



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

ΕΡΓΟ ΑΠΘ: ΘΑΛΗΣ 85492



Χαρτογράφηση βλάστησης και εκτίμηση βιομάζας με σύγχρονες μεθόδους Τηλεπισκόπησης στο πλαίσιο της σύμβασης των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή και του Πρωτοκόλλου του Κιότο

Παραδοτέο 5.β

Τίτλος Τεχνικής Έκθεσης:

Διερεύνηση της καταλληλότητας της Συμβολομετρικής μεθόδου για την εκτίμηση του μέσου ύψους δένδρων των χαρτογραφούμενων κατηγοριών και ειδών βλάστησης με χρήση SAR απεικονίσεων



Θεσσαλονίκη, Σεπτέμβριος 2014

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Δρ. Ιωάννης Γήτας, Αναπλ. Καθηγητής Σχολής Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος Α.Π.Θ.

Τηλ: 2310992699

E-mail: igitas@for.auth.gr

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΠΑΡΑΔΟΤΕΟΥ

Δρ. Βασιλεία Καραθανάση, Αναπλ. Καθηγήτρια Σχολής Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Τηλ: 210 7722695

E-mail: karathan@survey.ntua.gr

ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αναπλ. Καθ. Βασιλεία Καραθανάση

Λεκτ. Κωνσταντίνος Τοπουζέλης

Δρ. Χαρούλα Ανδρέου

Υποψ. Δρ. Βασίλειος Ανδρώνης

Επ. Καθ. Χαράλαμπος Γεωργιάδης

Λεκτ. Αντώνιος Μουρατίδης



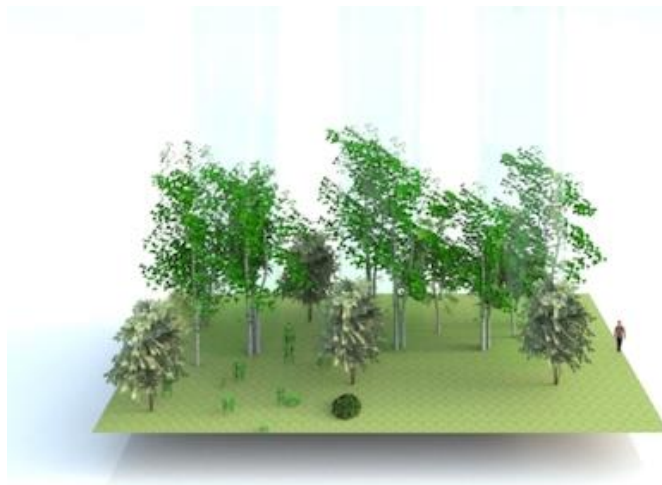
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Ερευνητικό Πρόγραμμα ΘΑΛΗΣ

ΕΡΓΟ 85492: TELE-ΚΥΟΤΟ

Παραδοτέο 5β

Διερεύνηση της καταλληλότητας της Συμβολομετρικής μεθόδου για την εκτίμηση του μέσου ύψους δένδρων των χαρτογραφούμενων κατηγοριών και ειδών βλάστησης με χρήση SAR απεικονίσεων.



Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

Πίνακας Περιεχομένων

1 Ορισμός του προβλήματος	1
2 Τεχνικές παρατήρησης δασικών βιοφυσικών παραμέτρων	1
3 Στόχοι και Κίνητρα	2
4 Λογισμικό	3
5 Περιοχή μελέτης.....	3
6 Περιγραφή δεδομένων.....	4
6.1 Απεικονίσεις ALOS PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)	5
6.2 Απεικονίσεις COSMO-SkyMed	6
6.3 Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς	7
6.4 Επίγεια δεδομένα.....	8
7 Ανάπτυξη της μεθοδολογίας	8
7.1 Σήμα SAR και δασική κομοστέγη.....	8
7.2 Υπάρχουσες μεθοδολογίες.....	9
7.3 Διαμόρφωση της μεθοδολογίας	12
8 Περιγραφή της μεθοδολογίας.....	13
8.1 Περιγραφή διαδικασίας παραγωγής ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων	13
8.2 Υπολογισμός συμβολομετρικού ύψους	19
9 Παρουσίαση παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων.....	19
10 Εκτίμηση ακρίβειας παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων.....	21
11 Αξιολόγηση εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης	27
11.1 Αξιολόγηση της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης με βάση τα επίγεια δεδομένα.....	29
11.2 Αξιολόγηση της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης με βάση τις κλίσεις και τον προσανατολισμό των επιφανειών της περιοχής μελέτης	30
11.3 Αξιολόγηση της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης στις χέρσες περιοχές	31
11.4 Αξιολόγηση της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης στο πολύγωνο πυκνής βλάστησης.....	33
12 Συμπεράσματα	34
13 Περιορισμοί και πλεονεκτήματα της μεθόδου (προτεινόμενης μεθοδολογίας)	36
14 Προτάσεις.....	37
Βιβλιογραφία	39

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 Πάνω: Περιοχή μελέτης χρησιμοποιώντας ως εικόνα αναφοράς μια απεικόνιση Landsat 8 στο σύστημα αναφοράς WGS 84 Δεξιά: Μεγέθυνση της περιοχής μελέτης.....	3
Εικόνα 2 Απεικόνιση slc από το σύστημα ALOS PALSAR.....	5
Εικόνα 3 Απεικόνιση slc από το σύστημα COSMO-SkyMed.....	6
Εικόνα 4 Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς από τη ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.....	7
Εικόνα 5 Επίγειες παρατηρήσεις στη περιοχή μελέτης.....	8
Εικόνα 6 Παραγόμενο συμβολόγραμμα απεικονίσεων ALOS PALSAR.....	15
Εικόνα 7 Παραγόμενο συμβολόγραμμα από τις απεικονίσεις COSMO-SkyMed.....	16
Εικόνα 8 Εικόνες συνάφειας με τα ιστογράμματα τους: Αριστερά :ALOS PALSAR Δεξιά: COSMO-SkyMed.....	17
Εικόνα 9 Τρόπος προσδιορισμού του συμβολομετρικού ύψους.....	19
Εικόνα 10 Παραγόμενα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα με τη τεχνική της συμβολομετρίας.....	21
Εικόνα 11 Εικόνες ακρίβειας παραγόμενων συμβολομετρικών ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων.....	23
Εικόνα 12 Παραγωγή του χάρτη κλίσεων της περιοχής ενδιαφέροντος.....	25
Εικόνα 13 Εκτίμηση ύψους δασικής κομοστέγης.....	27
Εικόνα 14 Σχέση γωνία πρόσπτωσης και διαπεραστικότητα.....	28
Εικόνα 15 Χωρική κατανομή σημείων επίγειων μετρήσεων δασικού ύψους κομοστέγης.....	29
Εικόνα 16 Προϊόντα καθορισμού χέρσων περιοχών.....	31
Εικόνα 17 Καθορισμός χέρσων περιοχών (κίτρινες).....	32
Εικόνα 18 Προϊόντα για τον καθορισμό του πολυγώνου πυκνής βλάστησης.....	33
Εικόνα 19 Ιστόγραμμα για το πολύγωνο πυκνής δασικής βλάστησης.....	33

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1 Τηλεπισκοπικές τεχνικές για τη μελέτη δασικών εκτάσεων.....	1
Πίνακας 2 Μελέτη ακρίβειας παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από δεδομένα Χ μπάντας από αερομεταφερόμενα συστήματα.....	11
Πίνακας 3 Ακρίβεια παραγόμενων υψομετρικών μοντέλων από δεδομένα Χ μπάντας σε σχέση με το είδος του δάσους, τα δεδομένα SAR και τα δεδομένα αναφοράς.....	12
Πίνακας 4 Αποτελέσματα αξιολόγησης.....	22
Πίνακας 5 Σχέση της συνάφειας με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα.....	24
Πίνακας 6 Σχέση των κλίσεων με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων.....	25

Πίνακας Σχημάτων

<i>Σχήμα 1 Διάγραμμα ροής εμπειρικής μεθόδου</i>	13
<i>Σχήμα 2 Σχέση της συνάφειας με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα</i>	24
<i>Σχήμα 3 Σχέση των κλίσεων της περιοχής μελέτης με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων</i>	26
<i>Σχήμα 4 Σύγκριση εκτιμώμενου και μετρούμενου ύψους δασικής κομοστέγης</i>	30
<i>Σχήμα 5 Σημεία επίγειων μετρήσεων στις προσανατολισμένες επιφάνειες προς τους αισθητήρες των συστημάτων SAR</i>	30
<i>Σχήμα 6 Αξιολόγηση του ύψους δασικής κομοστέγης με βάση τα επίγεια δεδομένα για τις βέλτιστες κλίσεις</i>	31
<i>Σχήμα 7 Ιστόγραμμα για τις χέρσες περιοχές της περιοχής ενδιαφέροντος</i>	32

1 Ορισμός του προβλήματος

Το 70% της γήινης χερσαίας γης καλύπτεται από βλάστηση (NOAA, 2011). Η βλάστηση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παραμέτρους στις διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες της βιόσφαιρας για τη συνέχιση της ζωής στο πλανήτη μας (Kleidon, 2012). Η κατανομή και η δομή της βλάστησης μεταβάλλεται γρήγορα λόγω ανθρωπογενών (πυρκαγιές, επέκταση αστικού ιστού, δασοκομία, γεωργία, κατασκευή έργων υποδομής για ενεργειακούς σκοπούς, υπαίθρια ορυχεία κ.λπ.) και φυσικών (εκρήξεις ηφαιστειών, πλημμύρες) παραγόντων. Για την ποσοτικοποίηση των αλλαγών στο ιστό βλάστησης απαιτείται η δημιουργία των σχετικών χαρτών. Οι χάρτες που απεικονίζουν την κάλυψη της βλάστησης και του δασικού ύψους είναι απαραίτητοι για πολλές εφαρμογές που σχετίζονται με το πεδίο όπως η μοντελοποίηση πλημμύρας, η τοπογραφική και γεωλογική απεικόνιση της περιοχής ενδιαφέροντος, η βιομάζα, οι δασικές πυρκαγιές και πολλά άλλα. Σχετικά με τη διαχείριση των πόρων ξυλείας, το δασικό ύψος είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλες δασικούς παραμέτρους (στηθιαία διάμετρος, πλάτος δασικής στεφάνης κ.α.) σε αλλομετρικές εξισώσεις για την εκτίμηση του όγκου ξυλείας (West, 2009). Το δασικό ύψος αποτελεί μια μεταβλητή που είναι απαραίτητη και για τον ακριβή προσδιορισμό των επιπέδων της βιομάζας AGB (Above Ground Biomass) (Balzter et al., 2007a). Τα επίπεδα της βιομάζας εκτός των άλλων χρησιμοποιούνται και για την εκτίμηση του οξυγόνου της ατμόσφαιρας.

2 Τεχνικές παρατήρησης δασικών βιοφυσικών παραμέτρων

Η μέτρηση των δασικών βιοφυσικών παραμέτρων όπως το ύψος κομοστέγης χρησιμοποιώντας παραδοσιακές τεχνικές πεδίου έχει μεγάλο κόστος σε χρόνο και χρήμα και τις περιπτώσεις είναι αδύνατο να εφαρμοστεί σε γεωγραφικά εκτεταμένες περιοχές λόγω της μικρής χωρικής συχνότητας (under-sampling) των επίγειων δεδομένων με αποτέλεσμα την ύπαρξη μεγάλων σφαλμάτων (Fisher et al., 2008). Τα τηλεπισκοπικά δεδομένα λόγω της μεγάλης χωρικής κάλυψης, της χρονικής συχνότητας αλλά και του μικρού οικονομικού κόστους είναι μια εναλλακτική λύση στο πρόβλημα υπολογισμού των δασικών μεταβλητών (Næsset et al., 2002, Drake et al., 2002). Ο συνδυασμός τηλεπισκοπικών δεδομένων και δεδομένων πεδίου προσφέρει δυνατότητες για την βελτίωση της ακρίβειας του υπολογισμού των δασικών παραμέτρων.

Οι σημαντικότερες τηλεπισκοπικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των δασικών παραμέτρων περιγράφονται από τις βιβλιογραφικές αναφορές οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Τηλεπισκοπικές τεχνικές	Κυριότερες μελέτες
Επεξεργασία Αεροφωτογραφιών	Mikhail et al., 2001, Jensen, 2005, Lillesand et al., 2008
Lidar	Means et al. 2000, Lefsky et al., 2002, Andersen et al., 2005
InSAR	Madsen et al., 1993, Hensley et al., 2000, Hensley et al., 2001, Rabus et al., 2003
PollnSAR	Cloude and Papathanassiou 1997, 1998, 2003 Mercer et al., 2007

Πίνακας 1 Τηλεπισκοπικές τεχνικές για τη μελέτη δασικών εκτάσεων

Οι συγκεκριμένες τεχνολογίες έχουν τη δυνατότητα παραγωγής υψηλής ποιότητας υψομετρικών ψηφιακών μοντέλων, χαρτών κάλυψης βλάστησης, και την παροχή μετρήσεων σχετικά με δασικές μεταβλητές όπως το ύψος της βλάστησης (Balzter et al., 2001, Williams et al., 2010).

Η συγκεκριμένη εργασία εστιάζει στην εκτίμηση του ύψους δασικής κομοστέγης. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικότερες προσεγγίσεις σχετικά με την εκτίμηση του ύψους δασικής κομοστέγης

1. Παραδοσιακές επίγειες μέθοδοι
Άμεσος υπολογισμός δασικού ύψους κομοστέγης με τη χρήση υψομετρικών στηλεών (Schreuder et al., 1993)
Έμμεσος υπολογισμός δασικού ύψους χρησιμοποιώντας την τριγωνική γεωμετρία μεταξύ των παρατηρήσεων στη βάση και στην κορυφή ενός δέντρου (Wing et al., 2004).
2. Στερεοφωτογραμμετρικές μέθοδοι σε οπτικές εικόνες (Fensham et al., 2002; Paine and Kiser, 2003).
3. Χρήση φωτογραμμετρικών μεθόδων σε οπτικές απεικονίσεις με σύγχρονη αξιοποίηση της ανακλαστικότητας για την εκτίμηση του δασικού ύψους κομοστέγης (Miller et al., 2000, Franklin et al., 2003, Riccehetti, 2005).
4. Παρατηρήσεις Lidar που έχουν τα ακριβέστερα αποτελέσματα συγκριτικά με τις υπόλοιπες τηλεπισκοπικές μεθόδους (Means et al., 2000, Lefsky et al., 2002, Andersen et al., 2005).
5. Χρήση δεδομένων SAR.

Η τεχνική της συμβολομετρίας απεικονίσεων SAR χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό την τελευταία δεκαετία ως μια τεχνική υπολογισμού και εκτίμησης των δασικών παραμέτρων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική έρευνα που πραγματοποιήθηκε, οι περισσότερες έρευνες διεξάγονται σε μικρές χωρικές κλίμακες λόγω της έλλειψης μεθόδων και μοντέλων για την εφαρμογή της τεχνικής της συμβολομετρίας σε ευρύτερες περιοχές. Η συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει τη μεθοδολογία που χρησιμοποιεί δορυφορικές απεικονίσεις SAR δυο διαφορετικών συχνοτήτων (μπάντα L και ,X) για την εκτίμηση του δασικού ύψους. Πιο συγκεκριμένα, η μεθοδολογία περιλαμβάνει τη παραγωγή ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων με τη χρήση της τεχνικής της συμβολομετρίας και τον υπολογισμό του δασικού ύψους από την αφαίρεσή τους.

3 Στόχοι και Κίνητρα

Η συγκεκριμένη εργασία είχε ως κίνητρο την αξιοποίηση και αξιολόγηση των εξελιγμένων συστημάτων SAR (COSMO-skymed, ALOS PALSAR) ως προς την εκτίμηση του ύψους δασικής κομοστέγης. Ο βασικός στόχος της εργασίας είναι η εξέταση της δυνατότητας της τεχνικής της συμβολομετρίας διπλής συχνότητας δορυφορικών απεικονίσεων SAR σχετικά με την εκτίμηση του ύψους δασικής κομοστέγης στην περιοχή του Ταξιάρχη στη Χαλκιδική.

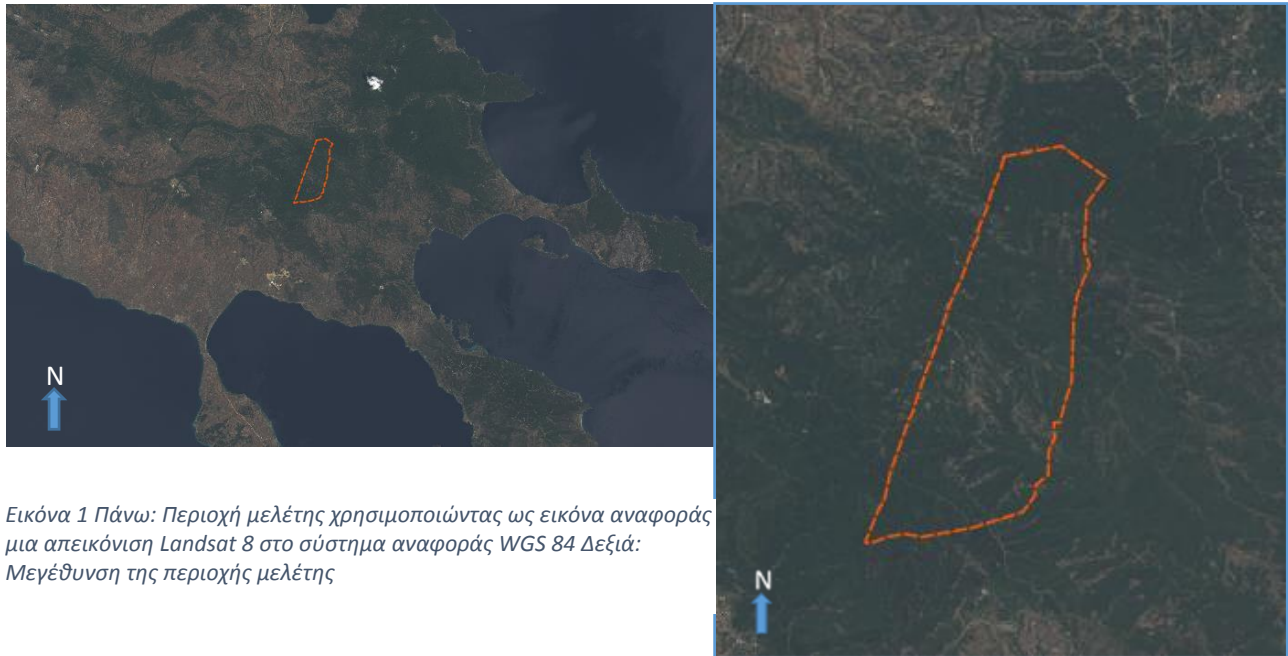
Ειδικότεροι στόχοι αυτής της εργασίας είναι:

- Ο προσδιορισμός της υψομετρικής ακρίβειας του ύψους δασικής κομοστέγης χρησιμοποιώντας το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο από τις απεικονίσεις COSMO-Skymed και το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους από τις απεικονίσεις ALOS PALSAR.
- Η διερεύνηση της ορθότητας του συμβολομετρικού ύψους σε σχέση με τα επίγεια δεδομένα.
- Η αξιολόγηση του εκτιμώμενου δασικού ύψους σε σχέση με την εικόνα συνάφειας, τις κλίσεις και τον προσανατολισμό των επιφανειών της περιοχής μελέτης, και τη δασική κάλυψη (χέρσες περιοχές, πολύγωνο πυκνής βλάστησης).

4 Λογισμικό

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τη συμβολομετρική επεξεργασία είναι το SARscape v.-5.0. Το SARscape είναι ένα επιπρόσθετο λογισμικό (add-on module) που λειτουργεί κάτω από την ομπρέλα του λογισμικού ENVI. Το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων αλλά και για την αξιολόγησή τους. Τέλος για την παραγωγή και την επεξεργασία των χαρτών χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο λογισμικό QGIS (Quantum GIS).

5 Περιοχή μελέτης



Εικόνα 1 Πάνω: Περιοχή μελέτης χρησιμοποιώντας ως εικόνα αναφοράς μια απεικόνιση Landsat 8 στο σύστημα αναφοράς WGS 84 Δεξιά: Μεγέθυνση της περιοχής μελέτης

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω χάρτη η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην περιοχή του Ταξιάρχη στην Χαλκιδική. Τα όρια των γεωγραφικών συντεταγμένων της περιοχής ενδιαφέροντος στην προβολή UTM 34N WGS 84 είναι $(xMin, yMin) = (711393.90, 4474420.82)$ και $(xMax, yMax) = (717182.73, 4483957.40)$. Η συγκεκριμένη περιοχή μελέτης είναι ένα κομμάτι του πανεπιστημιακού δάσους Ταξιάρχη στη Χαλκιδική.

