



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑΣ ΚΑΙ  
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΔΑΣΙΚΩΝ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ  
ΕΙΚΟΝΩΝ ΡΑΝΤΑΡ**

**Φοιτητής: Γεωργιάδης Θ. Στέφανος**

**Επιβλέπων: Κων/νος Παράκης Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας**

**ΒΟΛΟΣ**

**ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2021**

## Δήλωση

Βεβαιώνω ότι η παρούσα εργασία είναι δική μου, δεν έχει συγγραφεί από άλλο πρόσωπο με ή χωρίς αμοιβή, δεν έχει αντιγραφεί από δημοσιευμένη ή αδημοσίευτη εργασία άλλου και δεν έχει προηγουμένως υποβληθεί για βαθμολόγηση στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας ή αλλού. Βεβαιώνω ότι είμαι εν γνώσει των κανόνων περί λογοκλοπής του ΤΜΧΠΠΑ και ότι στο πλαίσιο αυτού έχουν τηρηθεί όλοι οι κανόνες κατά την ακαδημαϊκή δεοντολογία, σχετικά με αναφορές, βιβλιογραφία, κ.λπ., τόσο από έντυπες όσο και από ηλεκτρονικές πηγές. Σε περίπτωση λογοκλοπής αποδέχομαι όλες ανεξαιρέτως τις ποινές που προβλέπουν οι εκάστοτε Κανονισμοί του ΠΘ ή και του ΤΜΧΠΠΑ.

**Ημερομηνία: 18/02/2021**

**Όνοματεπώνυμο: ΓΕΩΡΓΙΑΔΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ**

**Υπογραφή:**

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Τα δάση διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα, απομονώνοντας περισσότερο από το 25% του άνθρακα που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα από την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων και διάφορες αλλαγές στις χρήσεις γης. Έτσι, αυτή η συσσώρευση άνθρακα στα δάση αποτελεί μια αποτελεσματική στρατηγική για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, καθώς και ένας μηχανισμός, τον οποίο μπορούν να εκμεταλλευτούν χώρες, με σκοπό την ανταπόκριση τους στις απαιτήσεις των εκπομπών οξειδίων του άνθρακα, στο πλαίσιο διεθνών πρωτοκόλλων. Οι τεχνικές τηλεπισκόπησης θεωρούνται ως η πιο ελπιδοφόρα προσέγγιση για την παροχή πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση της δασικής κάλυψης και των αποθεμάτων άνθρακα σε διάφορες κλίμακες. Τα συστήματα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος κεραίας, έχοντας μεγάλα μήκη κύματος, έχουν το πλεονέκτημα της ισχυρής ευαισθησίας στην επίγεια δασική βιομάζα, όπως και την ικανότητα ποσοτικοποίησης και παρακολούθησης των αποθεμάτων άνθρακα στην κλίμακα ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Η συγκεκριμένη εργασία αποσκοπεί στην εισαγωγή του θεωρητικού υποβάθρου ενός συστήματος ραντάρ, όπου θα παρουσιάζει τις εφαρμογές που προσφέρει για την εκτίμηση της δασικής βιομάζας, καθώς και διάφορα αποτελέσματα στην περιοχή της Ελασσόνας.

## **BIOMASS ESTIMATION OF FOREST ECOSYSTEMS USING RADAR IMAGES**

### **ABSTRACT**

Forests have a critical role in the global carbon cycle, isolating more than 25% of the carbon emitted into the atmosphere from fossil fuel consumption and various changes in land use. Thus, this accumulation of carbon in forests is an effective strategy to mitigate climate change, as well as a mechanism that countries can exploit to meet the requirements of carbon oxide emissions within the framework of international protocols. Remote sensing techniques are considered to be the most promising approach to provide information on the state of forest cover and carbon reserves at different scales. Synthetic aperture radar systems, having long wavelengths, have the advantage of strong sensitivity to terrestrial forest biomass, as well as the ability to quantify and monitor carbon stocks on the scale of human activities. This work aims to introduce the theoretical background of a radar system, where it will present the applications it offers for the assessment of forest biomass, as well as various results in the area of Ellassona.

