλους τους στατιστικούς ελέγχους, τάξης μεγέθους -2.84m περίπου στους ελέγχους raster-to-raster και με σημεία ελέγχου και της τάξης των 8.35m στον έλεγχο με τριγωνομετρικά σημεία.
- Το γενικό σφάλμα, όπως και η ακρίβεια αυτού του παγκόσμιου ΨΜΕ (GDTM), για την περιοχή ελέγχου και για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, είναι καλύτερα από τα αντίστοιχα στατιστικά μεγέθη του ASTER v2, ενώ το γραμμικό του σφάλμα για επίπεδο εμπιστοσύνης 90% (LE90) είναι εντός των προδιαγραφών του.

- Οι τιμές των στατιστικών μεγεθών ελέγχου της ακρίβειας του ΨΜΕ, είναι μεγαλύτερες για τον έλεγχο με τα τριγωνομετρικά σημεία και μικρότερες στον έλεγχο raster-to-raster. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι τα τριγωνομετρικά σημεία βρίσκονται σε θέσεις με σχετικά μεγάλο υψόμετρο, και πιθανότατα το ΨΜΕ SRTM να μην περιγράφει ικανοποιητικά τέτοιου είδους θέσεις (ακρότατα). Επιπλέον, ίσως το ΨΜΕ SRTM για τη συγκεκριμένη περιοχή να προσαρμόζεται ικανοποιητικά στο ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε.
- Εντοπίζεται συστηματική μετατόπιση του ΨΜΕ «υψηλότερα» από τα τριγωνομετρικά σημεία, αλλά και από το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. (υπερεκτίμηση υψομέτρων).
- Συστηματική μετατόπιση «χαμηλότερα» από το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. εντοπίζεται σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο και προσανατολισμό βόρειο και δυτικό.
- Σε αδρές γραμμές σωστή αναπαράσταση του αναγλύφου, αλλά υστερεί σε απόδοση λεπτομερειών, λόγω του μεγέθους του φατνίου.
- Οριζοντιογραφική μετάθεση, σε σχέση με τις αντίστοιχες υψομετρικές καμπύλες του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. και ύπαρξη ισοϋψών καμπυλών σε θέσεις που δεν υφίστανται.
- Οι ακτογραμμές περιγράφονται με πολύ τραχιές γραμμές.
- Σωστή απεικόνιση των υδάτινων επιφανειών.

7.4 Ακρίβεια Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους ASTER v2

Τα συμπεράσματα από τους στατιστικούς και τους οπτικούς ελέγχους του συγκεκριμένου ΨΜΕ, είναι τα εξής:

- Περιέχει συστηματικό σφάλμα και μάλιστα το μεγαλύτερο σε σχέση με τα άλλα ελεγχθέντα ΨΜΕ.
- Έχει τη μικρότερη υψομετρική ακρίβεια για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, αλλά τα εξαχθέντα αποτελέσματα είναι εντός των προδιαγραφών του προϊόντος για την περίπτωση των σημείων ελέγχου.
- Παρουσιάζει το μεγαλύτερο σφάλμα σε σχέση με τα υπόλοιπα ελεγχθέντα ΨΜΕ.
- Το μεγαλύτερο ποσοστό των σφαλμάτων, βρίσκεται σε μικρότερο εύρος, σε σχέση με τα αντίστοιχα σφάλματα του ΨΜΕ SRTM.
- Μεγαλύτερη απόκλιση του συγκεκριμένου ΨΜΕ από το πραγματικό ανάγλυφο της περιοχής σε σύγκριση με τα υπόλοιπα ελεγχθέντα ΨΜΕ.
- Παρατηρείται συστηματική υποεκτίμηση των υψομέτρων, καθώς το ΨΜΕ του ASTER v2 βρίσκεται συστηματικά χαμηλότερα από τα τριγωνομετρικά, τα σημεία ελέγχου και το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε.
- Εντοπίστηκε, από τους οπτικούς ελέγχους, ύπαρξη θορύβου σε όλο το εύρος της περιοχής.