Το πανεπιστημιακό δάσος Ταξιάρχη Χαλκιδικής βρίσκεται στις Νότιες και Νοτιοδυτικές πλαγιές του όρους Χολομών σε μια απόσταση 70 χιλιομέτρων από τη Θεσσαλονίκη. Η συνολική έκταση του δάσους είναι 5835 ha από τα οποία 3895 ha είναι δασοσκεπής έκταση (από τα οποία 107 ha είναι Κοινοτικό δάσος), 264 ha είναι μερικώς δασοσκεπής έκταση, 1592 είναι καλλιεργούμενη έκταση και 85 ha είναι άγονη έκταση. Το κλίμα είναι Μεσογειακό-Ηπειρωτικό. Η μέση θερμοκρασία αέρος είναι $10.7^{\circ} C$, ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος είναι οι ψυχρότεροι μήνες με μέση θερμοκρασία αέρος $1.7^{\circ} C$ και οι Ιούλιος και Αύγουστος οι θερμότεροι μήνες με μέση θερμοκρασία $20.2^{\circ} C$. Η υψηλότερη θερμοκρασία αέρα που έχει καταγραφεί είναι $35.5^{\circ} C$ και η χαμηλότερη $-15^{\circ} C$. Η μέση ετήσια υγρασία είναι 73.1%. Στο δάσος παρατηρείται μέση ετήσια βροχόπτωση περίπου 748mm. Από φυτοκοινωνικής άποψης το δάσος ανήκει στη ζώνη Quercetalia (δρύες). Στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής εμφανίζεται η ένωση Quercetum confertae, ενώ λείψανα της ένωσης Quercetum fagetum εμφανίζονται τοπικά καθώς επίσης η ένωση Quercetum ilicis στα ρεύματα.

Σημειώνονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης που σχετίζονται με τη μεταβλητή του δασικού ύψους.

- Το δασικό ύψος εξαρτάται από το δασικό τύπο μια περιοχής. Συγκεκριμένα, η δασική περιοχή του Ταξιάρχη αποτελείται κυρίως από δρύες και οξιές που μπορούν να φτάσουν μέχρι τα 25,27 μέτρα αντίστοιχα. Στη συγκεκριμένη περιοχή συναντάται επίσης μαύρη πεύκη, τραχεία πεύκη και έλατα που είναι φυτεμένα από το δασαρχείο ή από ιδιώτες και έχουν μέγιστο ύψος περίπου 6 μέτρα.
- Επιπρόσθετα, το δασικό ύψος εξαρτάται από την ηλικία των δέντρων. Αρχικά σημειώνεται ότι ο τρόπος διαχείρισης του δάσους είναι πρεμνοφυής. Αυτό σημαίνει ότι κάθε χρόνο υλοτομείται ένα κομμάτι του δάσους, στη συγκεκριμένη περίπτωση 40 εκτάρια το χρόνο, με στόχο της ανανέωσής του. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο τρόπο της διαχείρισης θεωρείται ότι κάθε 25 χρόνια το δάσος ανανεώνεται πλήρως. Παρόλ' αυτά στο συγκεκριμένο δάσος συναντιούνται δέντρα ηλικίας 10 έως 70 ετών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλές ομάδες ηλικιών στη συγκεκριμένη δασική περιοχή ενδιαφέροντος και μια μέση προσέγγιση αύξησης του δασικού ύψους στα 10 χρόνια είναι περίπου 6 μέτρα. Το δασικό ύψος εξετάζεται συνήθως όταν ένα δέντρο έχει ηλικία 40 ετών (ύψος αναφοράς) γιατί τότε θεωρείται ότι οι μεταβολές στο ύψος του είναι πολύ μικρές.
- Ένας άλλος παράγοντας που σχετίζεται με το δασικό ύψος είναι η ποιότητα του τόπου. Για την περιοχή μελέτης η χειρότερη ποιότητα του τόπου είναι η Πέμπτη όπου συναντάται συνήθως σε βραχώδεις περιοχές με το μέγιστο δασικό ύψος να φτάνει περίπου τα 8 μέτρα. Οι καλύτερες ποιότητες του τόπου στην περιοχή είναι η Πρώτη σε ελάχιστα σημεία και η Δεύτερη (περίπου 20% της συνολικής περιοχής) με το μέγιστο δασικό ύψος να είναι 27 και 23 μέτρα αντίστοιχα.

6 Περιγραφή δεδομένων

Τα δεδομένα της συμβολομετρικής διαδικασίας προήλθαν από τα δορυφορικά συστήματα SAR : ALOS PALSAR και Cosmo-Skymed. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (DEM-Digital Elevation Model) που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. Τέλος χρησιμοποιήθηκαν επίγεια δεδομένα για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών των απεικονίσεων SAR, του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς και των επίγειων παρατηρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των συμβολομετρικών ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων, την αξιολόγησή τους, την εκτίμηση του ύψους δασική κομοστέγης και του καθορισμού της ακρίβειας του.

6.1 Απεικονίσεις ALOS PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)



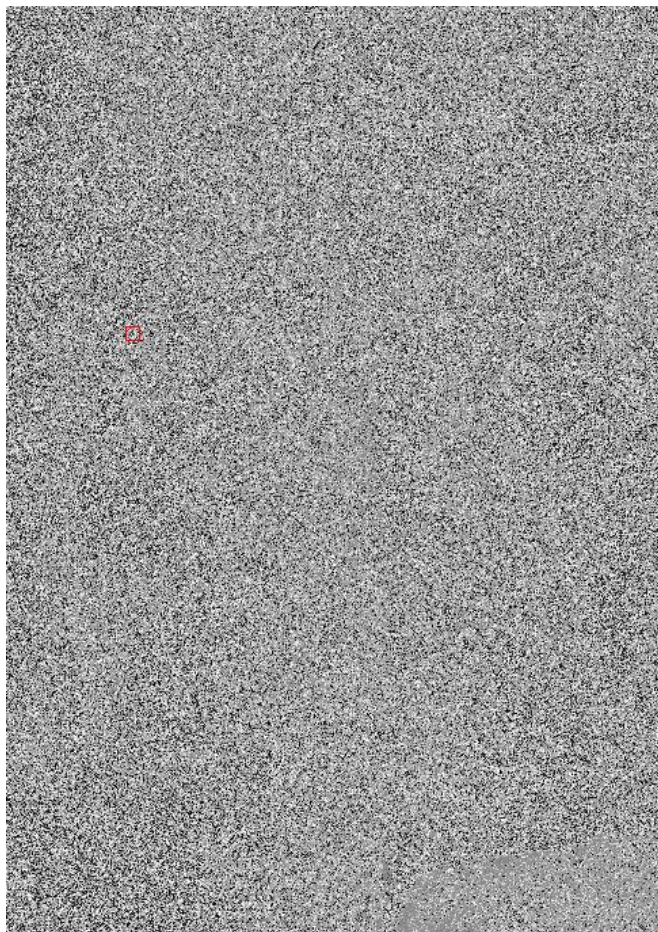
Εικόνα 2 Απεικόνιση slc από το σύστημα ALOS PALSAR

Για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα συμβολομετρικό ζευγάρι απεικονίσεων SAR από το δορυφορικό σύστημα ALOS PALSAR

Μερικά βασικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων απεικονίσεων συνοψίζονται παρακάτω:

- Η συχνότητα των απεικονίσεων ALOS PALSAR είναι 1270 MHz (L μπάντα) και η πόλωση τους είναι μονή HH.
- Το μέγεθος εικονοστοιχείου των απεικονίσεων είναι 7.5 και 3.2 μέτρα στις διευθύνσεις των πλαγιών αποστάσεων και του αζιμουθίου αντίστοιχα.
- Η μέση τιμή γωνίας πρόσπτωσης των δυο απεικονίσεων είναι περίπου 38.7 μοίρες
- Η χωρική (γεωμετρική) γραμμή βάσης περίπου 612 μέτρα που αποτελεί περίπου το 5% της κρίσιμης γεωμετρικής γραμμής βάσης που είναι 12404.708 μέτρα.
- Η χρονική γραμμή βάσης του συμβολομετρικού ζευγαριού είναι 46 ημέρες, με την ημερομηνία λήψης της κύριας απεικόνισης (master) να είναι 22/01/2010 20:51:56 και την ημερομηνία λήψης της δευτερεύουσας απεικόνισης να είναι 9/3/2010 20:51:41
- Από τη χρήση ατμοσφαιρικών επίγειων στοιχείων του σταθμού του ΠΟΛΥΓΥΡΟΥ εκτιμάται ότι η διαφορά σχετικής υγρασίας είναι περίπου 5 %. Επιπρόσθετα, στο χρονικό διάστημα μεταξύ των δυο λήψεων η μεταβολή της διεύθυνσης του ανέμου είναι περίπου 45 μοίρες και η διαφορά της ταχύτητας του είναι περίπου 11 κόμβοι.
- Το ύψος ασάφειας των συγκεκριμένων απεικονίσεων είναι περίπου 100 μέτρα

6.2 Απεικονίσεις COSMO-SkyMed

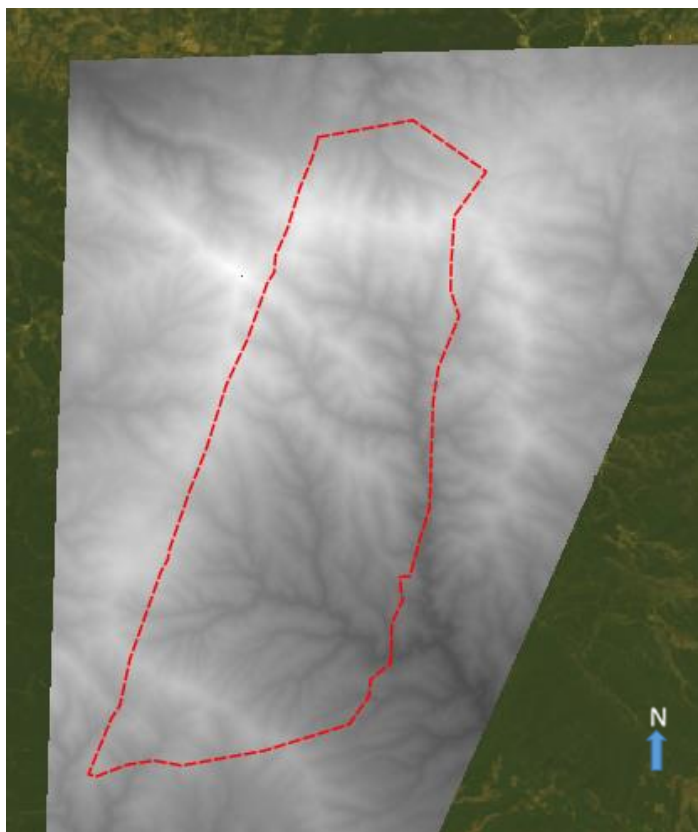


Εικόνα 3 Απεικόνιση slc από το σύστημα COSMO-SkyMed

- Η συχνότητα των απεικονίσεων COSMO-SkyMed είναι 9600 MHz (X μπάντα) και η πόλωσή τους είναι μονή HH.
- Το μέγεθος εικονοστοιχείου των απεικονίσεων είναι 2.4 και 1.8 μέτρα στις διευθύνσεις των πλαγίων αποστάσεων και του αζιμουθίου αντίστοιχα.
- Η μέση τιμή της γωνίας πρόσπτωσης των δυο απεικονίσεων είναι περίπου 24 μοίρες.
- Η χωρική (γεωμετρική) γραμμή βάσης περίπου 568 μέτρα που αποτελεί περίπου το 15% της κρίσιμης γεωμετρικής γραμμή βάσης που είναι 3349,230 μέτρα.
- Η χρονική γραμμή βάσης του συμβολομετρικού ζευγαριού είναι 1 ημέρα με την ημερομηνία λήψης της κύριας απεικόνισης (master) να είναι 30/05/2013 16:32:29 και την ημερομηνία λήψης της δευτερεύουσας απεικόνισης να είναι 31/5/2013 16:32:30.
- Από την χρήση ατμοσφαιρικών επίγειων στοιχείων του σταθμού του ΠΟΛΥΓΥΡΟΥ εκτιμάται ότι η διαφορά σχετικής υγρασίας είναι περίπου 4 %. Επιπρόσθετα, στο χρονικό διάστημα μεταξύ των δυο λήψεων η μεταβολή της διεύθυνσης του ανέμου είναι περίπου 60 μοίρες και η διαφορά της ταχύτητας του είναι περίπου 3 κόμβοι.

- Το ύψος ασάφειας των συγκεκριμένων απεικονίσεων είναι περίπου 7,4 μέτρα.
- Ένα άλλο χαρακτηριστικό σημαντικό για την επεξεργασία των απεικονίσεων είναι ότι περιέχουν δυο κανάλια όπου το πρώτο περιέχει το πραγματικό μέρος της επιστροφής και το δεύτερο το φανταστικό μέρος της επιστροφής του σήματος.

6.3 Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 4 Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς από τη ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.

Το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση της συμβολομετρικής διαδικασίας φαίνεται στη διπλανή εικόνα. Το συγκεκριμένο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο δημιουργήθηκε από τοπογραφικούς χάρτες και παραχωρήθηκε από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. Η χωρική ανάλυση είναι στα 5 μέτρα και η εκτιμώμενη υψομετρική ακρίβεια είναι περίπου 5 μέτρα. Τέλος σημειώνεται ότι για την εισαγωγή του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου στη συμβολομετρική διαδικασία έγινε η μετατροπή των τιμών των ορθομετρικών (από τη μ.σ.θ) υψομέτρων σε γεωμετρικά υψόμετρα (από την επιφάνεια του ελλειψοειδούς WGS 84). Για τη συγκεκριμένη μετατροπή χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο EGM 2008 όπου περιγράφει με ακρίβεια τις αποχές του γεωειδούς. Συγκεκριμένα, το μοντέλο EGM 2008 έχει μέγεθος εικονοστοιχείου 2.5X2.5 μίρες ή 4035,72 X 4035,72 m. Σύμφωνα με τους Sjöberg et al. (2011) η ακρίβεια των τιμών της αποχής του γεωειδούς σε παγκόσμιο επίπεδο είναι περίπου 11 εκατοστά.

6.4 Επίγεια δεδομένα



Εικόνα 5 Επίγειες παρατηρήσεις στη περιοχή μελέτης

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας χρησιμοποιήθηκαν επίγειες παρατηρήσεις για την αξιολόγηση της εκτίμησης του δασικού ύψους κομοστέγης. Οι επίγειες μετρήσεις έγιναν σε 172 σημεία το διάστημα 2010-2011. Τα επίγεια δεδομένα αφορούν μια δασική περιοχή εμβαδού 0.03 ha και η υψομετρική ακρίβειά τους είναι 1-1,5 μέτρα. Οι μετρήσεις του δασικού ύψους έγιναν με αλτίμετρο HAGA.

Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια του διαστήματος 2010-2013 που είναι χρονική διαφορά αποκτήσεων των δεδομένων SAR στη δασική περιοχή δεν παρατηρήθηκαν καταστροφικά φαινόμενα όπως φωτιές ή καταστροφές από ανέμους ή από υλοτόμηση δέντρων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρονική διαφορά των λήψεων των δεδομένων SAR και των επίγειων μετρήσεων δεν θεωρείται μεγάλη. Παρόλο αυτά ένα μέρος του σφάλματος της εκτίμησης του δασικού ύψους που προκύπτει μπορεί να οφείλεται στη συγκεκριμένη διαφορά. Σύμφωνα με τις τάσεις που επικρατούν στην περιοχή αναμένεται μια αύξηση του δασικού ύψους από μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί (Matis et al., 1996). Τέλος

υπογραμμίζεται ότι το ιδανικό είναι η ύπαρξη επίγειων δεδομένων την ίδια χρονική στιγμή με τα τηλεπισκοπικά δεδομένα.

7 Ανάπτυξη της μεθοδολογίας

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως η χρήση της τεχνικής της συμβολομετρίας αποτελεί ένα τρόπο εξαγωγής της υψομετρικής πληροφορίας από δεδομένα SAR. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας έγινε βιβλιογραφική μελέτη όπου συνοψίζονται οι βασικότερες μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν την τεχνική της συμβολομετρίας για την εκτίμηση του ύψους δασικής κομοστέγης.

7.1 Σήμα SAR και δασική κομοστέγη

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζεται η επίδραση της δασικής κομοστέγης στην επιστρεφόμενη μικροκυματική ακτινοβολία που καταγράφει ένα σύστημα SAR.

Αρχικά είναι απαραίτητο να καθορισθεί η έννοια της διαπεραστικότητας του σήματος SAR μέσα στη δασική κομοστέγη. Για την εξαγωγή του ύψους δασικής κομοστέγης χρησιμοποιούνται δεδομένα SAR μικρού μήκους κύματος (X μπάντα) με στόχο την περιγραφή της επιφάνειας του άνω ορόφου της δασικής κομοστέγης. Η επιλογή μικρού μήκους κύματος μικροκυματικής ακτινοβολίας γίνεται λόγω της μικρής διαπεραστικότητας της συγκεκριμένης ακτινοβολίας. Σημειώνεται ότι η διαπεραστικότητα του σήματος SAR σε μια δασική περιοχή εξαρτάται από το μήκος κύματος, τη γωνία πρόσπτωσης, την κλίση του εδάφους της περιοχής μελέτης, τον δασικό τύπο, τις συνθήκες υγρασίας και τις κλιματικές συνθήκες (Izzawati et al., 2006, Andersen et al., 2006, Woodhouse et al., 2006, Sarabandi and Lin 2000, Kellndorfer et al., 2004). Ανάλογα τη διαπεραστικότητα του σήματος υπολογίζεται ένα ύψος κέντρου φάσης σκέδασης h_{SPC} . Το ύψος του κέντρου φάσης σκέδασης h_{SPC} ορίζεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος της θέσης και της ισχύος των επιστρεφόμενων σημάτων SAR μέσα σε ένα διάστημα στη διεύθυνση των πλαγίων αποστάσεων (range bin) (Andersen et al., 2006, Kellndorfer et al., 2004). Το ύψος του κέντρου φάσης σκέδασης ομαλοποιείται και στην οριζόντια διεύθυνση με αποτέλεσμα το συγκεκριμένο μέγεθος

να περιγράφει ένα μέσο ύψος και όχι το μέγιστο ύψος (Woodhouse et al., 2003, Balzter et al., 2007a). Τέλος, σύμφωνα με τους Woodhouse et al. (2006) και Andersen et al. (2008) το ύψος του κέντρου φάσης σκέδασης που προέρχεται από τη μικροκυματική ακτινοβολία Χ μπάντας μπορεί βρίσκεται μεταξύ 50% με 80% της μέγιστης υψομετρικής επιφάνειας της δασικής κομοστέγης. Σε αυτό το γεγονός οφείλεται η υποτίμηση των υψομετρικών τιμών με τη χρήση της τεχνικής της συμβολομετρίας.

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ύψος κέντρου σκέδασης είναι:

- Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το ύψος του κέντρου φάσης σκέδασης είναι η πυκνότητα της δασικής κομοστέγης. Σε μια πυκνή δασική κομοστέγη η οπισθοσκεδαζόμενη ενέργεια της μικροκυματικής ακτινοβολίας Χ μπάντας είναι μικρή λόγω των πολλαπλών σκεδάσεων μέσα σε αυτή με αποτέλεσμα το εκτιμώμενο ύψος να αναφέρεται στον άνω όροφο της δασικής κομοστέγης (Andersen et al., 2006, Izzawati et al., 2006, Balzter et al., 2007a). Σε μια αραιή δασική κομοστέγη ή σε αραιές δασικές περιοχές το ύψος του κέντρου φάσης σκέδασης είναι ακόμα χαμηλότερο λόγω της αλληλεπίδρασης της μικροκυματικής ακτινοβολίας από το έδαφος (Woodhouse et al., 2006, Balzter et al., 2007b).
- Σημειώνεται ότι οι υψομετρικές ασυνέχειες σε μια δασική περιοχή μπορούν να προκαλέσουν την αλληλεπίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος με σκεδαστές από το έδαφος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το προϊόν μετά την αφαίρεση της υψομετρικής πληροφορίας του εδάφους να περιέχει τιμές κοντά στο μηδέν ή και αρνητικές τιμές. Επίσης για δασικούς τύπους όπου η πυκνότητα της δασικής κομοστέγης είναι μικρή, χρησιμοποιώντας το ύψος του κέντρου φάσης σκέδασης, το εκτιμώμενο ύψος δασικής κομοστέγης είναι υποτιμημένο σε βαθμό που δεν μπορεί να συσχετιστεί με το πραγματικό δασικό ύψος κομοστέγης (Izzawati et al., 2006, Balzter et al., 2007a, Sexton et al, 2009).