**Λέξεις-Κλειδιά:** Δάση, δασική βιομάζα, ραντάρ, τηλεπισκόπηση, άνθρακας, κλιματική αλλαγή

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου προσέφεραν όλα τα χρόνια των σπουδών μου. Τον κ. Ιωάννη Φαρασλή μέλος του ΕΔΠΙ, του ΤΜΧΠΠΑ, για τον χρόνο του και την καθοδήγηση του κατά την συγγραφή της διπλωματικής μου εργασίας. Ακόμη, τον καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Περάκη για την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	6
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	6
1.2 ΣΚΟΠΟΣ .....	6
1.3 ΔΟΜΗ.....	6
<b>2. ΕΙΚΟΝΕΣ SAR ΚΑΙ ΔΑΣΙΚΗ ΒΙΟΜΑΖΑ</b> .....	7
2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ.....	7
2.2 ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΟΛΩΣΗ .....	9
2.3 ΚΗΛΙΔΑ .....	10
2.4 ΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ SENTINEL 1 ΚΑΙ ALOS-2.....	11
2.4.1 SENTINEL 1 ΚΑΙ Η ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ COPERNICUS .....	11
2.4.2 ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ ALOS-2 .....	14
2.5 ΜΕΘΟΔΟΙ SAR ΓΙΑ ΤΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΑΣΙΚΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ .....	16
2.5.1 ΔΙΑΝΟΜΗ ΔΑΣΙΚΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ .....	16
2.5.2 ΔΑΣΙΚΗ ΒΙΟΜΑΖΑ ΚΑΙ ΘΛΕΠΙΣΚΟΠΙΣΗ.....	17
2.5.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΑΣΙΚΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ SAR .....	18
2.5.4 ΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΟΣ PANTAP ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΔΑΣΟΥΣ .....	20
2.5.5 ΒΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ SAR ΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ.....	22
2.5.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ SAR .....	23
2.5.7 ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ SAR.....	23
2.5.8 ΠΟΛΥΜΕΤΡΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ SAR.....	24
2.5.9 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ.....	25
2.5.10 ΓΕΝΙΚΗ ΣΧΕΣΗ PANTAP-ΒΙΟΜΑΖΑΣ.....	26
2.5.11 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ RADAR-BIOMASS .....	27
2.5.12 ΦΥΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ RADAR-BIOMASS.....	28
2.6 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΑΠΟΣΤΟΛΕΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ.....	29
2.6.1 Η ΑΠΟΣΤΟΛΗ GEDI .....	29
2.6.2 Η ΑΠΟΣΤΟΛΗ NISAR.....	30
2.6.3 Η ΑΠΟΣΤΟΛΗ BIOMASS .....	31
<b>3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b> .....	33
3.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	33
3.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....	34
3.2.1 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SENTINEL 1 ΚΑΙ ALOS PALSAR 2 .....	35
3.2.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΣΩ SNAP .....	36
3.2.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ QGIS.....	41

3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	42
3.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ALOS PALSAR 2.....	42
3.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ SENTINEL 1 .....	43
3.3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	47
<b>4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>48</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>50</b>

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Τα δεδομένα ραντάρ αποτελούν ένα ανεξερεύνητο κομμάτι στην επιστήμη της τηλεπισκόπησης, στην Ελλάδα. Αυτό συμβαίνει λόγω του πολύ υψηλού χρηματικού κόστους για την απόκτηση τέτοιων δεδομένων. Βέβαια τα τελευταία χρόνια η πρωτοβουλία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA) και της Ιαπωνικής Αεροδιαστημικής Υπηρεσίας Εξερεύνησης (JAXA), για ανοιχτά δεδομένα μέσω του δορυφόρου ραντάρ Sentinel 1 και του δορυφόρου ραντάρ ALOS PALSAR 2, δίνει την ευκαιρία για εξερεύνηση των δεδομένων ραντάρ, αλλά και για εφαρμογές όπου στο παρελθόν φάνταζαν αρκετά δύσκολες. Μία από αυτές είναι και η χαρτογράφηση και η εκτίμηση της δασικής βιομάζας στην οποία οι τεχνικές τηλεπισκόπησης θεωρούνται ως η πιο ελπιδοφόρα προσέγγιση για την παροχή πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση της δασικής κάλυψης και των αποθεμάτων άνθρακα σε διάφορες κλίμακες. Έτσι, μέσω των τιμών σκέδασης μιας εικόνας ραντάρ μπορούν να πραγματοποιηθούν μελέτες σχετικά με τα αποθέματα άνθρακα και της δασικής βιομάζας παγκοσμίως.