- Περιγράφει σωστά τις υδάτινες επιφάνειες.
- Παρουσιάζει μετατοπισμένες ισοϋψείς καμπύλες σε σχέση με τις αντίστοιχες του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., ενώ σχηματίζονται ισοϋψείς σε θέσεις που δεν υφίστανται στην πραγματικότητα.
- Οι ακτογραμμές απεικονίζονται αρκετά κοντά στην πραγματικότητα και φαίνεται να «ακολουθούν» αυτές του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε.

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα που παρουσιάστηκαν αναλυτικά σε κάθε περίπτωση στο κεφάλαιο 6, αλλά και με τη βοήθεια των παραπάνω συγκεντρωτικών συμπερασμάτων, έγινε μια προσπάθεια αδρής απεικόνισης της γενικής ακρίβειας των ΨΜΕ σε κάθε έλεγχο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1-Συγκεντρωτικός πίνακας συμπεριφοράς ακρίβειας ΨΜΕ σε κάθε έλεγχο.

ΕΛΕΓΧΟΣ \ ΨΜΕ	ΚΤΑ.Ε.	ΟΚΧΕ	SRTM	ASTER
Τριγωνομετρικά σημεία				
Σημεία Ελέγχου				
ΨΜΕ Αναφοράς	-			
Τομές του εδάφους	-			
Οπτικοποίηση υψομετρ. διαφορών	-			
Σκίαση αναγλύφου				
Προσανατολισμός				
Κλίση				
Ισοϋψείς	-			

Υπόμνημα	
Πολύ υψηλή ακρίβεια	
Υψηλή ακρίβεια	
Μέτρια ακρίβεια	
Χαμηλή ακρίβεια	

Σε γενικές γραμμές, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ελέγχων, το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. μπορεί να θεωρηθεί ως το πιο ακριβές, καθώς αν και περιέχει συστηματικό σφάλμα, υπερτερεί στους οπτικούς ελέγχους σε σχέση με το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ, ενώ ανεξάρτητα από τους ελέγχους, γενικά θεωρείται ότι περιέχει περισσότερη πληροφορία. Λιγότερο ακριβές μπορεί να θεωρηθεί το ΨΜΕ ASTER, τόσο λόγω της χαμηλότερης ακρίβειας και του μεγαλύτερου σφάλματος, όσο και της ύπαρξης θορύβου σε αυτό.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι οι απαιτήσεις και οι προδιαγραφές των τεσσάρων ΨΜΕ διαφέρουν. Συγκεκριμένα, τα εθνικής εμβέλειας ΨΜΕ δημιουργήθηκαν με στόχο την παροχή υψηλών προδιαγραφών χωρικών πληροφοριών για τον ελλαδικό χώρο. Ειδικότερα το ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., παρέχει περισσότερα και αξιόπιστα υψομετρικά δεδομένα σε σχέση με το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ, καθώς πέρα από το μικρό βήμα του κανάβου του (5m), έχει αξιολογηθεί και πιστοποιηθεί η ακρίβεια και η ποιότητα του, συνεπώς ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να γνωρίζει αν και κατά πόσο η χρήση του ενδείκνυται για την εκάστοτε εφαρμογή. Αντίθετα το ΨΜΕ του ΟΚΧΕ, έχει δημιουργηθεί με αυτόματες διαδικασίες και χωρίς να έχει πιστοποιηθεί, συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί λιγότερο αξιόπιστο, ενώ για

εφαρμογές σε παραθαλάσσιες περιοχές, όπως αποδείχθηκε, δεν είναι κατάλληλο καθώς δεν περιγράφει σωστά το ανάγλυφο. Και τα δύο αυτά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τεχνικά έργα μεγάλης κλίμακας, λόγω της ανάλυσής τους.