7.2 Υπάρχουσες μεθοδολογίες

Μέχρι σήμερα οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν την τεχνική της συμβατικής συμβολομετρίας για την εκτίμηση του ύψους της δασικής κομοστέγης συνοψίζονται παρακάτω:

- ✚ Παραγωγή ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που περιγράφει τον άνω όροφο της δασικής κομοστέγης από δεδομένα SAR μικρού μήκους κύματος (π.χ. Χ μπάντα) με την τεχνική της συμβολομετρίας. Αφαίρεση του παραγόμενου συμβολομετρικού ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους και προέρχεται άλλες πηγές εκτός της συμβολομετρίας. Οι εφαρμογές που βασίζονται στη συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι οι παρακάτω: Kellndorfer et al., 2004, Wallington, 2004, Balzter et al., 2007a, Walker et al., 2007, Andersen et al., 2008. Τέλος, σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί την ύπαρξη ακριβούς ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους.
- ✚ Η συγκεκριμένη τεχνική αποτελεί μια τροποποίηση της προηγούμενης τεχνικής. Η μόνη αλλαγή είναι η χρήση δεδομένων SAR μεγάλου μήκους κύματος (L,P μπάντες) για την παραγωγή ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους. Οι κύριες μελέτες που χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη τεχνική είναι (Andersen et al., 2004, Balzter et al., 2001, 2007b, Neeff et al., 2005). Αναλυτικότερα, ο Balzter et al. (2007b) χρησιμοποιώντας δεδομένα Χ και L μπάντας αερομεταφερόμενου συστήματος SAR εκτίμησε την ακρίβεια του ύψους της δασικής κομοστέγης με σφάλμα (RMSE) περίπου 3 μέτρα.

✚ Η τελευταία τεχνική σχετίζεται με τις υψομετρικές ασυνέχειες που υπάρχουν σε μια εκτεταμένη δασική περιοχή. Οι ασυνέχειες εντοπίζονται στα όρια των δασικών περιοχών που συνήθως υπάρχουν γειτονικές περιοχές με χέρσο έδαφος ή χαμηλή βλάστηση και στα κενά που υπάρχουν μέσα στις δασικές εκτάσεις. Οι μελέτες που έχουν αναπτυχθεί με βάση τη συγκεκριμένη παρατήρηση είναι οι εξής: Hagberg et al., 1995, Woodhouse et al., 2006, Williams et al., 2010. Τα συμπεράσματα των συγκεκριμένων μελετών ήταν πρώτον ότι σε δασικές περιοχές με αραιή δασική κομοστέγη τα αποτελέσματα είναι σαφώς υποτιμημένα λόγω της μεγαλύτερης διαπεραστικότητας της μικροκυματικής ακτινοβολίας συγκριτικά με την πυκνή δασική κομοστέγη και δεύτερον ότι σε σχετικές μελέτες θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν οι μεταβολές της συμπεριφοράς της μικροκυματικής ακτινοβολίας στις υφιστάμενες υψομετρικές ασυνέχειες.

Σύμφωνα με ανασκόπηση των μεθοδολογιών για την εκτίμηση του ύψους της δασικής κομοστέγης ο ρόλος του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που περιγράφει την επιφάνεια του άνω ορόφου της δασικής κομοστέγης είναι πολύ σημαντικός. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ακρίβειες του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από δεδομένα Χ μπάντας από διάφορα αερομεταφερόμενα συστήματα SAR σε σχέση με τα δεδομένα αναφοράς που έχουν χρησιμοποιηθεί, τις κλίσεις της περιοχής μελέτης και το είδος της βλάστησης.

Μελέτη	Δεδομένα Αναφοράς	Κλίσεις	Είδος βλάστησης	Υψομετρική ακρίβεια (RMSE)(μέτρα)
Wang et al. (2001)	Παρατηρήσεις Lidar	<10°	Χέρσες περιοχές	0.68
		>10°	Χέρσες περιοχές	1.33
		>10°	Δασικές περιοχές	3.16
Downman & Fisher (2003)	Φωτογραμμετρικά σημεία και Μετρήσεις Lidar	<10°	Χέρσες περιοχές	0.83
Downman et al. (2003)	Φωτογραμμετρικά σημεία	<10°	Χέρσες περιοχές	0.17
Mercer (2004)	Φωτογραμμετρικά σημεία και μετρήσεις Lidar και μετρήσεις GPS	<10°	Χέρσες περιοχές	0.5-1.1
Mercer (2007)	Σημεία γνωστών συντεταγμένων από επίγειες μετρήσεις	<10°	Χέρσες περιοχές	1.00
Hodgson et al. (2003)	Παρατηρήσεις Lidar και σημεία γνωστών συντεταγμένων από επίγειες μετρήσεις	<14°	Θαμνώδεις περιοχές	4.36
		<14°	Φυλλοβόλες δασικές περιοχές	7.95
		<14°	Πευκοδάσος	5.28

			<14°	Μικτές περιοχές	10.05
Wallington et al. (2004)	Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους από επίγειες μετρήσεις OSDEM (Ordnance Survey DEM)		<20°	Χέρσες περιοχές	1.01
			<20°	Ποώδεις περιοχές	1.58
			<10°	Δασικές περιοχές	11.84-14.26

Πίνακας 2 Μελέτη ακρίβειας παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από δεδομένα Χ μπάντας από αερομεταφερόμενα συστήματα

Με βάση τη βιβλιογραφική αναφορά και σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα παρατηρούνται τα ακόλουθα τα οποία συμβάλουν στον προσδιορισμό της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε σε αυτή την εργασία:

- Μια γενική παρατήρηση είναι ότι η αύξηση της κλίσης της περιοχής μελέτης είναι ένας παράγοντας μείωσης της υψομετρικής ακρίβειας του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου.
- Σε όλες τις μελέτες, η υψομετρική ακρίβεια του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου στις χέρσες περιοχές είναι πολύ καλύτερη συγκριτικά με τις περιοχές με βλάστηση.
- Από τη παρατήρηση των αποτελεσμάτων μπορεί να εντοπιστεί ότι εάν τα δεδομένα αναφοράς προέρχονται από διαφορετικούς τύπους δεδομένων τότε επηρεάζουν την ακρίβεια του παραγόμενου υψομετρικού μοντέλου.
- Τέλος, η χρονική διαφορά των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στις μελέτες από τους Hodgson et al. (2003) και Wallington et al. (2004) δεν είχε σημαντική επίδραση στην ακρίβεια του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου εδάφους στις χέρσες περιοχές συγκριτικά με τις δασικές.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις υπογραμμίζεται ότι αφορούν τα παραγόμενα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα από δεδομένα Χ μπάντας από αερομεταφερόμενα συστήματα. Παρόμοια συμπεριφορά αναμένεται και στα παραγόμενα αποτελέσματα από δεδομένα Χ μπάντας από δορυφορικά συστήματα.

Με στόχο την ανάπτυξη της βέλτιστης μεθοδολογίας για τη συγκεκριμένη εφαρμογή έγινε και βιβλιογραφική έρευνα που παρουσιάζεται η ακρίβεια του παραγόμενου υψομετρικού μοντέλου από δεδομένα Χ μπάντας σχετικά με το δασικό τύπο το είδος της βλάστησης και τα δεδομένα αναφοράς.

Μελέτη	Δασικός τύπος	Δεδομένα SAR	Δεδομένα αναφοράς	Υψομετρική Ακρίβεια (RMSE) (μέτρα)
Wallington et al., 2004	Πευκοδάση	X-HH NEXTMap	Δεδομένα πεδίου	5.8-7.4
Izzawati et al., 2006	Κωνοφόρα δάση	X-HH NEXTMap	Δεδομένα πεδίου	Δεν καταγράφηκε
Dutra et al., 2006	Τροπικά δάση	X-HH GeoSAR	Δεδομένα πεδίου	Δεν καταγράφηκε
Hyde et al., 2006	Κωνοφόρα δάση	X-HH NEXTMap	Δεδομένα πεδίου	8.7-11.9

Balzter et al., 2007a	Φυλλοβόλα δάση	X-VV ESAR	LiDAR CHM	2.9-4.1
Balzter et al., 2007b	Πευκοδάση	X-VV ESAR	LiDAR DSM	3.5
Andersen et al., 2008	Κωνοφόρα δάση	X-HH NEXTMap	LiDAR CHM	3
Sexton et al., 2009	Κωνοφόρα δάση	X-HH GeoSAR	Δεδομένα πεδίου	4.6
Kellndorfer et al., 2004	Πευκοδάση	C-HH SRTM	Δεδομένα πεδίου	1.0-1.8
Walker et al., 2004	Πευκοδάση	C-HH SRTM	Δεδομένα πεδίου	4.62-4.90
Sexton et al., 2009	Πευκοδάσος/Φυλλοβόλο δάσος	C-HH SRTM	Δεδομένα πεδίου	4.67/3.87
Zhang et al., 2008	Μικτό δάσος	L-PolInSAR	Δεδομένα πεδίου	8.5

Πίνακας 3 Ακρίβεια παραγόμενων υψομετρικών μοντέλων από δεδομένα Χ μπάντας σε σχέση με το είδος του δάσους, τα δεδομένα SAR και τα δεδομένα αναφοράς

Σύμφωνα με την παραπάνω βιβλιογραφική μελέτη εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα για την περιοχή μελέτης και τα διαθέσιμα δεδομένα.

- Όπως παρατηρείται η χρήση της πόλωσης HH σε δορυφορικά δεδομένα Χ μπάντας παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Το γεγονός ότι τα διαθέσιμα δεδομένα έχουν πόλωση HH είναι θετικό για την εκτίμηση του ύψους της δασικής κομοστέγης. Επειδή τα διαθέσιμα δεδομένα SAR είναι Χ μπάντας (COSMO-SkyMed) έχουν μικρότερη διαπεραστικότητα σε σχέση με τα δεδομένα C μπάντας με αποτέλεσμα το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο να περιγράφει καλύτερα την επιφάνεια του άνω ορόφου της δασικής κομοστέγης και να αναμένονται καλύτερα αποτελέσματα.
- Όπως φαίνεται και στον πίνακα 3 τα αποτελέσματα ανάλογα με το δασικό τύπο παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές με αποτέλεσμα τη δυσκολία στην εξαγωγή κάποιου συγκεκριμένου συμπεράσματος. Παρόλ' αυτά σύμφωνα με τους Izzawati et al., 2006 στις κωνοφόρες δασικές περιοχές όπου το σχήμα της δασικής κομοστέγης είναι κωνικό, η απόσβεση του σήματος SAR είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τις πλατύφυλλες δασικές περιοχές με αποτέλεσμα το εκτιμώμενο δασικό ύψος να είναι περισσότερο υποτιμημένο. Τέλος, κατά γενικό κανόνα ισχύει ότι στα μικτά δάση τα αποτελέσματα είναι χειρότερα συγκριτικά με τις υπόλοιπες δασικές περιοχές. Επειδή η περιοχή ενδιαφέροντος είναι μια μικτή δασική περιοχή τα αποτελέσματα της εκτίμησης του δασικού ύψους κομοστέγης αναμένονται να έχουν μεγάλο σφάλμα.

7.3 Διαμόρφωση της μεθοδολογίας

Με βάση τα συμπεράσματα από τη βιβλιογραφική μελέτη που έγινε διαμορφώθηκε το παρακάτω διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας. Στο παρακάτω διάγραμμα ροής σημειώνεται ότι το DEM_TOPO αναφέρεται στο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους και έχει προμηθευτεί από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.



Σχήμα 1 Διάγραμμα ροής εμπειρικής μεθόδου

8 Περιγραφή της μεθοδολογίας

Στη συγκεκριμένη παράγραφο περιγράφεται αρχικά η συμβολομετρική διαδικασία για την παραγωγή των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων και στη συνέχεια η πράξη της αφαίρεσής τους για την εξαγωγή του συμβολομετρικού ύψους.

8.1 Περιγραφή διαδικασίας παραγωγής ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων

Οι βασικότερες τεχνικές για τη δημιουργία ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου είναι :

1. Ψηφιοποίηση ισοϋψών καμπυλών
2. Στερεοαπόδοση και χρήση σύγχρονων φωτογραμμετρικών μεθόδων
3. Χρήση GPS και δεδομένων Total Station
4. Κινηματικό GPS και αδρανειακά συστήματα πλοήγησης (INS-inertial Navigation Systems)
5. Συστήματα Laser (Lidar)
6. Συμβολομετρία απεικονίσεων SAR (InSAR)

Η συμβολομετρία απεικονίσεων SAR (InSAR) είναι μια από τις καλύτερες μεθόδους για την παραγωγή ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου με μεγάλη ακρίβεια και καλή χωρική ανάλυση (Zebker & Goldstein 1986). Η τρισδιάστατη πληροφορία της επιφάνειας της γης εξάγεται με τη μέθοδο της συμβολομετρίας χρησιμοποιώντας τη φάση του σήματος του ραντάρ και τα τροχιακά δεδομένα από δυο η περισσότερες εικόνες SAR συνήθως του ίδιου αισθητήρα.

Τα διαφορετικά είδη των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων (DEMs) που χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη εργασία είναι:

1. DSM (Digital Surface Models) είναι τα ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας που περιλαμβάνουν την υψομετρική πληροφορία του εδάφους και της βλάστησης.
2. DTM (Digital Terrain Models) είναι τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους που περιέχουν την υψομετρική πληροφορία του γυμνού εδάφους (χωρίς τον όρο της βλάστησης)
3. CHM (Canopy Height Models) είναι ψηφιακό μοντέλο που περιέχει την υψομετρική πληροφορία των θόλων των δέντρων.

Σημειώνεται ότι DEM (Digital Elevation Model) είναι ένα ψηφιακό μοντέλο που περιέχει υψομετρική πληροφορία και περιγράφεται από έναν πίνακα όπου κάθε στοιχείο του συσχετίζεται με την υψομετρική πληροφορία. Σημειώνεται ότι ο όρος ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (DEM-Digital Elevation Model) είναι γενικότερος όρος από τον όρο ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DTM-Digital Terrain Model) ή τον όρο ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (DSM-Digital Surface Model).

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά τα βήματα της συμβολομετρικής επεξεργασίας για τη παραγωγή των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων για τα δυο συμβολομετρικά ζευγάρια. Για την υλοποίηση της συμβολομετρικής διαδικασίας οι απεικονίσεις SAR που χρησιμοποιήθηκαν για τη παραγωγή των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων είχαν την ίδια διεύθυνση πόλωσης. Σε απεικονίσεις με διαφορετική διεύθυνση πόλωσης μεταβάλλεται η αλληλεπίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας με τους σκεδαστές με αποτέλεσμα το επιστρεφόμενο σήμα που καταγράφεται να έχει διαφορετικό πλάτος λόγω της διαφοράς της πόλωσης.

8.1.1 Υπολογισμός βάσης

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η βάση ενός συμβολομετρικού ζευγαριού διακρίνεται σε χωρική (γεωμετρική) γραμμή βάσης και σε χρονική γραμμή βάσης.

- Για τις απεικονίσεις ALOS PALSAR η χρονική γραμμή βάσης είναι 46 ημέρες που είναι και η ελάχιστη χρονική διαφορά για το δορυφορικό σύστημα ALOS PALSAR. Για τις απεικονίσεις COSMO-SkyMed η χρονική γραμμή βάσης είναι μία ημέρα. Υπενθυμίζεται ότι η χρονική αποσυσχέτιση αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για την εξαγωγή ενός ακριβούς ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου. Σημειώνεται ότι μια μεγάλη χρονική διαφορά μεταξύ των λήψεων συνεπάγεται τη μεταβολή των στόχων στην επιφάνεια του εδάφους. Τέλος, αν και η χρονική βάση των απεικονίσεων ALOS PALSAR είναι πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με τη χρονική βάση των απεικονίσεων COSMO-SkyMed, οι σκεδαστές που αλληλεπιδρούν με τη μικροκυματική ακτινοβολία L μάλιστα μεταβάλλονται σε μικρότερο βαθμό συγκριτικά με τους σκεδαστές που αλληλεπιδρούν με την ακτινοβολία X μάλιστα όπως θα δούμε και στη συνέχεια.
- Όπως έχει αναφερθεί από πολλούς ερευνητές, οι καταλληλότερες χωρικές βάσεις για εφαρμογές παραγωγής ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων κυμαίνονται στο 15-50% της κρίσιμης βάσης, ενώ για εφαρμογές διαφορικής συμβολομετρίας στο 6-8% της κρίσιμης βάσης. Επίσης, σύμφωνα με τους Werner et al. (2003) η γραμμή βάσης πρέπει να μικρότερη του 25 % της κρίσιμης βάσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η γεωμετρική γραμμή βάσης των απεικονίσεων ALOS PALSAR είναι περίπου 612 μέτρα που αποτελεί περίπου το 5% της κρίσιμης γεωμετρικής γραμμή βάσης που

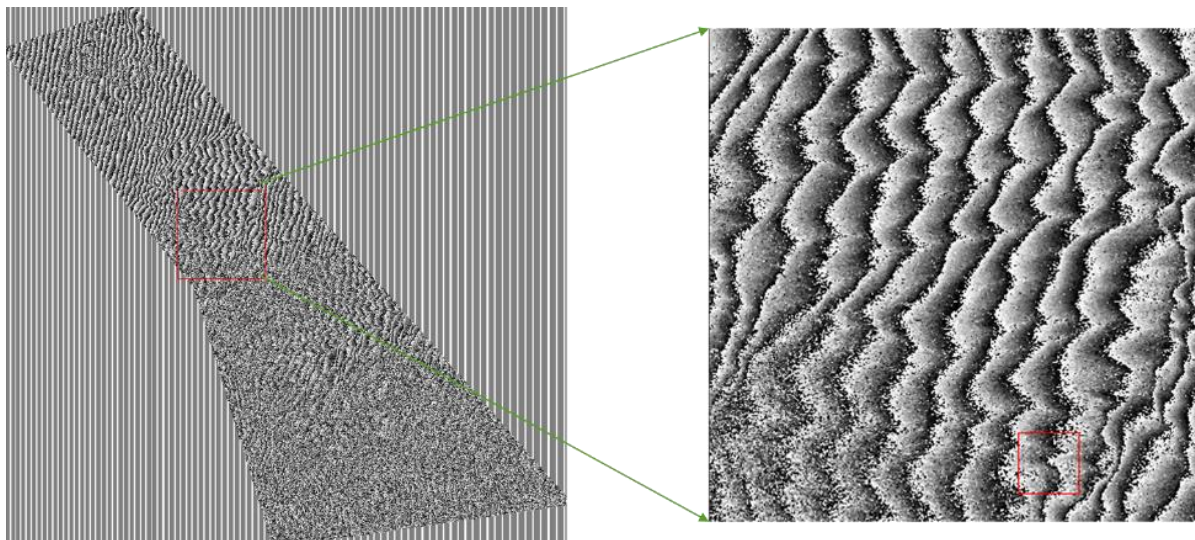
είναι περίπου 12404 μέτρα. Επίσης η γεωμετρική γραμμή βάσης των απεικονίσεων COSMO-Skymed είναι περίπου 568 μέτρα που αποτελεί περίπου το 15% της κρίσιμης γεωμετρικής γραμμή βάσης που είναι περίπου 3349 μέτρα. Τέλος, σημειώνεται ότι ο υπολογισμός της χωρικής βάσης των συμβολομετρικών ζευγαριών από το λογισμικό SARscape έγινε χρησιμοποιώντας τα τροχιακά δεδομένα των συστημάτων SAR από τα αρχεία που συνόδευαν τις απεικονίσεις.

8.1.2 Συμπροσαρμογή απεικονίσεων

Σε ένα συμβολομετρικό ζευγάρι είναι απαραίτητο να γίνει η επιλογή της κύριας (master) και δευτερεύουσας (slave) απεικόνισης. Ο άτυπος κανόνας σχετικά με τη συγκεκριμένη επιλογή είναι ότι η απεικόνιση που είναι χρονικά προγενέστερη θεωρείται ως κύρια και η χρονικά μεταγενέστερη θεωρείται ως δευτερεύουσα. Η συμπροσαρμογή των απεικονίσεων SAR αποτελεί ένα βήμα της συμβολομετρικής επεξεργασίας όπου οι δευτερεύουσες απεικονίσεις αποκτάνε την ίδια γεωμετρία με αυτή της κύριας απεικόνισης. Η διαδικασία συμπροσαρμογής των απεικονίσεων ALOS PALSAR και COSMO-Skymed υλοποιήθηκε από τον αλγόριθμο συμπροσαρμογής του λογισμικού πακέτου SARscape με ακρίβεια καλύτερη του 1/10 του εικονοστοιχείου και στα δυο συμβολομετρικά ζευγάρια.