### **1.2 ΣΚΟΠΟΣ**

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι να γίνει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στα συστήματα ραντάρ και ειδικότερα να αναλυθούν οι μέθοδοι χαρτογράφησης και εκτίμησης της δασικής βιομάζας. Στην συνέχεια θα γίνει η εκτίμηση της δασικής βιομάζας στην περιοχή της Ελασσόνας στο ελεύθερο λογισμικό SNAP της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (ESA) και του λογισμικού QGIS, με την χρήση ελεύθερων και ανοιχτών δεδομένων του δορυφόρου Sentinel-1 μέσω της πλατφόρμας Copernicus Hub καθώς και δεδομένων του δορυφόρου ALOS PALSAR 2 της JAXA. Βασικά εργαλεία αυτής της εργασίας αποτελούν η χρήση του ελεύθερου λογισμικού SNAP και τα ελεύθερα δεδομένα SAR από την πλατφόρμα Copernicus Hub και JAXA, τα οποία παρουσιάζουν ένα πιο φιλικό και προσβάσιμο περιβάλλον για τον χρήστη. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτή την εργασία θα πραγματοποιηθεί επεξεργασία τεσσάρων εικόνων ραντάρ (δύο Sentinel 1A και δύο ALOS PALSAR 2) οι οποίες θα εστιάσουν στην περιοχή της Ελασσόνας. Ο τελικός στόχος είναι δημιουργία εικόνας όπου θα εμφανίζονται τα επίπεδα δασικής βιομάζας μέσω του ελεύθερου λογισμικού QGIS .

### **1.3 ΔΟΜΗ**

Η δομή της εργασίας ξεκινάει με το εισαγωγικό κομμάτι, στη συνέχεια θα γίνει πλήρης αναφορά στο θεωρητικό πλαίσιο, δηλαδή θα γίνει μία πλήρης περιγραφή ενός συστήματος ραντάρ με όλες τις παραμέτρους που το αφορούν. Θα αναλυθεί η αποστολή Sentinel 1 της ESA και η αποστολή ALOS PALSAR 2 της JAXA και έπειτα θα γίνει μια εμβάθυνση στις μεθόδους χαρτογράφησης και εκτίμησης της δασικής βιομάζας. Θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην περιοχή μελέτης και στα αποτελέσματα της χαρτογράφησης της δασικής βιομάζας, καθώς και στις αλλαγές που προέκυψαν στο χρονικό εύρος 2015-2018 τα οποία και θα αναλυθούν. Τέλος, θα αναφερθούν τα συμπεράσματα που αφορούν τα συστήματα ραντάρ καθώς και τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου στην περιοχή μελέτης.