Αντίστοιχα, τα δύο ΨΜΕ παγκόσμιας εμβέλειας που εξετάστηκαν, δημιουργήθηκαν με στόχο την κάλυψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερου ποσοστού της γήινης επιφάνειας, παρέχοντας υψηλής ποιότητας υψομετρικά δεδομένα και αναπαριστώντας με όσο το δυνατόν καλύτερο τρόπο το ανάγλυφο των περιοχών που καλύπτουν. Και τα δύο προϊόντα έχουν αξιολογηθεί και πιστοποιηθεί, συνεπώς είναι γνωστές εκ των προτέρων οι ακρίβειες που μπορούν να παρέχουν. Παρόλα αυτά, η ανάλυση αυτών των προϊόντων είναι αρκετά χαμηλότερη σε σχέση με τα εθνικής εμβέλειας ΨΜΕ δίνοντας χαμηλές ακρίβειες και μεγάλα σφάλματα για την Ελλάδα και συγκεκριμένα για την περιοχή που μελετήθηκε. Κατά συνέπεια, αν το ζητούμενο είναι μια εφαρμογή με ολοκληρωμένα και λεπτομερή αποτελέσματα τα παγκόσμια μοντέλα δεν ενδείκνυνται. Τα συγκεκριμένα ΨΜΕ είναι κατάλληλα για εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπως είναι η παρακολούθηση ηφαιστειών, οι υδρολογικές μελέτες, γεωλογικές μελέτες, κ.α.

Αξίζει να σημειωθούν τα εξής:

- Τα αποτελέσματα με τον έλεγχο raster-to-raster, δίνουν μεγαλύτερες τιμές στα στατιστικά μεγέθη, στην περίπτωση του ΨΜΕ OKXE και του ASTER, καθώς το ΨΜΕ αναφοράς περιέχει συστηματικό σφάλμα, το οποίο εμπλέκεται στους υπολογισμούς.
- Σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα του ελέγχου με τριγωνομετρικά σημεία δεν θεωρούνται ιδιαίτερα αξιόπιστα, καθώς το πλήθος των σημείων αυτών είναι πολύ μικρότερο από τα σημεία ελέγχου που μετρήθηκαν, ενώ δεν περιγράφουν πλήρως το ανάγλυφο της περιοχής, καθώς βρίσκονται σε περιοχές με σχετικά μεγάλο υψόμετρο, ώστε να εξυπηρετούν τον σκοπό για τον οποίο ιδρύθηκαν.

7.5 Συμπεράσματα για τα Παγκόσμια Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους

Σε αυτό το σημείο γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των στατιστικών ελέγχων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για τα παγκόσμια ψηφιακά μοντέλα σε σχέση με τα αποτελέσματα πιστοποίησής τους, για να διαπιστωθεί εάν συμφωνούν μεταξύ τους.

7.5.1 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους SRTM

Όπως έχει ήδη παρουσιαστεί (Ενότητα 3.2.6), το μοντέλο SRTM ελέγχθηκε με σημεία GPS, με ψηφιακά μοντέλα αναφοράς, και με υψομετρικά δεδομένα height patches. Τα αποτελέσματα που αφορούν την Ελλάδα από τους ελέγχους πιστοποίησης που πραγματοποιήθηκαν, είναι αυτά της Ευρασίας.

Στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κύρια στατιστικά μεγέθη από την πιστοποίηση του ΨΜΕ SRTM και των ελέγχων που πραγματοποιήθηκαν στα Μεσόγεια Αττικής.

Πίνακας 7.2-Συγκεντρωτικός πίνακας στατιστικών μεγεθών σε μέτρα της πιστοποίησης του ΨΜΕ SRTM και των ελέγχων στα Μεσόγεια Αττικής

	mean	σ	RMSE	LE90	LE95
Πιστοποίηση με σημεία GPS (Ευρασία)	-0.7	3.7	-	6.6	-
Πιστοποίηση με δεδομένα DTED2 (Ευρασία)	-0.07	4.5	5.36	8.07	-
Πιστοποίηση με Height patches (Ευρασία)	-1.79	5.99	8.28	12.48	-
Τριγωνομετρικά σημεία (Μεσόγεια)	8.35	8.22	11.62	13.52	22.77
Σημεία GPS (Μεσόγεια)	-2.84	6.42	6.99	10.56	13.71
ΨΜΕ αναφοράς (Μεσόγεια)	-2.28	5.97	6.39	9.82	12.52