8.1.3 Δημιουργία και φιλτράρισμα του συμβολογράμματος

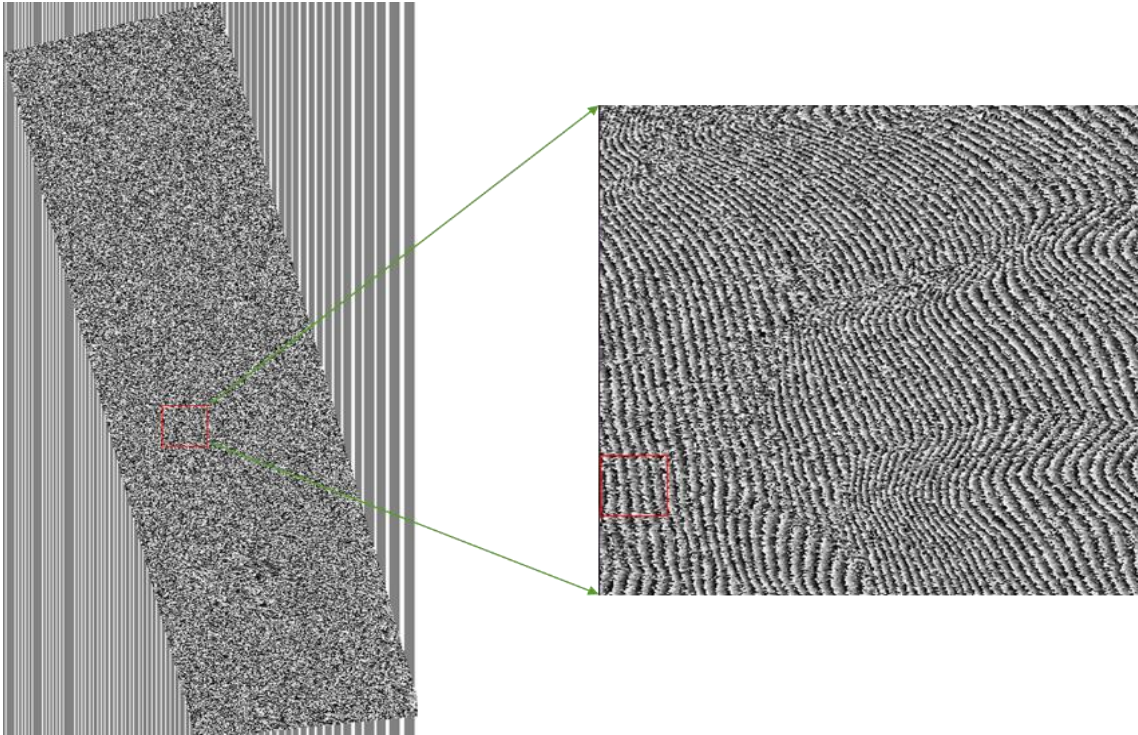
Όπως έχει προαναφερθεί, το συμβολόγραμμα είναι το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού της κύριας (master) μιγαδικής SAR απεικόνισης με τη συζυγή μιγαδική δευτερεύουσα (slave) SAR απεικόνιση. Εφαρμόστηκε φιλτράρισμα στα παραγόμενα συμβολογράμματα στο χώρο των συχνοτήτων με στόχο την απομάκρυνση του θορύβου που εμφανίζεται λόγω της αποσυσχέτισης των απεικονίσεων, λόγω της



Εικόνα 6 Παραγόμενο συμβολόγραμμα απεικονίσεων ALOS PALSAR

κηλίδωσης και λόγω του θορύβου του συστήματος SAR. Μετά από δοκιμές η μέθοδος που παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα ήταν από την εφαρμογή του φίλτρου Goldstein (Baran et al., 2003) συγκριτικά με τη μέθοδο του προσαρμοσμένου φιλτραρίσματος και του φιλτραρίσματος με τη χρήση του αλγορίθμου Boxcar.

Όπως παρατηρείται από το παραγόμενο συμβολόγραμμα οι κροσσοί συμβολής είναι ευδιάκριτοι για ορισμένες περιοχές. Στις δασικές περιοχές αναμένεται οι κροσσοί συμβολής να μην είναι ευκρινώς διαχωρίσιμοι.



Εικόνα 7 Παραγόμενο συμβολόγραμμα από τις απεικονίσεις COSMO-Skymed

8.1.4 Αφαίρεση όρου της επίπεδης γης

Όπως έχει προαναφερθεί η συμβολομετρική φάση μπορεί να χωριστεί σε δυο συνιστώσες σύμφωνα με τη παρακάτω σχέση:

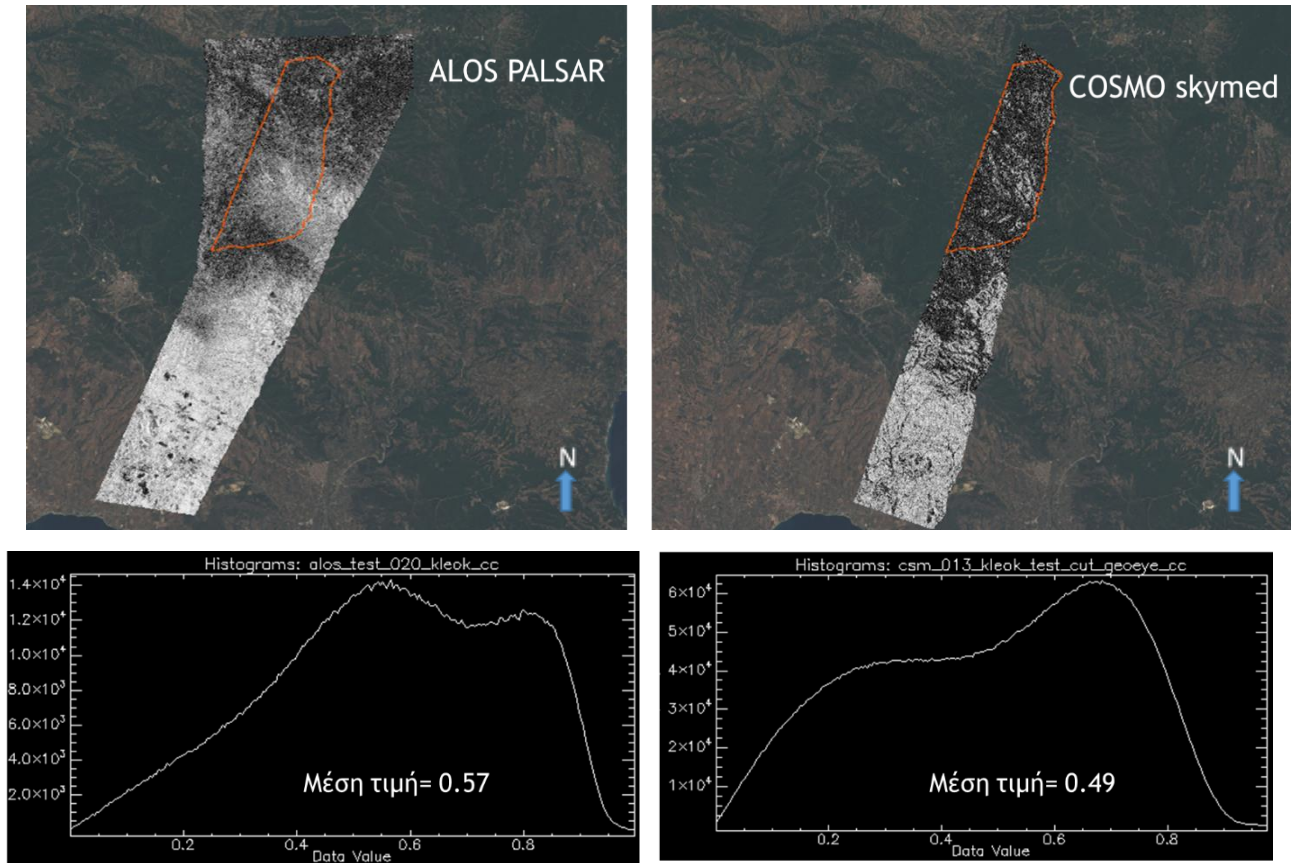
$$\varphi = \varphi_{topo} + \varphi_{flat}$$

Όπου ο όρος φ_{flat} είναι η φάση λόγω της επίπεδης γης και ο όρος φ_{topo} σχετίζεται με την υψομετρική πληροφορία και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου.

Σημειώνεται ότι για τη καλύτερη αφαίρεση του όρου της επίπεδης γης θα πρέπει να χρησιμοποιείται ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο έναντι μια ελλειψοειδούς επιφάνειας αναφοράς. Για την αφαίρεση του όρου της επίπεδης γης χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε (DEM_TOPO). Τέλος, η αφαίρεση του όρου της επίπεδης γης γίνεται σε αυτό το στάδιο της επεξεργασίας για την απλοποίηση των επόμενων σταδίων της συμβολομετρικής διαδικασίας.

8.1.5 Δημιουργία εικόνας συνάφειας

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι εικόνες της συνάφειας για κάθε συμβολομετρικό ζευγάρι. Όπως έχει αναφερθεί η συμβολομετρική συνάφεια εκφράζει το βαθμό ομοιότητας των απεικονίσεων SAR ενός συμβολομετρικού ζευγαριού και είναι ένας δείκτης ακρίβειας των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων.



Εικόνα 8 Εικόνες συνάφειας με τα ιστογράμματα τους: Αριστερά :ALOS PALSAR Δεξιά: COSMO-SkyMed

Στις εικόνες της συνάφειας που έχουν παραχθεί οι άσπροι τόνοι εκφράζουν τις μεγάλες τιμές της συνάφειας (κοντά στο ένα) και οι σκούροι τόνοι τις μικρές τιμές της (κοντά στο μηδέν). Όπως αναμενόταν στη δασική περιοχή μελέτης οι τιμές της συνάφειας είναι αρκετά χαμηλές. Από τη σχετική σύγκριση των ιστογραμμάτων της συνάφειας από τα συμβολομετρικά ζευγάρια ALOS PALSAR και COSMO-SkyMed παρατηρείται η μέση τιμή της συνάφειας των απεικονίσεων COSMO-SkyMed να είναι χαμηλότερη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χρονική αποσυσχέτιση των σκεδαστών (φύλλα, μικρά κλαδιά) είναι μεγαλύτερη αν και η χρονική γραμμή βάσης είναι μόλις μία ημέρα συγκριτικά με τη χρονική αποσυσχέτιση των αντίστοιχων σκεδαστών (μεγάλα κλαδιά, κορμοί δέντρων) στις απεικονίσεις ALOS PALSAR για τις οποίες η χρονική γραμμή βάση είναι 46 ημέρες.

8.1.6 Αποκατάσταση της φάσης

Ο αλγόριθμος που είχε τα καλύτερα αποτελέσματα και χρησιμοποιήθηκε είναι ο αλγόριθμος τοπικής ανάπτυξης (Region Growing). Η τοπική ανάπτυξη είναι περισσότερο μια φιλοσοφία παρά αυστηρές μαθηματικές διεργασίες (Καραθανάση, 2003). Ο αλγόριθμος της τοπικής ανάπτυξης ξεκινάει από τις εύκολες περιοχές και στη συνέχεια προχωράει στις δυσκολότερες περιοχές. Με αυτόν τον τρόπο δεν διαδίδονται τα σφάλματα σε όλο το πεδίο μελέτης. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος προτείνεται στην περίπτωση της επιλογής μικρών τιμών στο κατώφλι της συνάφειας περιορίζοντας την πιθανότητα εισαγωγής σφαλμάτων φάσης στην τελική εικόνα της αποκαταστημένης φάσης. Μετά από πολλές δοκιμές τα κατώφλια που επιλέχθηκαν για τα δυο συμβολομετρικά ζευγάρια με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των κενών περιοχών και της υψομετρικής ακρίβειας ήταν 0.20 για τις απεικονίσεις ALOS PALSAR και 0.13 για τις απεικονίσεις COSMO-SkyMed.

8.1.7 Επαναπροσδιορισμό της βάσης με χρήση σημείων γνωστών συντεταγμένων

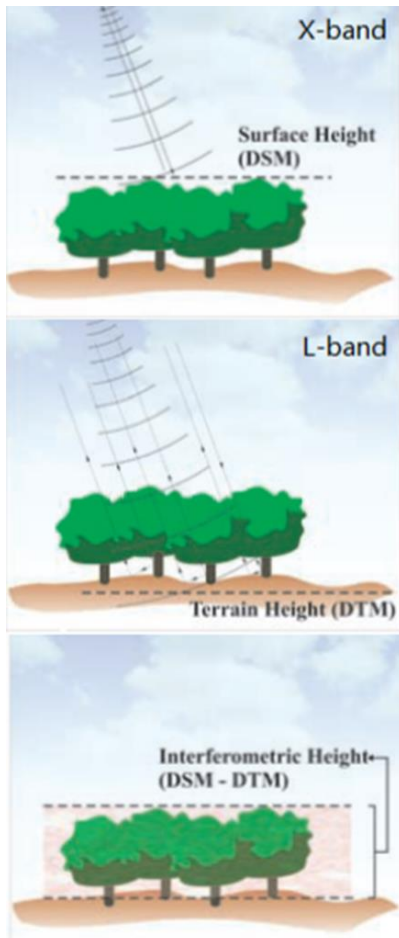
Ο προσδιορισμός του διανύσματος της βάσης γίνεται με στόχο μια αρχική εκτίμηση του μέτρου και της διεύθυνσης του διανύσματος με απώτερο σκοπό τον έλεγχο δυνατότητας εκπόνησης της συμβολομετρικής διαδικασίας. Σε αυτό το στάδιο διαδικασίας γίνεται ένα ακριβέστερος προσδιορισμός της γραμμής βάσης όπου προσδιορίζονται οι παράμετροι διόρθωσης των τροχιακών δεδομένων, ο υπολογισμός της μετατόπισης της φάσης που οφείλεται στα σφάλματα της τροχιάς και επαναπροσδιορίζεται το διάνυσμα της βάσης από τα σημεία επίγειου ελέγχου. Επίσης υπολογίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα που προέρχεται από τη διαφορά των τιμών υψομέτρου των σημείων επίγειου ελέγχου από τις αντίστοιχες τιμές φάσης οι οποίες προηγούμενα έχουν μετατραπεί σε τιμές υψομέτρου. Μετά τον υπολογισμό των παραμέτρων διόρθωσης της τροχιάς και των νέων στοιχείων βάσης από τα σημεία επίγειου ελέγχου στο επόμενο στάδιο της επεξεργασία πραγματοποιείται η επαναπροσδιορισμός της τιμής φάσης της επίπεδης γης και της τιμής της αποκατεστημένης φάσης που οφείλεται στη τοπογραφία.

Στη συγκεκριμένη εργασία, λόγω της απουσίας σημείων γνωστών συντεταγμένων επιλέχθηκαν σημεία υψηλής συνάφειας από την εικόνα της συνάφειας και αξιοποιώντας το διαθέσιμο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς (DEM_TOPO) τα συγκεκριμένα σημεία απέκτησαν απόλυτες υψομετρικές τιμές. Σημειώνεται ότι για τα σημεία υψηλής συνάφειας που επιλέχθηκαν, έγινε η υπόθεση ότι είναι σημεία πάνω στο έδαφος. Με αυτή τη λογική το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο προσεγγίζει ικανοποιητικά την επιφάνεια του εδάφους.

8.1.8 Μετατροπή της φάσης σε υψόμετρο και γεωκωδικοποίηση

Αρχικά σημειώνεται ότι για την αποφυγή των σφαλμάτων της γεωαναφοράς εφαρμόστηκε η διαδικασία multilooking όπου χρησιμοποιήθηκαν εμπειρικά οι λόγοι 1-3 και 1-2 ανάμεσα στη διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων (slant range) και στη διεύθυνση του αζιμουθίου για τις απεικονίσεις ALOS PALSAR και COSMO-Skymed, αντίστοιχα. Σε αυτό το στάδιο της επεξεργασίας, η πλήρως αποκατεστημένη φάση συνδυάζεται με τη φάση της επίπεδης γης για τη μετατροπή της συνολικής φάσης σε υψομετρική πληροφορία και στη συνέχεια η γεωκωδικοποίηση της, στη προβολή UTM 34N WGS 84. Αρχικά εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος μετατροπής της φάσης σε υψομετρική πληροφορία. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι απαιτούν τη γνώση ενός ή περισσότερων σημείων γνωστών συντεταγμένων για τη μετατροπή των σχετικών τιμών υψομέτρων που υπολογίζονται σε απόλυτες τιμές υψομέτρου. Υπογραμμίζεται ότι στο λογισμικό πακέτο SARscape υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής απόλυτων τιμών υψομέτρων χρησιμοποιώντας βοηθητικά δεδομένα όπως το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς. Τέλος, ακολουθεί η διαδικασία της γεωκωδικοποίησης.

8.2 Υπολογισμός συμβολομετρικού ύψους



Εικόνα 9 Τρόπος προσδιορισμού του συμβολομετρικού ύψους

Η εκτίμηση του δασικού ύψους έγινε αφαιρώντας το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο το οποίο προέκυψε από τα δεδομένα COSMO-SkyMed X μπάντας από το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους από τα δεδομένα ALOS PALSAR.. Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιλέχθηκε επειδή η μικροκυματική ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (X μπάντα) και πόλωσης HH αλληλεπιδρά με σκεδαστές που προέρχονται από τον άνω όροφο της δασικής κομοστέγης με αποτέλεσμα να περιγράφουν ικανοποιητικά τη συγκεκριμένη επιφάνεια (Izzawati et al., 2006, Kellndorfer et al., 2004, Balzter et al., 2007a, Walker et al., 2007, Andersen et al., 2008). Για την καλύτερη αναπαράσταση της επιφάνειας του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο από τα δεδομένα ALOS PALSAR. Σημειώνεται ότι στη διαδικασία εκπόνησης της συμβολομετρικής επεξεργασίας χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. για ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς.

9 Παρουσίαση παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συμβολομετρικής διαδικασίας που είναι το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους (DTM) που έχει προκύψει από τις απεικονίσεις ALOS PALSAR και το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο που περιγράφει την επιφάνεια του άνω ορόφου της κομοστέγης των δέντρων που έχει προκύψει από τις απεικονίσεις COSMO-SkyMed.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συμβολομετρική διαδικασία της παραγωγής DEM από δεδομένα SAR σε περιοχές ορεινές και με βλάστηση δεν είναι η κατάλληλη για τις περισσότερες εφαρμογές. Για την καλύτερη ακρίβεια του DEM προτείνεται η χρήση συμβολομετρικού ζευγαριού με μικρή χρονική

διαφορά για τον περιορισμό της χρονικής αποσυσχέτισης. Επίσης, προτείνεται η χρήση εικόνων από την ίδια εποχή για τη μείωση της χωρικής αποσυσχέτισης (ειδικά σε φυλλοβόλα δάση) και τη μείωση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων. Τέλος, σημειώνεται ότι το παραγόμενο DEM από ένα συμβολομετρικό ζευγάρι αποτελεί μια σχετική τιμή και είναι πιθανόν να εντοπιστεί μετατόπιση οριζοντιογραφικά και υψομετρικά.

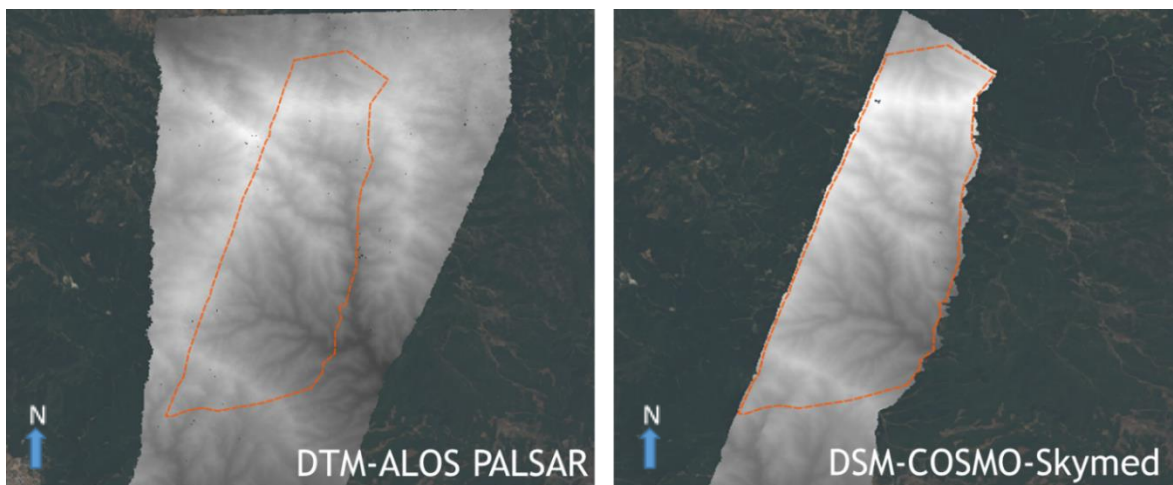
Όπως έχει προαναφερθεί η ποιότητα του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου εξαρτάται κυρίως από τους παρακάτω παράγοντες.