Παρατηρούνται τα εξής:

- Η ακρίβεια που επιτεύχθηκε στην περιοχή μελέτης είναι σαφώς μικρότερη από την αντίστοιχη ακρίβεια της ευρύτερης περιοχής της Ευρασίας.
- Ο έλεγχος με χρήση τριγωνομετρικών σημείων δίνει με διαφορά τα χειρότερα αποτελέσματα, κάτι που πιθανόν οφείλεται στη θέση τους. Επίσης, εμφανίζουν πολύ μεγάλο συστηματικό σφάλμα και μάλιστα με αντίθετο πρόσημο από τους υπόλοιπους ελέγχους. Μια πιθανή εξήγηση για αυτό, είναι ο λανθασμένος εντοπισμός των σημείων από το ΨΜΕ SRTM, εξαιτίας της οριζοντιογραφικής μετάθεσης του ΨΜΕ (όπως παρατηρήθηκε και στις τομές υψομετρικού προφίλ), συνδυαστικά με τη θέση των τριγωνομετρικών σημείων (τοπικά ακρότατα).
- Οι έλεγχοι με σημεία GPS και με το ΨΜΕ αναφοράς στην περιοχή μελέτης συμφωνούν μεταξύ τους, δίνοντας τα πραγματικά σφάλματα του ΨΜΕ SRTM, παρέχοντας λίγο χειρότερη ακρίβεια από τη συνολική για την Ευρασία.

7.5.2 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους ASTER GDEM v.2

Και στην περίπτωση του ΨΜΕ ASTER γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των ελέγχων που πραγματοποιήθηκαν για την πιστοποίηση του προϊόντος, με τα αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων που έγιναν στην παρούσα εργασία. Τα αποτελέσματα από την πιστοποίηση του προϊόντος αναλύθηκαν στην Ενότητα 3.1.5. Στον Πίνακα 7.3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα βασικά στατιστικά μεγέθη των ελέγχων πιστοποίησης και των ελέγχων που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή των Μεσογείων.

Πίνακας 7.3-Συγκεντρωτικός πίνακας στατιστικών μεγεθών σε μέτρα της πιστοποίησης του ΨΜΕ ASTER και των ελέγχων στα Μεσόγεια Αττικής

	mean	σ	RMSE	LE90	LE95
Πιστοποίηση με σημεία GPS (CONUS)	-0.20	8.68	8.68	-	17.01
Πιστοποίηση με σημεία ελέγχου (Βοσνία)	-5.0	-	-	17.9	-
Πιστοποίηση με ΨΜΕ αναφοράς (Βοσνία)	-4.0	-	-	9.1	-
Τριγωνομετρικά σημεία (Μεσόγεια)	12.2	6.3	13.7	10.3	26.8
Σημεία GPS (Μεσόγεια)	7.9	4.4	9.0	7.2	17.7
ΨΜΕ αναφοράς (Μεσόγεια)	8.38	5.14	9.83	8.5	19.27

Σύμφωνα με τον πίνακα:

- Εντοπίζεται η ύπαρξη μεγάλου συστηματικού σφάλματος στο σύνολο των ελέγχων της περιοχής μελέτης, κάτι που δε συνάδει με τους ελέγχους του προϊόντος.
- Και σε αυτή την περίπτωση τα τριγωνομετρικά σημεία δίνουν τις χειρότερες ακρίβειες.
- Το γενικό σφάλμα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, και μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του SRTM.
- Αντίθετα, η σχετική ακρίβεια (σ , LE) είναι καλύτερη από αυτή του ΨΜΕ SRTM.

Το συμπέρασμα που εξάγεται από τα παραπάνω, είναι ότι οι ακρίβειες των παγκόσμιων ψηφιακών μοντέλων διαφοροποιούνται στις διαφορετικές περιοχές παγκοσμίως. Συνεπώς, το να βασίζεται ο εκάστοτε χρήστης στους γενικούς ελέγχους που έχουν γίνει από τους παρόχους για την πιστοποίηση των προϊόντων δεν είναι αρκετό, ειδικά σε αυτούς που έχουν πραγματοποιηθεί στις χώρες τους (Ιαπωνία και ΗΠΑ).

Σημειώνεται ότι η «απόλυτη» ακρίβεια του ΨΜΕ ASTER δεν υπερβαίνει τα 10m για την περιοχή μελέτης, ενώ είναι περίπου 2m καλύτερη για το ΨΜΕ SRTM.

7.6 Προτάσεις

Στην παρούσα εργασία οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν για όλο το εύρος της περιοχής και δόθηκε βάρος στην υψομετρική ακρίβεια των ΨΜΕ.

Για το λόγο αυτό, προτείνεται ο διαχωρισμός της προς εξέταση περιοχής τόσο σε υψομετρικές ζώνες, όσο και σε ζώνες χρήσεων γης (αστικές περιοχές, δασικές κ.α.) καθώς και ο ξεχωριστός έλεγχός τους, για την ποιότητα και την ακρίβεια των ΨΜΕ. Επιπλέον, προτείνεται έλεγχος για την οριζοντιογραφική ακρίβεια των ΨΜΕ, ενώ θα μπορούσαν να εξετασθούν επιπλέον ΨΜΕ που έχουν προκύψει από άλλες μεθόδους, όπως LiDAR, πυκνή συνταύτιση εικόνων κ.α.

Γενικά, προτείνεται ο έλεγχος των αρχικών δεδομένων και η γνώση τόσο των μεθόδων που εφαρμόστηκαν για την παραγωγή τους, όσο και των μετασχηματισμών

που ενδέχεται να έχουν υποστεί. Επίσης, όποιοι μετασχηματισμοί γίνουν στα δεδομένα για την εργασία που απαιτείται κάθε φορά, θα πρέπει να εξετάζονται για την πιθανή εισαγωγή σφαλμάτων στη διαδικασία και στο τελικό αποτέλεσμα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΦΟΡΩΝ

- Arrighi, P., Soille, P., 2009. From scanned topographic maps to digital elevation models, Silsoe, Bedfordshire.
- ASTER GDEM Validation team, 2009. ASTER Global DEM validation. (http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/image/ASTERGDEM_ValidationSummaryReport_Ver1.pdf)
- Farr, T. G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Douglas, B., Douglas, A., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission, Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183. (http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_paper.pdf)
- Haala, N., 2011. Multiray Photogrammetry and Dense Image Matching, *53rd Photogrammetric Week: Multi-ray Photogrammetry Meets Advanced Lidar*, Stuttgart.
- Hu, P., Liu, X., Hu, H., 2009. Accuracy Assessment of Digital Elevation Models based on Approximation Theory, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(1), pp. 49-56.
- Kajiwara, K., Tateishi, R., 1989, Efficient pre-processing of generating DEM from digitized contour map, AARS, proceedings ACRS. (<http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceeding/ACRS1989/Papers/DP189-2.htm>)
- Karel, W., Kraus, K., 2006. Quality parameters of digital terrain models, *Seminar on Automated Quality Control of Digital Terrain Models*, Aalborg, Denmark, pp.1-14. (http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/2006/Karel_Kraus_QualityPar4DTM.pdf)
- Karel, W., Preifer, N., Briese, C., 2006. DTM Quality Assessment, *ISPRS Technical Commission II Symposium*, Vienna, pp. 7-11.
- Kasser, M., Egels, Y., 2002, *Digital Photogrammetry*, Taylor & Francis, London.
- Kraus, K., Briese, C., Attwenger, M., Pfeifer, N., 2005. Quality measures for digital terrain models, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(2), pp. 113-118.
- Kraus, K., Karel, W., Briese, C., Mandlbürger, C., 2006. Local Accuracy Measures for Digital Terrain Models, *The Photogrammetric Record*, 21(116), Wiley-