- Χρονική αποσυσχέτιση
- Γεωμετρική αποσυσχέτιση
- Ακρίβεια τροχιακών δεδομένων
- Ατμοσφαιρικές συνθήκες
- Παραμορφώσεις του εδάφους
- Επεξεργασία των δεδομένων

Οι σημαντικότεροι δείκτες της ακρίβειας του παραγόμενου συμβολομετρικού ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς είναι

- Συμβολομετρική συνάφεια
Όσο μεγαλύτερη είναι η συμβολομετρική συνάφεια τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα της συμβολομετρίας
- Το μέγεθος του εικονοστοιχείου (pixel spacing)
Όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του εικονοστοιχείου τόσο καλύτερος είναι ο οριζοντιογραφικός προσδιορισμός των προϊόντων της συμβολομετρίας
- Ύψος ασάφειας
Όσο μικρότερο είναι το ύψος ασάφειας τόσο καλύτερη είναι η υψομετρική ακρίβεια του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου. Εμπειρικά, ένα σχετικά καλό αποτέλεσμα στην παραγωγή ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου είναι να έχουμε ακρίβεια μεταξύ 1/10 με 1/20 του ύψους ασάφειας. Υπενθυμίζουμε ότι ύψος ασάφειας είναι το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς που αντιστοιχεί σε ένα κύκλο φάσης, δηλαδή σε 2π.

Τα παραγόμενα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα από τα δεδομένα ALOS PALSAR και COSMO-SkyMed φαίνονται στη παρακάτω εικόνα. Η χωρική ανάλυση τους είναι 5 μέτρα και το σύστημα αναφοράς τους είναι το WGS 84 στη προβολή UTM 34N. Σημειώνεται ότι τιμές που περιέχουν είναι απόλυτα γεωμετρικά ύψη αφού το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε έχει απόλυτες υψομετρικές τιμές που αναφέρονται στο ελλειψοειδές WGS 84.



Εικόνα 10 Παραγόμενα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα με τη τεχνική της συμβολομετρίας

Παρατηρείται ότι τα παραγόμενα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα περιέχουν “τρύπες” λόγω της αποτυχίας της αποκατάστασης της φάσης. Αυτές οι τρύπες αφαιρούνται χρησιμοποιώντας τις γειτονικές μη-μηδενικές τιμές και χρησιμοποιώντας ένα παράθυρο μετατόπισης σε όλη την απεικόνιση. Για την αποφυγή σφαλμάτων λόγω της κατεύθυνσης της μετατόπισης του παραθύρου η διαδικασία επαναλαμβάνεται για διάφορες κατευθύνσεις. Οι κορυφές υψηλής συχνότητας που δημιουργούνται αφαιρούνται χρησιμοποιώντας το φίλτρο Butterworth στο χώρο των συχνοτήτων.

10 Εκτίμηση ακρίβειας παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων

Στη συγκεκριμένη παράγραφο αξιολογούνται τα αποτελέσματα της συμβολομετρικής διαδικασίας. Γίνεται η εκτίμηση της κατακόρυφης ακρίβειας του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους (DTM) που έχει προκύψει από τις απεικονίσεις ALOS PALSAR και του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που περιγράφει την επιφάνεια του άνω ορόφου της κομοστέγης των δέντρων που έχει προκύψει από τις απεικονίσεις COSMO-SkyMed. Ο έλεγχος ποιότητας ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου επικεντρώνεται στην αξιολόγηση του παραγόμενου προϊόντος και όχι στη διαδικασία της παραγωγής του. Επίσης, ο έλεγχος των αποτελεσμάτων της εφαρμογής μια διαδικασίας ή ενός αλγορίθμου είναι ένα δύσκολο πρόβλημα και γι' αυτό η αξιολόγηση γίνεται σε τμήματα του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου και σε σπάνιες περιπτώσεις σε όλο το μοντέλο. Σημειώνεται ότι τα μορφολογικά και τα στατιστικά χαρακτηριστικά κάθε τμήματος επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη τελική εκτιμώμενη ακρίβεια κάθε τμήματος.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος ελέγχου της ποιότητας ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου είναι η χρήση σημείων γνωστών συντεταγμένων. Για την αξιολόγηση ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου απαιτούνται τουλάχιστον 28 σημεία (20 εσωτερικά 8 περιφερειακά) για τον υπολογισμό του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Η ακρίβεια υπολογίζεται με τη σύγκριση των υψομέτρων που προκύπτουν

από τα αντίστοιχα σημεία στο εξαγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο και των υψομέτρων των σημείων γνωστών συντεταγμένων. Τέλος, η υψομετρική ακρίβεια των σημείων γνωστών συντεταγμένων πρέπει να είναι καλύτερη από την ακρίβεια του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου. Στη συγκεκριμένη εργασία η απουσία σημείων γνωστών συντεταγμένων οδήγησε στην απόρριψη της συγκεκριμένης μεθόδου για τον έλεγχο της ποιότητας του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου.

Η χρήση ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς για την αξιολόγηση άλλων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων είναι μια εναλλακτική προσέγγιση ελέγχου ποιότητας ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων. Σημειώνεται ότι από στατιστική άποψη το ψηφιακό μοντέλο αναφοράς πρέπει να είναι τουλάχιστον μια τάξη καλύτερης ακρίβειας από το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο που αξιολογείται. Το παραπάνω κριτήριο περιορίζει σε μεγάλο βαθμό τον αριθμό των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων αναφοράς. Τέλος, στις περισσότερες περιπτώσεις τα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό το σκοπό προέρχονται από Lidar δεδομένα (Joughin et al., 1999; Yu and Ge, 2010), από στερεοπαρατήρηση αεροφωτογραφιών ή δορυφορικών εικόνων, από αυτοματοποιημένες μεθόδους ψηφιακής φωτογραμμετρίας και τηλεπισκόπησης και από ψηφιοποίηση ισοϋψών καμπυλών. Ένα πρόβλημα σχετικά με το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς είναι η διαφορετική χωρική ανάλυση του συγκριτικά με αυτή του παραγόμενου μοντέλου από την συμβολομετρική διαδικασία. Σύμφωνα με τους Das et al. (2014) σε πολλές περιπτώσεις δεν ήταν επιτυχής η συμπροσαρμογή των υψομετρικών δεδομένων και των SAR δεδομένων. Σύμφωνα με τη μελέτη του Shimada (2010) η μικρή χωρική ανάλυση του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της χωρικής ανάλυσης στις εικόνες SAR και τη λάθος εκτίμηση των τιμών οπισθοσκέδασης.

Για την αξιολόγηση των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων από τη συμβολομετρική επεξεργασία των απεικονίσεων από τα δορυφορικά συστήματα ALOS PALSAR και COSMO-SkyMed χρησιμοποιήθηκαν τα υψομετρικά μοντέλα αναφοράς DEM_TOPO. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό πακέτο SARscape για τη διαδικασία της αξιολόγησης των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων (DEM validation) χρησιμοποιήθηκε ένας κানাβος σημείων με υψόμετρα αναφοράς από το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς και υπολογίστηκε η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Για την εφαρμογή του αλγορίθμου αξιολόγησης, θα πρέπει το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο και το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς να έχουν την ίδια χωρική ανάλυση. Σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητη η χρήση της διγραμμικής (bilinear) παρεμβολής για να ισχύει η παραπάνω συνθήκη.

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου της αξιολόγησης στην περιοχή μελέτης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Μεγέθη αξιολόγησης	Παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο	
	ALOS PALSAR	COSMO-SkyMed
Μέση τιμή (m)	-5.9	5.3
Τυπική απόκλιση (m)	11.7	14.5
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) (m)	10.5	10.0
Εκτιμώμενο ύψος ασάφειας	100.3	7.4

Πίνακας 4 Αποτελέσματα αξιολόγησης

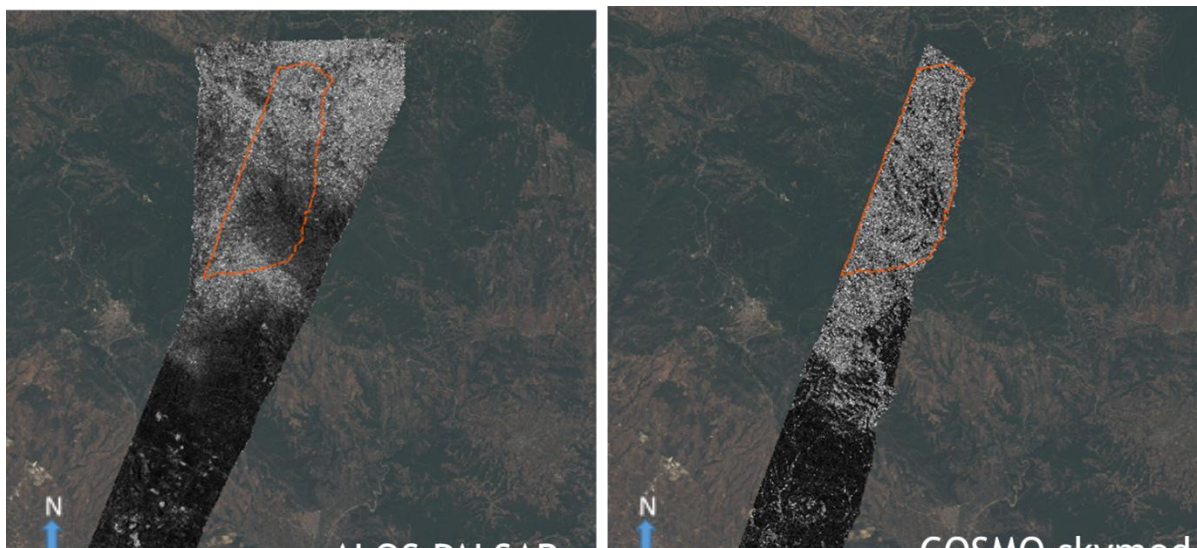
Όπως έχει αναφερθεί, ένα σχετικά καλό αποτέλεσμα στην παραγωγή του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου είναι μεταξύ 1/10 με 1/20 του ύψους ασάφειας. Με βάση το παραπάνω η ακρίβεια του

παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από τα δεδομένα ALOS PALSAR κρίνεται ικανοποιητική. Η ακρίβεια του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από τα δεδομένα COSMO-SkyMed έχει την ίδια τάξη μεγέθους με το ύψος ασάφειας. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα οφείλεται κυρίως στην αδυναμία της αποκατάστασης της φάσης και στην χρήση του ίδιου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς.

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως το στάδιο της αποκατάστασης της φάσης αποσκοπεί στο να αποκαλύψει το πλήθος των ακεραίων κύκλων που είναι “τυλιγμένοι” στη φάση. Με βάση το προηγούμενο συμπεραίνουμε ότι για να ξεπερνά το μέσο τετραγωνικό σφάλμα την ασάφεια προσδιορισμού του υψομέτρου ενός συμβολομετρικού ζευγαριού, αυτό σημαίνει ότι δεν έχει πραγματοποιηθεί με επιτυχία η διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης σε πολλά σημεία της περιοχής μελέτης. Δηλαδή, κατά την αποκατάσταση της φάσης έχουμε «χάσει» έναν ή περισσότερους ακεραίους κύκλους σε αυτά τα σημεία, με αποτέλεσμα ο προσδιορισμός του υψομέτρου να αποκλίνει αρκετά από το πραγματικό υψόμετρο και όπως είναι προφανές να αυξάνεται σημαντικά το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE). Αυτά τα σημεία είναι συνήθως τα σημεία όπου υπάρχουν υψομετρικές ανωμαλίες όπως στα όρια των δασικών περιοχών ή στα κενά της δασικής κομοστέγης.

Η χρήση του ίδιου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς επιδράει διττά στην ακρίβεια των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων. Η χρήση του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς από τη ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους λειτουργεί θετικά στην παραγωγή του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου με τα δεδομένα ALOS PALSAR ενώ λειτουργεί αρνητικά στην παραγωγή του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από τα δεδομένα COSMO-SkyMed. Τέλος, τα αποτελέσματα του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από τα δεδομένα COSMO-SkyMed θα ήταν ακριβέστερα εάν το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς αναφερόταν στην επιφάνεια της δασικής κομοστέγης.

Στη διαδικασία παραγωγής των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων το λογισμικό πακέτο SARscape υπολογίζει μια σχετική ενδεικτική τιμή του τυπικού σφάλματος όπου αποθηκεύεται σε ένα αρχείο που ονομάζεται αρχείο της ακρίβειας (precision file). Για την καλύτερη εκτίμηση της εικόνας της υψομετρικής



Εικόνα 11 Εικόνες ακρίβειας παραγόμενων συμβολομετρικών ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων

ακρίβειας των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων παραθέτονται οι εικόνες ακρίβειας (precision images).

Οι χάρτες ακρίβειας αποτελούν ένα δείκτη ακρίβειας των μετρήσεων όπου οι μικρότερες τιμές απεικονίζονται με σκούρους τόνους ενώ οι μεγαλύτερες με λευκούς τόνους. Όσο μεγαλύτερη είναι μια τιμή τόσο μικρότερη είναι η ακρίβεια της μέτρησης. Ο τύπος υπολογισμού είναι:

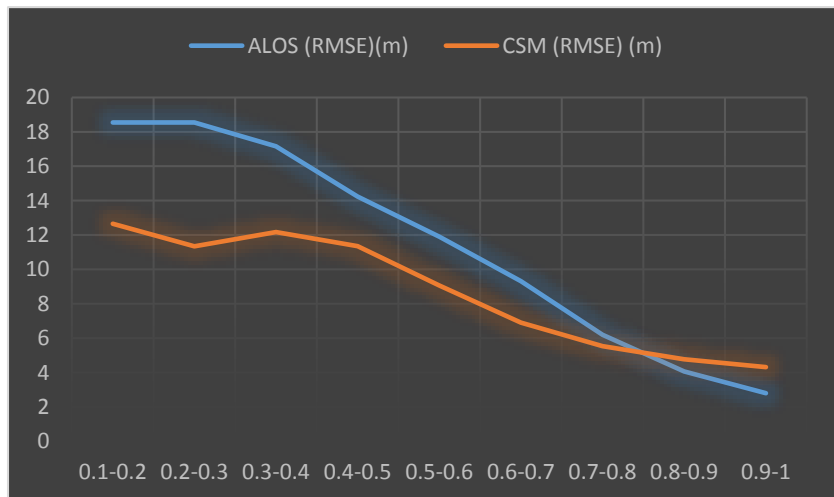
$$\sqrt{\frac{1 - \gamma^2}{2\gamma^2} \cdot \frac{\lambda R \sin \theta}{4\pi B}}$$

Όπου, γ η συμβολομετρική συνάφεια, λ το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας, θ η γωνία πρόσπτωσης, R η πλάγια απόσταση (slant-range) μεταξύ του σκεδαστή και του αισθητήρα SAR και B η γεωμετρική γραμμή βάσης.

Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων παρουσιάζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα σχετικά με τις τιμές της συνάφειας.

Συνάφεια	ALOS (RMSE) (m)	CSM (RMSE) (m)
0-0.1	-	-
0.1-0.2	18.5	12.7
0.2-0.3	18.5	11.3
0.3-0.4	17.2	12.2
0.4-0.5	14.2	11.4
0.5-0.6	11.9	9.1
0.6-0.7	9.3	6.9
0.7-0.8	6.2	5.5
0.8-0.9	4.1	4.8
0.9-1	2.8	4.3

Πίνακας 5 Σχέση της συνάφειας με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα



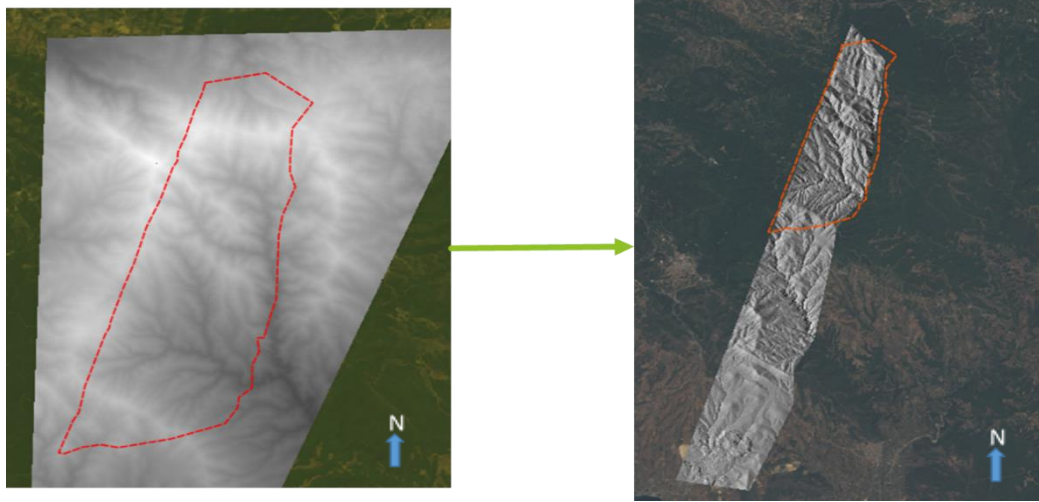
Σχήμα 2 Σχέση της συνάφειας με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα

Παρατηρώντας τη σχέση της συνάφειας με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα όσο αυξάνεται η συνάφεια η υψομετρική ακρίβεια των παραγόμενων βελτιώνεται.

Τέλος, γίνεται η αξιολόγηση των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων για τις διάφορες κλίσεις της περιοχής ενδιαφέροντος.

Αρχικά χρησιμοποιώντας το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς (DEM_TOPO) που περιγράφει το έδαφος έγινε η παραγωγή του χάρτη κλίσεων. Οι κλίσεις αναφέρονται στη διεύθυνση Ανατολή-Δύση που

είναι σχεδόν κάθετη στις τροχιές των δορυφορικών συστημάτων ALOS PALSAR και COSMO-SkyMed.

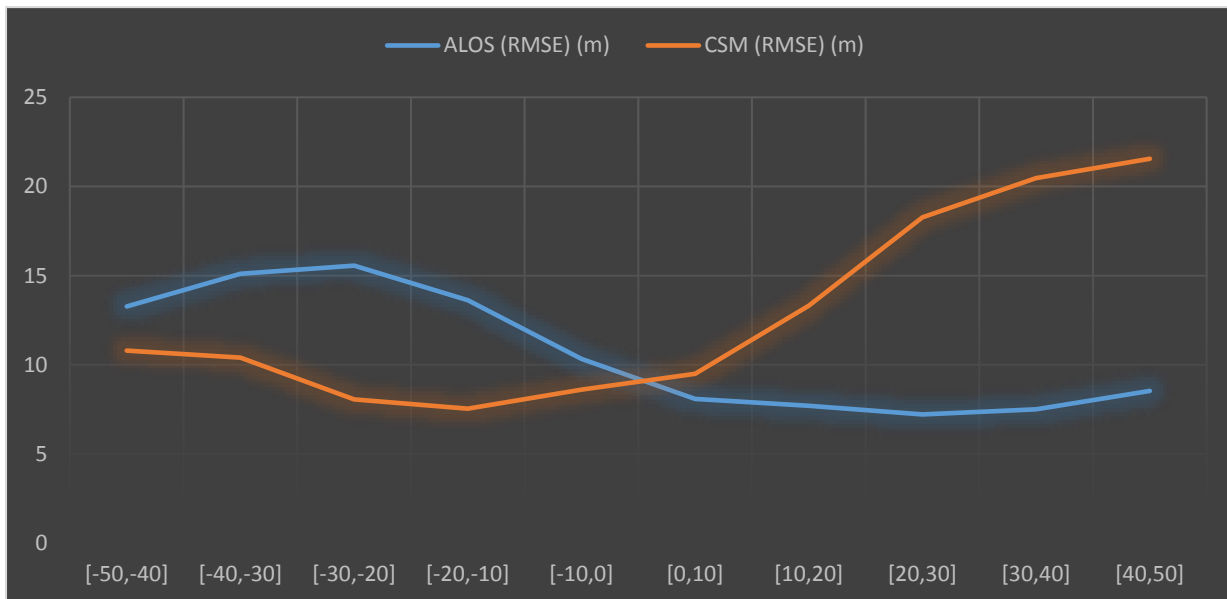


Εικόνα 12 Παραγωγή του χάρτη κλίσεων της περιοχής ενδιαφέροντος

Με βάση τον χάρτη κλίσεων της περιοχής ενδιαφέροντος εξετάστηκε η συμπεριφορά του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Παρακάτω παρουσιάζεται ο σχετικός πίνακας και το αντίστοιχο διάγραμμα.