- Blackwell, pp. 342-354. (<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1477-9730.2006.00400.x/abstract>)
- Li, P., Shi, C., Li, Z., Muller, J.P., Drummond, J., Li, X., Li, T., Li, Y., Liu, J., 2012. Evaluation of ASTER GDEM ver.2 using GPS measurements and SRTM ver.4.1 in China, *XXII ISPRS Congress*, volume I-4, Melbourne, Australia, pp. 181-186. (<http://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/I-4/181/2012/isprsanals-I-4-181-2012.pdf>)
- Maune, D. F., 2007. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual, 2nd Edition, ASPRS, Bethesda Maryland.
- Rodriguez, E., Morris, C.S., Belz, J.E., Chapin, E.C., Martin, J.M., Daffer, W., Hensley, S., 2005. An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, pp. 143. (http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_D31639.pdf)
- Tachikawa, T., Kaku, M., Iwasaki, A., Gesch, D., Oimoen, M., Zhang, Z., Danielson, J., Krieger, T., Curtis B., Haase, J., Abrams, M., Crippen, R., Carabajal, C., Meyer, D., 2011. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. (http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf)
- Zhu, C., Shi, W., Li, Q., Wang, G., Cheung, T. C. K., Dai, E., Shea, G. Y K., 2005. Estimation of average DEM accuracy under linear interpolation considering random error at the nodes of TIN model, *International Journal of Remote Sensing*, 26(24), Taylor & Francis, pp. 5509-5523.
- Αγατζά – Μπαλοδήμου, Α., Μ., 2009. Θεωρία Σφαλμάτων και Συνορθώσεις Ι, ΣΑΤΜ ΕΜΠ, Αθήνα.
- Καββάδας, Ι., 2010. Διασφάλιση Ποιότητας των Χαρτογραφικών Υποβάθρων του Εθνικού Κτηματολογίου, 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο *HellasGIS*, Αθήνα. (http://www.hellasgi.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=30&Itemid=30)
- Καραθανάση, Β., 2012. Μικροκυματική τηλεπισκόπηση, Διδακτικές σημειώσεις, ΣΑΤΜ ΕΜΠ, Αθήνα.
- Κώτσης, Ι., Μασσίνας, Β., Παραδείσης, Δ., 2008. Σημειώσεις Συμβολομετρίας με Radar Συνθετικού Ανοίγματος, Διδακτικές σημειώσεις, ΣΑΤΜ ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μαλτέζος, Ε., 2013. Εξαγωγή Πινάκων Ανομοιοτήτων Βάθους από Εναέριες Εικόνες Μέσω Πυκνής Συνταύτισης Σημείων, Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ, Αθήνα.

- Πρόκκος, Α., 2012. Δημιουργία Φωτογραμμετρικού Σαρωτή laser με Χρήση Πρόσθετων Γεωμετρικών Δεσμεύσεων, Διδακτορική διατριβή, ΣΑΤΜ ΕΜΠ, Αθήνα.
- Σκαρλάτος, Δ., 2006. Διερεύνηση της Αυτόματης Επιλογής Παραθύρου Ελαχιστοτετραγωνικής Συνταύτισης και του Ελέγχου Ψηφιακών Μοντέλων Αναγλύφου Χωρίς Δεδομένα Αναφοράς, Διδακτορική διατριβή, ΣΑΤΜ ΕΜΠ, Αθήνα.
- Φίλιππας, Δ., 2012. Ανάπτυξη Αλγοριθμικής Διαδικασίας για τον Εντοπισμό Συζυγών Θραυσμάτων, Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ, Αθήνα.