Εύρος τιμών κλίσεων	ALOS (RMSE) (m)	Ποσοστό περιοχής (%)	CSM (RMSE) (m)	Ποσοστό περιοχής(%)
[-50,-40]	13.3	0.1	10.8	0.3
[-40,-30]	15.1	1.4	10.4	1.6
[-30,-20]	15.6	7.5	8.1	5.8
[-20,-10]	13.6	16.9	7.5	15.6
[-10,0]	10.3	26.5	8.6	29.1
[0,10]	8.1	28.3	9.5	30.8
[10,20]	7.7	14.2	13.3	12.4
[20,30]	7.2	4.3	18.3	3.7
[30,40]	7.5	0.7	20.5	0.7
[40,50]	8.5	0.1	21.6	0.1

Πίνακας 6 Σχέση των κλίσεων με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων

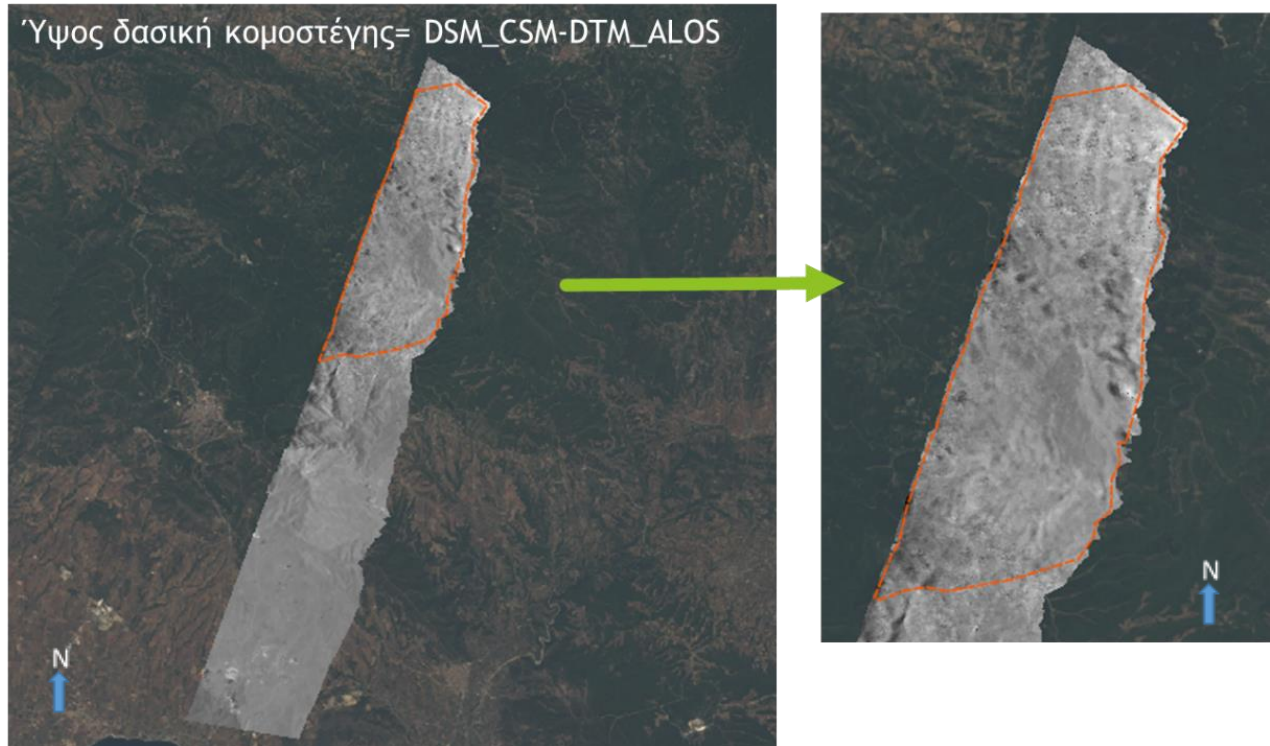


Σχήμα 3 Σχέση των κλίσεων της περιοχής μελέτης με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων

Όπως παρατηρείται και από το παραπάνω διάγραμμα η υψομετρική ακρίβεια είναι καλύτερη στις περιοχές που δεν υπάρχουν έντονες κλίσεις. Η παρουσία έντονων κλίσεων έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία γεωμετρικών παραμορφώσεων (πτύχωση, σμίκρυνση, σκίαση) με αποτέλεσμα να μειώνεται η υψομετρική ακρίβεια του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου. Επίσης, λόγω της ανιούσας (ascending) τροχιάς του δορυφορικού συστήματος ALOS PALSAR οι θετικές κλίσεις παρουσιάζουν χαμηλές τιμές μέσου τετραγωνικού σφάλματος γιατί οι συγκεκριμένες επιφάνειες είναι προσανατολισμένες προς τον δέκτη. Αντίστοιχα, λόγω κατιούσας (descending) τροχιάς του δορυφορικού συστήματος COSMO-SkyMed οι αρνητικές κλίσεις παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές τιμές μέσου τετραγωνικού σφάλματος γιατί οι συγκεκριμένες επιφάνειες είναι προσανατολισμένες προς το δέκτη.

11 Αξιολόγηση εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης

Στη συγκεκριμένη παράγραφο γίνεται η αξιολόγηση της μεθοδολογίας και του αποτελέσματος του ύψους δασικής κομοστέγης. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το αποτέλεσμα της διαφοράς των δυο παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων.



Εικόνα 13 Εκτίμηση ύψους δασικής κομοστέγης

Όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια οι παράμετροι ενός συστήματος SAR (μήκος κύματος, πόλωση, γεωμετρία απεικόνισης, γωνία πρόσπτωσης) και οι παράμετροι (φυσικές και διηλεκτρικές ιδιότητες) της περιοχής μελέτης επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου. Οι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τη συγκεκριμένη μεθοδολογία για την εκτίμηση του ύψους της δασικής κομοστέγης αναφέρονται παρακάτω:

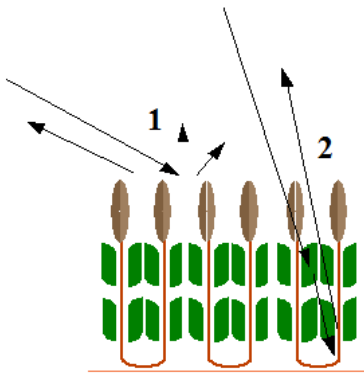
1. Μήκος κύματος της μικροκυματικής ακτινοβολίας

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως η μικροκυματική ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (X,C μπάντα) αλληλεπιδρά με σκεδαστές όπως τα φύλλα, βελόνες, μικρά κλαδιά με αποτέλεσμα το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο να περιγράφει τον άνω όροφο της δασικής κομοστέγης. Αντίστοιχα η μικροκυματική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (L,P μπάντα) αλληλεπιδρά με σκεδαστές όπως τα μεγάλα κλαδιά, κορμούς δέντρων έδαφος με αποτέλεσμα το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο να προσεγγίζει την επιφάνεια του εδάφους.

2. Γεωμετρία των απεικονίσεων SAR

Η πλάγια γεωμετρία των απεικονίσεων SAR έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία παραμορφώσεων. Τα φαινόμενα της πτύχωσης της σμίκρυνσης και της σκίασης μειώνουν την ακρίβεια του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης.

3. Γωνία πρόσπτωσης



Εικόνα 14 Σχέση γωνία πρόσπτωσης και διαπεραστικότητας

Μια απεικόνιση SAR συνήθως χωρίζεται στις περιοχές των εγγύτερων πλάγιων αποστάσεων (near-range), των μέσων (mid-range) και των απώτερων πλάγιων αποστάσεων (far-range) λόγω της μεταβολής της γωνίας πρόσπτωσης. Σύμφωνα με τους Izzawati et al. (2006) σε μια απεικόνιση SAR στην περιοχή των εγγύτερων πλάγιων αποστάσεων όπου η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρότερη, η διαπεραστικότητα της μικροκυματικής ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη, αντίθετα με την περιοχή των απώτερων πλάγιων αποστάσεων όπου η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη. Η αυξημένη διαπεραστικότητα μπορεί να συνδεθεί με το ύψος των σκεδαστών που περιγράφει το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο. Με απλά λόγια, στην περιοχή εγγύτερων πλάγιων αποστάσεων επειδή η διαπεραστικότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη, το εκτιμώμενο ύψος της δασικής κομοστέγης θα είναι περισσότερο υποτιμημένο συγκριτικά με την

περιοχή των απώτερων πλάγιων αποστάσεων. Στη συγκεκριμένη εργασία δεν έγινε κάποια διόρθωση λόγω της μεταβολής της γωνίας πρόσπτωσης λόγω της μικρής μεταβολής των τιμών της στα δορυφορικά δεδομένα SAR που χρησιμοποιήθηκαν.

4. Χρονική διαφορά των απεικονίσεων SAR

Η χρήση απεικονίσεων που έχουν μεγάλη χρονική διαφορά έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη μεγάλης χρονικής αποσυσχέτισης που αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα της συμβολομετρικής διαδικασίας. Η χρήση δεδομένων μιας διέλευσης παρέχει ακριβέστερα αποτελέσματα λόγω της μηδενικής χρονικής αποσυσχέτισης και λόγω της απουσία της μεταβολής των ατμοσφαιρικών συνθηκών.

5. Τραχύτητα της επιφάνειας

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες διαμόρφωσης του επιστρεφόμενου σήματος είναι η τραχύτητα της επιφάνειας. Σύμφωνα με τον Rayleigh (Bamler & Hartl 1998) μια επιφάνεια είναι ομαλή όταν ισχύει:

$$h = \frac{\lambda}{8 \sin \theta}$$

Όπου h η τραχύτητα της επιφάνειας (σε όρους υψομετρικής πληροφορίας), λ το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας και θ η γωνία πρόσπτωσης

Η τραχύτητα μια δασικής έκτασης έχει ως αποτέλεσμα τη σκέδαση όγκου (volume scattering) που είναι αποτέλεσμα πολλαπλών σκεδάσεων μέσα στη δασική κομοστέγη. Η μεταβολή της τραχύτητας μια δασικής κομοστέγης λόγω διάφορων μεταβαλλόμενων παραγόντων όπως ο άνεμος ή η υγρασία έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των χαρακτηριστικών των επιστρεφόμενων σημάτων με αποτέλεσμα την εισαγωγή σφαλμάτων στην εκτίμηση του ύψους της δασικής κομοστέγης.

6. Προσανατολισμός και κλίσεις της περιοχής μελέτης

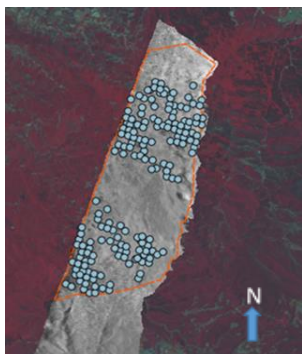
Οι αλλαγές των τοπογραφικών κλίσεων έχουν ως αποτέλεσμα την αλλαγή της γεωμετρίας απεικόνισης και της ορατότητας από τον αισθητήρα SAR (Balzter et al., 2007a). Σημειώνεται ότι στις περιοχές που είναι προσανατολισμένες προς τον αισθητήρα SAR η επίδραση του εδάφους είναι σημαντικότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές. Στις περιοχές που δεν είναι προσανατολισμένες προς τον αισθητήρα SAR τα αποτελέσματα της εκτίμησης του δασικού ύψους αναμένονται καλύτερα λόγω της μεγαλύτερης επίδρασης της δασικής κομοστέγης.

7. Υψομετρικές ασυνέχειες λόγω της βλάστησης.

Όπως έχει αναφερθεί οι υψομετρικές ασυνέχειες λόγω της βλάστησης εντοπίζονται στα όρια των δασικών περιοχών που συνήθως υπάρχουν γειτονικές περιοχές με χέρσο έδαφος ή χαμηλή βλάστηση και στα κενά που υπάρχουν μέσα στις δασικές εκτάσεις. Σύμφωνα με τις μελέτες των Hagberg et al. (1995), Woodhouse et al. (2006), Williams et al. (2010) θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν οι μεταβολές της συμπεριφοράς της μικροκυματικής ακτινοβολίας στις υφιστάμενες υψομετρικές ασυνέχειες λόγω των σφαλμάτων εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης που παρατηρούνται στις συγκεκριμένες περιοχές χρησιμοποιώντας την τεχνική της συμβολομετρίας.

Στη συνέχεια αξιολογείται το παραγόμενο προϊόν εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης σχετικά με διάφορους παράγοντες όπως η συνάφεια, τα επίγεια δεδομένα, τις κλίσεις και τον προσανατολισμό των επιφανειών της περιοχής μελέτης όπως επίσης και σε δασικές (πολύγωνο πυκνής βλάστησης) και μη-δασικές/χέρσες περιοχές.

11.1 Αξιολόγηση της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης με βάση τα επίγεια δεδομένα

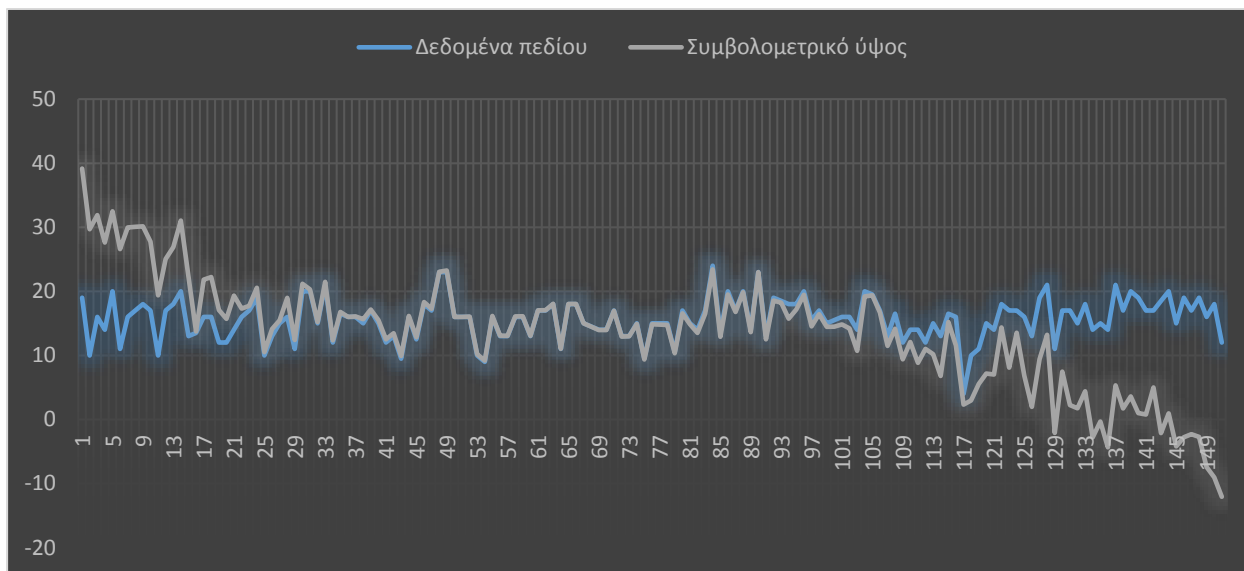


Εικόνα 15 Χωρική κατανομή σημείων επίγειων μετρήσεων δασικού ύψους κομοστέγης

Όπως έχουν περιγραφεί και προηγουμένως τα διαθέσιμα επίγεια δεδομένα του δασικού ύψους κομοστέγης χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης με την εφαρμογή της μεθοδολογίας. Οι επίγειες μετρήσεις στην περιοχή ενδιαφέροντος της συγκεκριμένης εργασίας οι επίγειες μετρήσεις ήταν 172. Για τη διαδικασία της αξιολόγησης χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα 159. Τα 13 σημεία αφαιρέθηκαν λόγω της πολύ μεγάλης διαφοράς του εκτιμώμενου και του μετρημένου ύψους δασικής κομοστέγης. Ο κύριος λόγος ύπαρξης τόσο μεγάλων διαφορών είναι η αποτυχία αποκατάστασης της φάσης στα συγκεκριμένα σημεία. Τέλος, αναφέρονται μερικά βασικά στατιστικά στοιχεία. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης με βάση τις επίγειες μετρήσεις είναι 6.9 μέτρα. Ο μέσος όρος

του ύψους της δασικής κομοστέγης από τα επίγεια δεδομένα είναι 15.7 μέτρα ενώ από τα εκτιμώμενα ύψη δασική κομοστέγης είναι 13.7 μέτρα. Όπως έχει προαναφερθεί και έχει παρατηρηθεί σε ανάλογες εφαρμογές τα αποτελέσματα του ύψους δασικής κομοστέγης είναι υποτιμημένα.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η συμφωνία εκτιμώμενου και μετρούμενου ύψους δασικής κομοστέγης.



Σχήμα 4 Σύγκριση εκτιμώμενου και μετρούμενου ύψους δασικής κομοστέγης

11.2 Αξιολόγηση της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης με βάση τις κλίσεις και τον προσανατολισμό των επιφανειών της περιοχής μελέτης



Σχήμα 5 Σημεία επίγειων μετρήσεων στις προσανατολισμένες επιφάνειες προς τους αισθητήρες των συστημάτων SAR

Με βάση τη προηγούμενη ανάλυση σχετικά με τις κλίσεις και τον προσανατολισμό των επιφανειών της περιοχής μελέτης έγινε η επιλογή των επιφανειών με προσανατολισμό προς τους αισθητήρες των συστημάτων SAR. Αναλυτικότερα έγινε η επιλογή των προσανατολισμένων επιφανειών προς τον αισθητήρα ALOS PALSAR και προς τον αισθητήρα COSMO-Skymed και στη συνέχεια προέκυψε η τομή των επιφανειών όπου φαίνονται με μπλε χρώμα στη διπλανή εικόνα. Στις συγκεκριμένες επιφάνειες ήταν διαθέσιμες 45 επίγειες μετρήσεις όπου και χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας για την εκτίμηση του ύψους δασικής κομοστέγης. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα του ύψους δασικής κομοστέγης με βάση την εμπειρική μέθοδο σε σχέση με τα επίγεια δεδομένα ήταν 5.4 μέτρα. Η βελτίωση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος οφείλεται στον προσανατολισμό των επιφανειών προς τους αισθητήρες των συστημάτων SAR. Ο μέσος όρος του ύψους της δασικής κομοστέγης από τα επίγεια δεδομένα είναι 15 μέτρα ενώ από τα εκτιμώμενα ύψη δασικής κομοστέγης είναι 2 μέτρα. Η μεγάλη διαφορά στις μέσες τιμές

είναι λογική αφού στις περιοχές που είναι προσανατολισμένες προς τον αισθητήρα SAR η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρότερη με αποτέλεσμα την αυξημένη διαπερατικότητα του σήματος SAR. Η μεγάλη διαπερατικότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη επίδραση του εδάφους σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές. Στις περιοχές που δεν είναι προσανατολισμένες προς τον αισθητήρα SAR τα αποτελέσματα της εκτίμησης του δασικού ύψους είναι καλύτερα (4.10.1) λόγω της μεγαλύτερης επίδρασης της δασικής κομοστέγης.

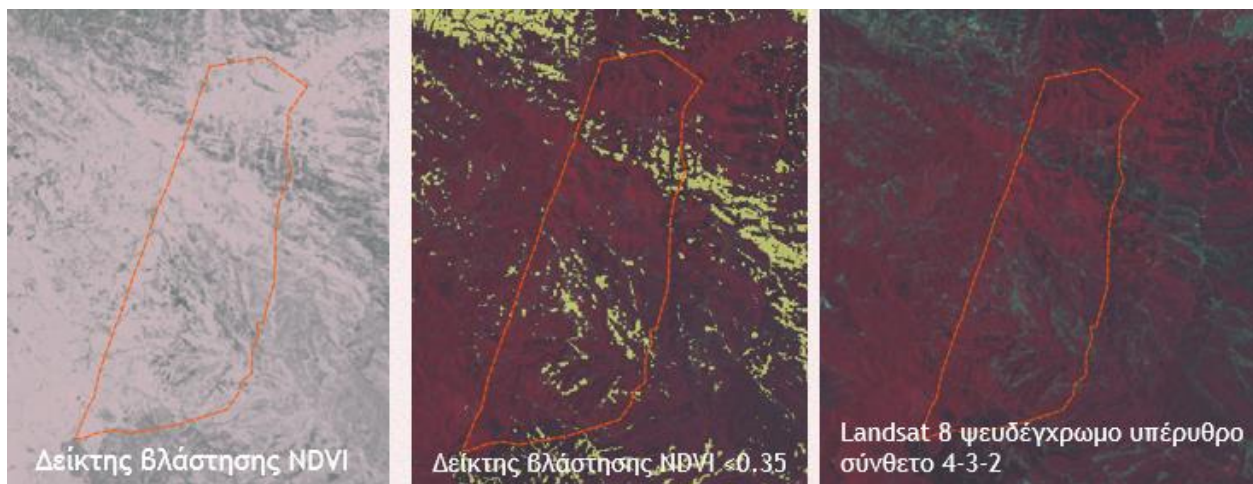
Τέλος, στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η συμφωνία εκτιμώμενου και μετρούμενου ύψους δασικής κομοστέγης στις επιφάνειες που είναι προσανατολισμένες προς τους δέκτες SAR.