Διαδικτυακή Βιβλιογραφία

- <http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1> (πρόσβαση 24/04/2013)
- http://mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1106/document/%C4%E9%E1%F6%DC%ED%E5%E9%E5%F2_%C4%E9%E1%EB%DD%EE%E5%F9%ED/Foto_II_07_2013_DTM.pdf (πρόσβαση 22/04/2013)
- http://mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1106/document/%C4%E9%E1%F6%DC%ED%E5%E9%E5%F2_%C4%E9%E1%EB%DD%EE%E5%F9%ED/Foto_II_08_2013_LiDAR.pdf (πρόσβαση 30/04/2013)
- <http://gaea.in/downloads/RemoteSensing/Insar.pdf> (πρόσβαση 15/04/2013)
- http://portal.survey.ntua.gr/main/courses/geoinfo/admcarto/lecture_notes/dtm's/dtm's.pdf (πρόσβαση 15/03/2013)
- http://mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1106/document/%C4%E9%E1%F6%DC%ED%E5%E9%E5%F2_%C4%E9%E1%EB%DD%EE%E5%F9%ED/Foto_II_05_2013_%C1%E5%F1%EF%F4%F1%E9%E3%F9%ED%E9%F3%EC%F%C%F2_%26_%E1%EA%F1%DF%E2%E5%E9%E5%F2.pdf (πρόσβαση 20/06/2013)
- http://mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1106/document/%C4%E9%E1%F6%DC%ED%E5%E9%E5%F2_%C4%E9%E1%EB%DD%EE%E5%F9%ED/Foto_II_07_2013_DTM.pdf (πρόσβαση 20/06/2013)
- http://mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1012/document/%D0%C1%D1%CF%D5%D3%C9%C1%D3%C5%C9%D3_%CC%C1%C8%C7%CC%C1%D4%D9%CD/DigMap_10_2011-2012.pdf (πρόσβαση 26/06/2013)
- <http://www.computamaps.com/newsletter/3-3/newsletter3-3.html> (πρόσβαση 4/7/13)

<http://aerometrex.com.au/blog/?p=89> (πρόσβαση 4/7/13)

https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_elevation_model (πρόσβαση 4/7/13)

http://portal.survey.ntua.gr/main/courses/geoinfo/admcarto/lecture_notes/dtm's/dtm's.pdf (πρόσβαση 4/7/13)

http://www.ems-i.com/wmshelp/Terrain_Data/TIN/Triangles/Breaklines.htm
(πρόσβαση 7/7/13)

http://mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1093/document/1.%D3%E7%EC%E5%E9%FE%F3%E5%E9%F2_%CC%E1%E8%DE%EC%E1%F4%EF%F2/%C4%E9%E1%F6%DC%ED%E5%E9%E5%F2_%CC%E1%E8%DE%EC%E1%F4%EF%F2/4_Photo%20III_GK_Ortho.pdf (πρόσβαση 7/7/13)

http://mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1106/document/%C4%E9%E1%F6%DC%ED%E5%E9%E5%F2_%C4%E9%E1%EB%DD%EE%E5%F9%ED/Foto_II_07_2013_DTM.pdf (πρόσβαση 7/7/13)

http://mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1098/document/%D6%F9%F4%EF%E3%F1%E1%EC%EC%E5%F4%F1%E9%EA%DC_%FC%F1%E3%E1%ED%E1-%C1%F0%FC%E4%EF%F3%E7.pdf (πρόσβαση 7/7/13)

<http://www.math.ntua.gr/~fouskakis/descriptive.pdf> (πρόσβαση 2/8/2013)

http://www.asf.alaska.edu/~rgens/teaching/geos639/introduction_insar.pdf (πρόσβαση 22/8/13)

http://mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1106/document/%C4%E9%E1%F6%DC%ED%E5%E9%E5%F2_%C4%E9%E1%EB%DD%EE%E5%F9%ED/Foto_II_06_2013_SAR.pdf (πρόσβαση 12/8/13)

<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> (πρόσβαση 21/8/13)

<http://en.wikipedia.org/wiki/DTED> (πρόσβαση 24/8/13)

http://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Spaceborne_Thermal_Emission_and_Reflection_Radiometer (πρόσβαση 24/8/13)

<http://terra.nasa.gov/index.php?section=50> (πρόσβαση 24/8/13)

<http://asterweb.jpl.nasa.gov/> (πρόσβαση 24/8/13)