Σχήμα 6 Αξιολόγηση του ύψους δασικής κομοστέγης με βάση τα επίγεια δεδομένα για τις βέλτιστες κλίσεις

11.3 Αξιολόγηση της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης στις χέρσες περιοχές

Στο σημείο αυτό περιγράφεται ο τρόπος καθορισμού των χέρσων περιοχών μέσα στη περιοχή ενδιαφέροντος και στη συνέχεια παραθέτονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης.



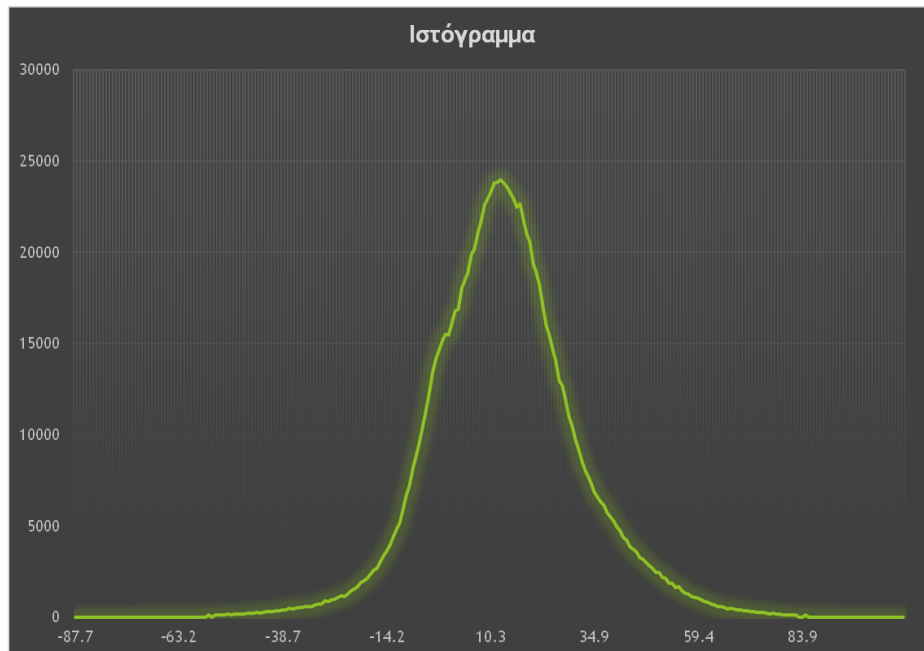
Εικόνα 16 Προϊόντα καθορισμού χέρσων περιοχών

Για τον καθορισμό των χέρσων περιοχών χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής βλάστησης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Ο συντελεστής βλάστησης NDVI κυμαίνεται από -1 μέχρι 1 και περιγράφεται από τη σχέση

$$NDVI = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)}$$

Όπου *NIR* οι μετρήσεις της φασματικής ανακλαστικότητας στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι και *VIS* οι μετρήσεις της φασματικής ανακλαστικότητας στο κόκκινο (ορατό) κανάλι.

Φωτογραμμετρικά, επιλέχθηκε το κατώφλι 0.35 όπου με κίτρινο χρώμα διακρίνονται οι χέρσες περιοχές στη περιοχή ενδιαφέροντος. Για την ταυτοποίηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε και το ψευδέγχρωμο υπέρυθρο σύνθετο 4-3-2. Παρακάτω παρουσιάζεται το ιστόγραμμα και τα στατιστικά μεγέθη του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης στις χέρσες περιοχές.



Η μέση τιμή του εκτιμώμενου δασικού ύψους είναι 14.1 μέτρα με τυπική απόκλιση 15.4 μέτρα. Με μια πρώτη ματιά το αποτέλεσμα δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα αφού η αναμενόμενη τιμή θα έπρεπε να είναι κοντά στο μηδέν. Παρόλ' αυτά το αποτέλεσμα κρίνεται αποδεκτό για τους παρακάτω λόγους.

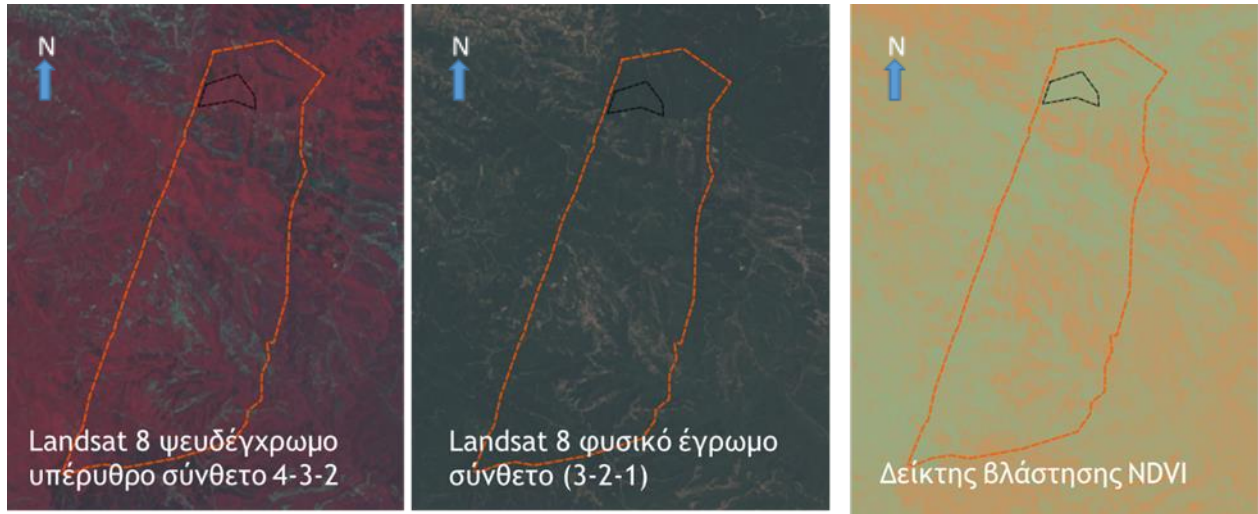
Σχήμα 7 Ιστόγραμμα για τις χέρσες περιοχές της περιοχής ενδιαφέροντος



Εικόνα 17 Καθορισμός χέρσων περιοχών (κίτρινες)

Οι χέρσες περιοχές που οριοθετήθηκαν με τη χρήση του συντελεστή βλάστησης NDVI περιλαμβάνουν δρόμους, αστικές εκτάσεις, βραχώδεις περιοχές και χέρσο έδαφος. Όπως φαίνεται και στη διπλανή εικόνα ένα μέρος των χέρσων περιοχών (κίτρινες) βρίσκονται σε περιοχές με μεγάλες κλίσεις και ένα άλλο μέρος τους μέσα σε δασικές περιοχές. Τα σφάλματα της μεθοδολογίας στις περιοχές με έντονες κλίσεις όπως έχει προαναφερθεί αναμένονται μεγάλα. Επίσης, οι χέρσες περιοχές μέσα στις δασικές εκτάσεις αναμένεται να παρουσιάσουν μεγάλο σφάλμα λόγω των υψομετρικών ανωμαλιών όπως έχει περιγραφεί και προηγουμένως.

11.4 Αξιολόγηση της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης στο πολύγωνο πυκνής βλάστησης
 Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης δημιουργήθηκε ένα πολύγωνο πυκνής βλάστησης για την εξέταση της συμπεριφοράς της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε.

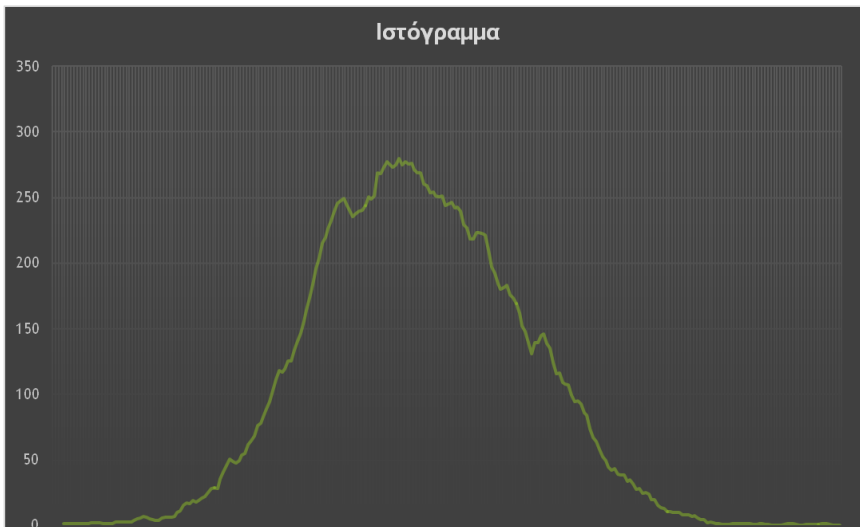


Εικόνα 18 Προϊόντα για τον καθορισμό του πολυγώνου πυκνής βλάστησης

Τα βασικά οπτικά κριτήρια δημιουργίας του πολυγώνου της πυκνής βλάστησης ήταν:

- Έντονο κόκκινο χρώμα από το ψευδέγχρωμο υπέρυθρο σύνθετο (4-3-2) που δημιουργήθηκε από απεικόνιση Landsat 8 με ημερομηνία λήψης 1/6/2013.
- Σκούρο πράσινο χρώμα από το φυσικό έγχρωμο σύνθετο (3-2-1) της απεικόνισης Landsat 8.
- Υψηλό δείκτη βλάστησης NDVI (πράσινο χρώμα) από την διαθέσιμη απεικόνιση Landsat 8.

Για το συγκεκριμένο πολύγωνο της δασικής βλάστησης υπολογίστηκε το ιστόγραμμα και βασικά στατιστικά μεγέθη που φαίνονται στη συνέχεια.



Εικόνα 19 Ιστόγραμμα για το πολύγωνο πυκνής δασικής βλάστησης

Η μέση τιμή του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης για το πολύγωνο της δασικής βλάστησης ήταν περίπου 25 μέτρα με τυπική απόκλιση περίπου 17.3 μέτρα. Σύμφωνα με τις επίγειες μετρήσεις το μέσο ύψος δασικής κομοστέγης όλης της περιοχής ενδιαφέροντος είναι 15,7 μέτρα με απόκλιση περίπου 1.5 μέτρα

Σημειώνεται ότι στην περιοχή του πολυγώνου, οι πιθανότητες η βλάστηση να έχει μεγάλο ύψος δασικής κομοστέγης είναι μεγάλες λόγω της μεγάλης πυκνότητας της βλάστησης σύμφωνα με το δείκτη NDVI και την απεικόνιση Landsat 8. Με βάση το παραπάνω συλλογισμό η υψηλή εκτιμώμενη μέση τιμή του ύψους δασικής κομοστέγης ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Τέλος η μεγάλη τυπική απόκλιση του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης σχετίζεται με τα σφάλματα της συμβολομετρικής διαδικασίας αλλά και τα σφάλματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας που έχουν περιγραφεί προηγουμένως.

12 Συμπεράσματα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την εφαρμογή της μεθοδολογίας. Όπως έχει περιγραφεί και προηγουμένως η μεθοδολογία βασίζεται στην αξιοποίηση των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων με την τεχνική της συμβολομετρίας απεικονίσεων SAR. Η συνεχής εξέλιξη των συστημάτων SAR έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ακρίβειας των διαθέσιμων προϊόντων και τη βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων με τη χρήση της συμβολομετρίας. Οι σημαντικότερες απαιτήσεις της μεθόδου είναι η διαθεσιμότητα ακριβούς ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς, η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για την επεξεργασία των απεικονίσεων SAR που καταλαμβάνουν μεγάλο αποθηκευτικό χώρο, η χρήση κατάλληλου λογισμικού επεξεργασίας και η θεωρητική γνώση του χρήστη για την επιτυχημένη παρέμβασή του στην ημι-αυτοματοποιημένη διαδικασία της συμβολομετρίας. Τέλος, για τη διερεύνηση των δυνατοτήτων της μεθοδολογίας είναι απαραίτητο να γίνεται η κατάλληλη επιλογή αλγορίθμων και η υλοποίησή τους στο κάθε στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας ή/και η δημιουργία νέων καταλληλότερων αλγορίθμων για την επιτυχία της μεθόδου.

Παρατίθενται τα παρακάτω συμπεράσματα με βάση τα αποτελέσματα της εφαρμογής και της βιβλιογραφικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε.

1. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα όπως προέκυψε από το εργαλείο της αξιολόγησης των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων από το λογισμικό SARscape κυμαίνεται στα 10.5 μέτρα για τις απεικονίσεις ALOS και στα 10.0 μέτρα για τις απεικονίσεις Cosmo-skymed. Το σχετικά μεγάλο σφάλμα των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων περιορίζει τις δυνατότητες της συμβατικής συμβολομετρίας για διάφορες εφαρμογές. Παρόλ' αυτά εφαρμόζοντας την προτεινόμενη μεθοδολογία, η εκτίμηση του ύψους δασικής κομοστέγης δίνει υποσχόμενα αποτελέσματα αφού υπάρχουν πολλά περιθώρια βελτίωσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας.
2. Σύμφωνα με την αξιολόγηση του εκτιμώμενου δασικού ύψους με βάση τα επίγεια δεδομένα το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της μεθόδου είναι 6.9 μέτρα. Η χρήση δεδομένων SAR δορυφορικών συστημάτων και η εφαρμογή της μεθόδου σε μικτή δασική περιοχή είναι τα δυο βασικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Σε σύγκριση με σχετικές μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν το αποτέλεσμα κρίνεται ικανοποιητικό.
3. Ένας σημαντικός περιορισμός της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι η ανιούσα (ascending) και η κατιούσα (descending) τροχιά των δορυφόρων ALOS PALSAR και COSMO skymed αντίστοιχα. Οι διαφορετικές κατευθύνσεις των τροχιών των δορυφόρων είχε ως αποτέλεσμα τη διαφορετική γεωμετρία των απεικονίσεων SAR. Σύμφωνα με τους Carrasco et al. (1997), η διαφορετική προοπτική που έχει ο αισθητήρας του κάθε δορυφορικού συστήματος έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία γεωμετρικών παραμορφώσεων σε διαφορετικές περιοχές της περιοχής μελέτης. Η αφαίρεση των δυο παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων για την παραγωγή του συμβολομετρικού ύψους έχει ως αποτελέσματα την παρουσία των γεωμετρικών

παραμορφώσεων σε πολλές περιοχές της περιοχής ενδιαφέροντος και κατ' επέκταση την ύπαρξη μεγάλων σφαλμάτων εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης. Συμπερασματικά προτείνεται ο συνδυασμός δεδομένων από ανιούσες και κατιούσες τροχιές για την παραγωγή του καθενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου με στόχο την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων του.

4. Ένας άλλος βασικός περιορισμός της συγκεκριμένης πρακτικής εφαρμογής είναι η απουσία διαθέσιμων συμβολομετρικών ζευγαριών. Όπως έχει περιγραφεί η επιλογή του συμβολομετρικού ζευγαριού είναι ένας σημαντικός καθοριστικός παράγοντας της ποιότητας του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου. Για τη συγκεκριμένη μεθοδολογία προτείνονται συμβολομετρικά ζευγάρια με μικρή χρονική αποσυσχέτιση. Επίσης, το συμβολομετρικό ζευγάρι που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που εκφράζει τον άνω όροφο της δασικής κομοστέγης προτείνεται να έχει μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης. Αντίστοιχα, το συμβολομετρικό ζευγάρι που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που εκφράζει την επιφάνεια του εδάφους προτείνεται να έχει μικρές γωνίες πρόσπτωσης. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας για την επιλογή του συμβολομετρικού ζευγαριού είναι η γεωμετρική βάση του συμβολομετρικού ζευγαριού. Προτείνεται η επιλογή σχετικά μεγάλης κάθετης συνιστώσας της γεωμετρικής βάσης για τη μείωση του ύψους ασάφειας. Σημειώνεται όμως, ότι όσο μεγαλώνει η κάθετη συνιστώσα της βάσης τόσο δυσκολότερη είναι η διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης. Για την εύρεση του κατάλληλου συμβολομετρικού ζευγαριού είναι απαραίτητο να συνυπολογιστούν οι επιδράσεις που έχει η κάθετη συνιστώσα της βάσης στο ύψος ασάφειας και στη διαδικασία αποκατάστασης της φάσης.
5. Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες, τα βασικά προβλήματα της επαναληπτικής συμβολομετρίας (repeat-pass) είναι η χρονική αποσυσχέτιση και το υπολειπόμενο τροχιακό σφάλμα (Wegmuller and Werner, 1995, Lee et al., 1994, Zebker and Villasenor, 1992). Η χρονική αποσυσχέτιση προκαλεί τη μείωση της ακρίβειας στον προσδιορισμό των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων ενώ το υπολειπόμενο τροχιακό σφάλμα εμφανίζεται ως συστηματικό σφάλμα στη διεύθυνση του αξιμουθίου. Τα δεδομένα SAR που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας παρουσιάζουν μεγάλες χρονικές διαφορές συγκεκριμένα 46 μέρες για τα δεδομένα ALOS PALSAR και 1 μέρα για τα δεδομένα COSMO-skymed. Σημειώνεται ότι η χρονική αποσυσχέτιση επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τις απεικονίσεις Cosmo-skymed συγκριτικά με τις απεικονίσεις ALOS. Αυτό συμβαίνει επειδή το επιστρεφόμενο σήμα της μπάντας X επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό λόγω των μεγάλων μεταβολών της κατάστασης του πάνω μέρους της κομοστέγης σε σχέση με τις επιστροφές της μπάντας L που επηρεάζεται λιγότερο από τις μικρότερες μεταβολές του κάτω μέρους της κομοστέγης. Τέλος, αν και με μία μέρα διαφορά λήψης, η μέση τιμή της συνάφειας των απεικονίσεων COSMO-skymed είναι μικρότερη από αυτή των απεικονίσεων ALOS PALSAR.
6. Στις δασικές περιοχές όπου η κομοστέγη έχει μεγαλύτερο πάχος και η δασική δομή είναι πυκνή αναμένεται η μείωση του σχετικού υψομετρικού σφάλματος λόγω της ακριβέστερης αναπαράστασης του άνω ορόφου της κομοστέγης από το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο που έχει προκύψει από τη συμβολομετρία των απεικονίσεων Cosmo-skymed. Ο παραπάνω συλλογισμός μπορεί να επαληθευτεί από τους μελετητές Izzawati et al. (2006) και Woodhouse et al. (2006) όπου συμπέραναν ότι τα σφάλματα του συμβολομετρικού ύψους από

δεδομένα SAR μπάντας X και πόλωσης HH μειώνονται όταν μεγαλώνει η πυκνότητα της δασικής κομοστέγης.

7. Σύμφωνα και με τα αποτελέσματα της αξιολόγησης συμπεραίνεται ότι η αύξηση της κλίσης της περιοχής έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία μεγαλύτερων σφαλμάτων στη μεταβλητή του ύψους δασική κομοστέγης κυρίως λόγω της “ασυνήθιστης” γεωμετρίας των απεικονίσεων SAR.
8. Στις περιοχές όπου η συνάφεια έχει υψηλές τιμές η ακρίβεια της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης βελτιώνεται σημαντικά.
9. Σύμφωνα με τους Izzawati et al. (2006) και Woodhouse et al. (2006) σε περιοχές με πυκνή δασική κομοστέγη τα αποτελέσματα του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης αναμένονται βελτιωμένα. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή το παραπάνω δεν ισχύει. Σύμφωνα με την αξιολόγηση που έγινε στο πολύγωνο πυκνής βλάστησης, τα αποτελέσματα είχαν χειρότερη ακρίβεια συγκριτικά με τα συνολικά αποτελέσματα της περιοχής μελέτης. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί για τους παρακάτω λόγους. Η διαδικασία επιλογής του πολυγώνου που υιοθετήθηκε δεν είναι επιστημονικά ορθή. Η οπτική επιλογή μέσα από τα κανάλια (ψευδέγχρωμο υπέρυθρο σύνθετο & φυσικό έγχρωμο σύνθετο) και με βάση το κατώφλι στο δείκτη βλάστησης NDVI περιέχει ασάφειες και ανακρίβειες. Για παράδειγμα στο συγκεκριμένο πολύγωνο μπορεί να περιέχονται και χέρσες περιοχές ή περιοχές με χαμηλή θαμνώδης βλάστηση με αποτέλεσμα την εισαγωγή μεγάλων σφαλμάτων στην εκτίμηση του ύψους της δασικής κομοστέγης.
10. Η δημιουργία χαρτών δασικού ύψους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταξινόμηση των δασικών περιοχών. Η γνώση της υψομετρικής πληροφορίας μια δασικής περιοχής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση και άλλων δασικών βιοφυσικών παραμέτρων όπως η βιομάζα.

13 Περιορισμοί και πλεονεκτήματα της μεθόδου (προτεινόμενης μεθοδολογίας)

Πλεονεκτήματα της μεθοδολογίας:

- Χαμηλό κόστος απαιτούμενων δεδομένων SAR
- Μικρές υπολογιστικές απαιτήσεις με τη δυνατότητα εξαγωγή χάρτη ύψους δασικής κομοστέγης
- Μεγάλη κάλυψη γεωγραφικής περιοχής των δεδομένων συγκριτικά με τις ήδη υπάρχουσες μεθόδους
- Ικανοποιητική ακρίβεια για μεγάλο εύρος δασικών εφαρμογών
- Δυνατότητες βελτίωσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας όπως περιγράφεται στη επόμενη παράγραφο (2.3)

Μειονεκτήματα της μεθοδολογίας:

- Απαιτούμενη γνώση ακριβούς ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου εδάφους
- Εφαρμογή της τεχνικής της επαναληπτικής συμβολομετρίας. Σύμφωνα με τον Bamler et al. (2009) η χρήση της τεχνικής της συμβολομετρίας απεικονίσεων X μπάντας δεν παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα στις δασικές περιοχές λόγω της μεγάλης χρονικής αποσυσχέτισης των σκεδαστών
- Υποτίμηση του πραγματικού ύψους δασικής κομοστέγης.
- Μεγάλα σφάλματα των εκτιμώμενων αποτελεσμάτων σε περιοχές με μεγάλες κλίσεις

- Μεγάλα σφάλματα των εκτιμώμενων αποτελεσμάτων στα όρια των δασικών περιοχών και στα κενά τους (υψομετρικές ασυνέχειες).
- Μεγάλα σφάλματα του εκτιμώμενου δασικού ύψους κομοστέγης σε δασικές περιοχές με μικρή πυκνότητα της δασικής κομοστέγης.

14 Προτάσεις

Μετά τη μελέτη της θεωρίας της συμβολομετρικής διαδικασίας για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας και του τελικού αποτελέσματος προτείνονται τα παρακάτω:

1. Χρήση δεδομένων SAR με μικρή χρονική διαφορά λήψεων με στόχο τον περιορισμό της χρονικής αποσυσχέτισης και των ατμοσφαιρικών επιδράσεων. Προτείνεται η χρήση δεδομένων SAR μιας διέλευσης (TanDEM-X) όπου το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο έχει καλύτερη ακρίβεια συγκριτικά με αυτό που παράγεται με την τεχνική της επαναληπτικής συμβολομετρίας.
2. Υλοποίηση της μεθόδου με πολλά συμβολομετρικά ζευγάρια έτσι ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια του κάθε παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου και κατ' επέκταση της τελικής ακρίβειας του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης.
3. Χρήση δεδομένων SAR P μπάντας με στόχο την καλύτερη απεικόνιση της επιφάνειας του εδάφους.
4. Τα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα που έχουν προκύψει με την τεχνική PolInSAR χρησιμοποιώντας το μοντέλο RVoG (Random Volume over Ground) είναι ακριβή και σε πολλές μελέτες χρησιμοποιούνται έναντι αυτών που έχουν προκύψει με την τεχνική της συμβολομετρίας (Hajnsek et al., 2009). Χρήση πλήρως πολωμένων εικόνων για την εφαρμογή της τεχνικής PolInSAR με στόχο τη βελτίωση των αποτελεσμάτων.
5. Η χρήση ακριβέστερων δεδομένων αναφοράς ενισχύει την εκτίμηση του δασικού ύψους και την αξιολόγηση των παραγόμενης υψομετρικής πληροφορίας. Ως δεδομένα αναφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα πεδίου ή/και μετρήσεις Lidar (π.χ. δεδομένα ICESat GLAS) όπου παρουσιάζουν μεγάλη απόλυτη ακρίβεια (Lee et al., 2011).
6. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική μελέτη η γνώση του δασικού τύπου αποτελεί έναν παράγοντα που βελτιώνει τη διαδικασία μοντελοποίησης μιας βιοφυσικής δασικής παραμέτρου (Dobson et al., 1992, Ranson et al., 1994, Andersen et al., 2008). Η ταξινόμηση χρησιμοποιώντας απεικονίσεις SAR για το διαχωρισμό των δασικών και μη-δασικών περιοχών είχε καλά αποτελέσματα (Askne et al., 1997, Dobson et al., 1992, Balzter et al., 2001). Η αλληλεπίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας είναι διαφορετική σε δασικούς τύπους που αλλάζει η δομή τους και οι διηλεκτρικές ιδιότητες τους (Izzawati et al., 2006, Andersen et al., 2006). Προτείνεται η ανάπτυξη μια μεθοδολογίας όπου θα διορθώνονται οι τιμές του συμβολομετρικού ύψους στα όρια των δασικών περιοχών, στα κενά που υπάρχουν μέσα στη δασική κομοστέγη και στους διάφορους δασικούς τύπους χρησιμοποιώντας χάρτες βλάστησης όπου όπως έχει αναφερθεί είναι δυνατόν να παραχθούν και από τις ίδιες απεικονίσεις SAR. Επιπρόσθετα, είναι δυνατή η αφαίρεση εκτιμήσεων με μεγάλα σφάλματα για τη βελτίωση των τελικών αποτελεσμάτων του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης. Η εξαγωγή μια εικόνας ταξινόμησης μόνο από δεδομένα SAR για τη χρήση της στη διαδικασία εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης είναι ένας δύσκολος στόχος. Σημειώνεται ότι η χρήση της συμβολομετρικής συνάφειας βελτιώνει τα

αποτελέσματα της ταξινόμησης (Blaes et al., 2003). Σε περιπτώσεις όπου είναι αδύνατος ο διαχωρισμός των κατηγοριών κάλυψης εδάφους από εικόνες SAR είναι δυνατή η χρήση οπτικών εικόνων και αντίστροφα (Amarsaikhan & Douglas, 2004). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί υπάρχει ένα πλήθος ερευνών όπου συνδυάζονται δεδομένα από οπτικά συστήματα και συστήματα SAR για τη βελτίωση της διαδικασίας της ταξινόμησης συγκριτικά με τη χρήση δεδομένων από ένα μόνο τηλεπισκοπικό σύστημα παρατήρησης (Blaes et al., 2005, Li and Chen , 2005, Shupe and Marsh, 2004).

7. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα όπου αφαιρέθηκαν και οι τιμές που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν χωρίς τη χρήση διορθωτικών παραμέτρων σχετικά με την κλίση του εδάφους και τη γωνία πρόσπτωσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Σημειώνεται ότι είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου για τη διόρθωση των τιμών του συμβολομετρικού ύψους λόγω της αλλαγής των κλίσεων της επιφάνειας του εδάφους αλλά και λόγω των διάφορων γωνιών πρόσπτωσης (incidence angle) της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Για παράδειγμα στη μέλετη (Izzawati et al., 2006) δημιουργήθηκε μοντέλο διόρθωσης για τη μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης σε μια απεικόνιση SAR. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, στην περιοχή των εγγύτερων πλαγίων αποστάσεων (near-range) η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρότερη με αποτέλεσμα η διαπεραστικότητα της μικροκυματικής ακτινοβολία να είναι μεγαλύτερη, σε αντίθεση με την περιοχή των περιοχών των απώτερων πλαγίων αποστάσεων (far-range) όπου η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα η διαπεραστικότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας να είναι μικρότερη. Εναλλακτικά, σύμφωνα με τους μελετητές Kellndorfer et al. (2004) και Sexton et al. (2009) το συμβολομετρικό ύψος διορθώθηκε προσδιορίζοντας ένα πλήθος διορθωτικών συντελεστών με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής με δεδομένα πεδίου.

Βιβλιογραφία

- Amarsaikhan, D., Douglas, T., 2004. Data fusion and multisource image classification. *Int. J. Remote Sens.* 25, 3529–3539.
- Andersen, H., Mcgaughey, R.J., Carson, W.W., Reutebuch, S.E., Mercer, B., Allan, J., 2003. A comparison of forest canopy models derived from LIDAR and INSAR data in a Pacific Northwest conifer forest. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* 34, 211–217.
- Andersen, H., Mcgaughey, R.J., Reutebuch, S.E., 2005. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. *Remote Sens. Environ.* 441–449.
- Andersen, H., Mcgaughey, R.J., Reutebuch, S.E., 2008. Assessing the influence of flight parameters, interferometric processing, slope and canopy density on the accuracy of X band IFSAR-derived forest canopy height. *Int. J. Remote Sens.* 29, 1495–1510.
- Andersen, H., Reutebuch, S.E., Mcgaughey, R.J., 2006. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. *Can. J. Remote Sens.* 32, 355–366.
- Askne, J., Dammert, P.B.G., Ulander, L.M.H., Smith, G., 1997. C-band repeat-pass interferometric SAR observations of the forest. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 35, 25–35.
- Balzter, H., Luckman, A., Skinner, L., Rowland, C., Dawson, T., n.d. Observations of forest stand top height and mean height from interferometric SAR and LiDAR over a conifer plantation at Thetford Forest, UK. *Int. J. Remote Sens.* 28, 1173–1197.
- Balzter, H., Rowland, C., Saich, P., n.d. Forest canopy height and carbon estimation at Monks Wood National Nature Reserve, UK, using dual-wavelength SAR interferometry. *Remote Sens. Environ.* 108, 224–239.
- Bamler, R., Eineder, M., Adam, N., Zhu, X., Gernhardt, S., 2009. Interferometric Potential of High Resolution Spaceborne SAR. *Photogramm. - Fernerkundung - Geoinf.* 2009, 407–419.
- Baran, I., Stewart, M.P., Kampes, B.M., Perski, Z., Lilly, P., 2003. A modification to the Goldstein radar interferogram filter. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41, 2114–2118.
- Blaes, X., Defourny, P., 2003. Retrieving crop parameters based on tandem ERS 1/2 interferometric coherence images. *Remote Sens. Environ.* 88, 374–385.
- Blaes, X., Vanhalle, L., Defourny, P., 2005. Efficiency of crop identification based on optical and SAR image time series. *Remote Sens. Environ.* 96, 352–365.

- Carrasco, D., Diaz, J., Broquetas, A., Arbiol, R., Castillo, M., Pala, V., 1997. Ascending-descending orbit combination SAR interferometry assessment (DEM). Third ERS Symp. Sp. Serv. our Environ. 414, 1789.
- Cloude, S., Papathanassiou, K., 1997. Polarimetric optimisation in radar interferometry. Electron. Lett. 33, 1176–1178.
- Cloude, S.R., Papathanassiou, K.P., 1998. Polarimetric SAR interferometry. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 36, 1551–1565.
- Das, A., Agrawal, R., Mohan, S., 2014. Topographic correction of ALOS-PALSAR images using InSAR-derived DEM. Geocarto Int. 1–9.
- Dowman, I., Balan, P., Renner, K., Fischer, P., 2003. An evaluation of NEXTMap Terrain Data in the context of UK national datasets, A report from GetMapping, University ...
- Dowman, I., Fischer, P., 2003. Evaluation of IFSAR and LIDAR data for flood risk assessment, in: Proceedings of ISPRS Joint Workshop of ISPRS WG I/3 and II/2, Three Dimensional Mapping from InSAR and LIDAR. Portland Oregon.
- Drake, J.B., Dubayah, R.O., Clark, D.B., Knox, R.G., Blair, J.B., Hofton, M. a, Chazdon, R.L., Weishampel, J.F., Prince, S., 2002. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. Remote Sens. Environ. 79, 305–319.
- Dutra, L. V, Santos, J.R., Freitas, C.C., Mura, J.C., Neeff, T., Elmiro, M.A.T., Moura, P., 2006. Digital Height Modeling (DHM) of Tropical Forests using multi-frequency InSAR methodology, in: IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium IGRASS. pp. 2190–2192.
- Fensham, R.J., Fairfax, R.J., Holman, J.E., Whitehead, P.J., 2002. Quantitative assessment of vegetation structural attributes from aerial photography. Int. J. Remote Sens. 23, 2293–2317.
- Fisher, J.I., Hurtt, G.C., Thomas, R.Q., Chambers, J.Q., 2008. Clustered disturbances lead to bias in large-scale estimates based on forest sample plots. Ecol. Lett. 11, 554–63.
- Franklin, S.E., Hall, R.J., Smith, L., Gerylo, G.R., 2003. Discrimination of conifer height, age and crown closure classes using Landsat-5 TM imagery in the Canadian Northwest Territories. Int. J. Remote Sens. 24, 1823–1834.
- Hagberg, J.O., Ulander, L.M.H., Askne, J., 1995. Repeat-pass SAR interferometry over forested terrain. Geosci. Remote Sens. IEEE Trans. 33, 331–340.
- Hajnsek, I., Kugler, F., Lee, S., Papathanassiou, K.P., 2009. Tropical-Forest-Parameter Estimation by Means of Pol-InSAR : The INDREX-II Campaign. Geosci. Remote Sensing, IEEE Trans. 47, 481–493.

- Hensley, S., Munjy, R., Rosen, P., 2001. Interferometric synthetic aperture radar (IFSAR), Digital elevation model technologies and applications: The DEM users manual, in: American Society for Photogrammetry, and R.S. (Ed.), ASPRS, pp. 174–176.
- Hensley, S., Rosen, P.A., Gurrola, E., 2000. Topographic map generation from the Shuttle Radar Topography Mission C-band SCANSAR interferometry, in: Second International Asia-Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment, and Space. International Society for Optics and Photonics.
- Hodgson, M.E., Jensen, J.R., Schmidt, L., Schill, S., Davis, B., 2003. An evaluation of LIDAR- and IFSAR-derived digital elevation models in leaf-on conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMs. *Remote Sens. Environ.* 84, 295–308.
- Hyde, P., Dubayah, R., Walker, W., Blair, J.B., Hofton, M., Hunsaker, C., 2006. Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy. *Remote Sens. Environ.* 102, 63–73.
- Izzawati, Wallington, E.D., Woodhouse, I.H., 2006. Forest Height Retrieval From Commercial X-Band Products. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 44, 863–870.
- Jensen, J.R., 2005. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. Prentice Hall series in geographic information science.
- Joughin, I., Gray, L., Bindschadler, R., Price, S., Morse, D., Hulbe, C., Mattar, K., Werner, C., 1999. Tributaries of West Antarctic Ice Streams Revealed by RADARSAT Interferometry. *Science* (80-.). 286, 283–286.
- Kellndorfer, J., Walker, W., Pierce, L., Dobson, C., Fites, J.A., Hunsaker, C., Vona, J., Clutter, M., 2004. Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets. *Remote Sens. Environ.* 93, 339–358.
- Kleidon, A., 2012. How does the Earth system generate and maintain thermodynamic disequilibrium and what does it imply for the future of the planet? *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.* 370, 1012–40.
- Lee, J.-S., Hoppel, K.W., Mango, S.A., Miller, A.R., 1994. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 32, 1017–1028.
- Lee, S., Ni-Meister, W., Yang, W., Chen, Q., 2011. Physically based vertical vegetation structure retrieval from ICESat data: Validation using LVIS in White Mountain National Forest, New Hampshire, USA. *Remote Sens. Environ.* 115, 2776–2785.
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Parker, G.G., Harding, D.J., 2002. Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. *Bioscience* 52, 19–30.

- Li, F., Goldstein, R.M., 1990. Studies of multi-baseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars. *IEEE Geosci. Remote Sens.* 28, 88–97.
- Li, J., Chen, W., 2005. A rule-based method for mapping Canada's wetlands using optical, radar and DEM data. *Int. J. Remote Sens.* 26, 5051–5069.
- Lillesand, T., Kiefer, R., Chipman, J., 2008. *Remote sensing and image interpretation*, 6th ed. John Wiley & Sons, New York.
- Madsen, S.N., Zebker, H.A., Martin, J.A.N.M., 1993. Topographic mapping using radar interferometry: Processing techniques. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 31, 246–256.
- Matis, K.G., Tsankov, G., Alexandrov, A., Raev, I., Yossifov, N., Dimitrov, E., Palamarev, E., 1996. Aboveground biomass of *Quercus frainetto* in the University forest at Taxiarchis, Greece, in: *Study, Conservation and Utilisation of Forest Resources. Proceedings of the Second Balkan Scientific Conference.* Sofia, pp. 201–206.
- Means, J.E., Acker, S.A., Fitt, B.J., Renslow, M., Emerson, L., Hendrix, C.J., 2000. Predicting Forest Stand Characteristics with Airborne Scanning Lidar. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 66, 1367–1372.
- Mercer, B., 2004. DEMs Created from Airborne IFSAR – An Update, in: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Proceedings of XXth ISPRS Congress.* Istanbul, Turkey.
- Mercer, B., Zhang, Q., Lumsdon, P., 2007. L-And P-Band Polarimetric InSAR for DEM Extraction Beneath Tropical Canopy Using INDREX-II Data Sets, in: *Proceedings of Advanced SAR Workshop 2007.* pp. 11–13.
- Mikhail, E.M., Bethel, J.S., McGlone, J.C., 2001. *Introduction to Modern Photogrammetry*, 1st ed. John Wiley & Sons, New York.
- Miller, D.R., Quine, C.P., Hadley, W., 2000. An investigation of the potential of digital photogrammetry to provide measurements of forest characteristics and abiotic damage. *For. Ecol. Manage.* 135, 279–288.
- Næsset, E., 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sens. Environ.* 80, 88–99.
- Neeff, T., Dutra, L. V., Santos, J. dos, Freitas, C.C., Araujo, L.S., 2005. Tropical forest measurement by interferometric height modeling and P-band radar backscatter. *For. Sci.* 51, 585–594.
- Paine, D.P., Kiser, J.D., 2003. *Aerial photography and image interpretation.* John Wiley & Sons.

- Rabus, B., Eineder, M., Roth, A., Bamler, R., 2003. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 57, 241–262.
- Ricchetti, E., 2005. Comparison of Satellite Imagery DEMs Produced Using Photogrammetry and Radargrammetry Techniques, in: *Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Ieee*, pp. 2903–2906.
- Sarabandi, K., Lin, Y.-C., 2000. Simulation of interferometric SAR response for characterizing the scattering phase center statistics of forest canopies. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 38, 115–125.
- Schreuder, H.T., 1993. *Sampling methods for multiresource forest inventory.* John Wiley & Sons.
- Shimada, M., 2010. Ortho-Rectification and Slope Correction of SAR Data Using DEM and Its Accuracy Evaluation. *Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sensing, IEEE J.* 3, 657–671.
- Shupe, S.M., Marsh, S.E., 2004. Cover- and density-based vegetation classifications of the Sonoran Desert using Landsat TM and ERS-1 SAR imagery. *Remote Sens. Environ.* 93, 131–149.
- Sjöberg, L., 2011. Quality Estimates in Geoid Computation by EGM08. *J. Geod. Sci.* 1, 361–366.
- Walker, W.S., Kelndorfer, J.M., Pierce, L.E., 2007. Quality assessment of SRTM C- and X-band interferometric data: Implications for the retrieval of vegetation canopy height. *Remote Sens. Environ.* 106, 428–448.
- Wallington, E.D., Izzawati, Woodhouse, I.H., 2004. Forest Height Estimation from X-band SAR, in: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS'04. Proceedings. 2004 IEEE International.* Vol. 4. pp. 2393–2396.
- Wang, Y., Mercer, B., Tao, V.C., Sharma, J., Crawford, S., 2001. Automatic generation of bald earth digital elevation models from digital surface models created using airborne IFSAR, in: *Proceedings of 2001 ASPRS Annual Conference.* pp. 23–27.
- Wegmuller, U.R.S., Werner, Charles, L., 1995. SAR interferometric signatures of forest. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 33, 1153–1161.
- Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T., Wiesmann, A., 2003. Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping, in: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International.* Vol. 7. pp. 3–5.
- West, P.W., 2009. *Tree and Forest Measurement.* Springer, Berlin, Heidelberg.

- Williams, M.L., Silman, M., Saatchi, S.S., Hensley, S., Sanford, M., Yohannan, A., Kofman, B., Reis, J.J., Kampes, B.M., 2010. Analysis of geosar dual-band InSAR data for peruvian forest, in: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International. IEEE. pp. 1398–1401.
- Wing, M. g., Solmie, D., Kellogg, L., 2004. Comparing digital range finders for forestry applications. *J. For.* 102, 16–20.
- Woodhouse, I.H., Izzawati, Wallington, E.D., Turner, D., 2006. Edge Effects on Tree Height Retrieval Using X-Band Interferometry. *Geosci. Remote Sens. Lett.* 3, 344–348.
- Yu, J.H., Ge, L., 2010. Digital Elevation Model generation using ascending and Descending multi-baseline ALOS / PALSAR radar images, in: FIG Congress. pp. 11–16.
- Zebker, H.A., Goldstein, R.M., 1986. Topographic Mapping From Interferometric Synthetic Aperture Radar observations. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 91, 4993–4999.
- Zebker, H.A., Villasenor, J., 1992. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 30, 950–959.
- Zhang, Q., Mercer, J.B., Cloude, S.R., 2008. Forest height estimation from indrex-II L-Band Polarimetric InSAR data, in: Proceedings of the ISPRS XXIth Congress. pp. 3–11.