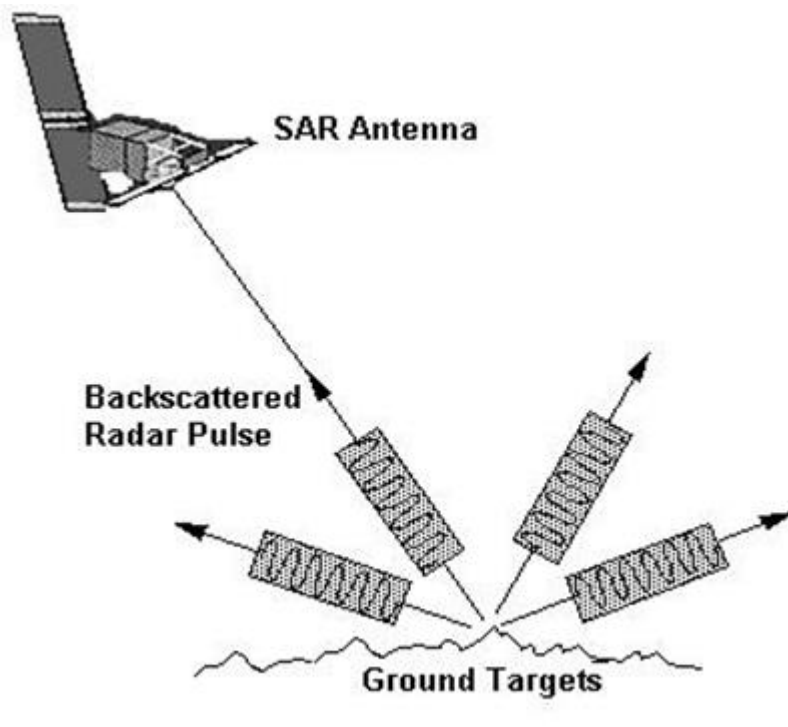
## 2. ΕΙΚΟΝΕΣ SAR ΚΑΙ ΔΑΣΙΚΗ ΒΙΟΜΑΖΑ

### 2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Το SAR (Synthetic Aperture Radar) είναι ένα σύστημα φωτισμού που βασίζεται στην ακτινοβολία μικροκυμάτων. Μια κεραία, που είναι τοποθετημένη πάνω σε μια πλατφόρμα, μεταδίδει ένα σήμα ραντάρ σε μια κατεύθυνση προς την επιφάνεια της γης. Ως ένας ενεργός αισθητήρας που εκπέμπει μεγάλα μήκη κύματος, έχει το πλεονέκτημα ότι λειτουργεί και καταγράφει μέρα και νύχτα χωρίς να επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Λόγω της ικανότητας του να καταγράφει την γεωμετρική δομή των δασών περισσότερο από τους παθητικούς οπτικούς αισθητήρες, καθίσταται ως ένα πολύτιμο εργαλείο για τη χαρτογράφηση της δασικής βιομάζας πάνω από το έδαφος (AGB). Το ανακλώμενο σήμα διασκορπίζεται από την επιφάνεια και λαμβάνεται ένα κλάσμα του δευτερολέπτου αργότερα στην ίδια κεραία (μονοστατικό ραντάρ). Για συνεκτικά συστήματα ραντάρ, όπως το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR), το εύρος και η φάση της λαμβανόμενης ηχώ καταγράφονται. Το σύστημα εκμεταλλευόμενο το φαινόμενο Doppler και την κίνηση του δορυφόρου έχει την ικανότητα να συνθέτει μια πολύ μεγάλη εικονική κεραία. Σε αντίθεση με τους οπτικούς αισθητήρες, τα συστήματα απεικόνισης SAR μεταδίδουν και δέχονται ακτινοβολία από γωνία και δεξιά κατά μήκος της κατεύθυνσης της δορυφορικής πλατφόρμας. Αυτός ο τρόπος λήψης εικόνων επιτρέπει δύο διαφορετικές γεωμετρικές προβολές (LOS), (α) την αύξουσα, όταν ο δορυφόρος μετακινείται από το νότο στο βορρά (ascending) και (β) την φθίνουσα, όταν ο δορυφόρος μετακινείται από βορρά προς νότο (descending). Η κλίση της κεραίας σε σχέση με το nadir ονομάζεται γωνία πρόσπτωσης και στα περισσότερα συστήματα SAR κυμαίνεται από 20 ° έως 50 °. Η διεύθυνση της απόστασης (range) είναι κάθετη στη διεύθυνση τροχιάς (A) της πλατφόρμας, ενώ η διεύθυνση του αζιμούθιου (azimuth) είναι παράλληλη σε αυτήν. Η γεωμετρία της πλάγιας εικονοληψίας είναι χαρακτηριστική για όλα τα συστήματα SAR. Το τμήμα της εικόνας που βρίσκεται κοντά στο nadir ονομάζεται «εγγύς περιοχή» (near range) ενώ το μακρύτερο τμήμα ονομάζεται «άπω περιοχή» (far range).

Μια απεικόνιση Radar αποτελείται από μία εικόνα στην οποία η ισχύς του σήματος που επανασκεδάζεται (backscatter) από ένα αντικείμενο καθορίζει το ψηφιακό αριθμό (DN) για κάθε κυψελίδα. Η ισχύς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες μεταξύ των οποίων είναι οι παράμετροι παρατήρησης (όπως μήκος κύματος, συχνότητα, πόλωση, προσπίπτουσα γωνία του εκπεμπόμενου κύματος) και οι επιφανειακές παράμετροι (όπως ανάγλυφο-τραχύτητα, γεωμετρικό σχήμα και διηλεκτρικές ιδιότητες των αντικειμένων). Επιπλέον, ανάλογα με το μήκος κύματος η ακτινοβολία διεισδύει στο επιφανειακό υλικό σε διάφορα βάθη. (Παρχαρίδης, 2015)





Εικόνα 2.1 Λειτουργία συστήματος SAR([crisp.nus.edu.sg](http://crisp.nus.edu.sg))

Οι τιμές εύρους εξαρτώνται από τον προσανατολισμό, την τραχύτητα, το μέγεθος και τις διηλεκτρικές ιδιότητες (π.χ. νερό έναντι ξηρής βλάστησης) των διασκορπιστών στην επιφάνεια της γης. Φυσικά, οι αστικές περιοχές και τα βραχώδη περιβάλλοντα παρουσιάζουν έντονα πλάτη, ενώ οι ομαλές επίπεδες επιφάνειες, όπως το ήρεμο νερό, υποδηλώνουν χαμηλές τιμές πλάτους, καθώς η ακτινοβολία αντικατοπτρίζεται κυρίως από το ραντάρ. Τα εργαλεία SAR είναι συνεκτικά συστήματα τα οποία μπορούν να καταγράψουν όχι μόνο το εύρος αλλά και τη φάση ενός καταγεγραμμένου σήματος. Η τιμή φάσης είναι η μέτρηση του χρόνου της ηχώ που μεταδίδεται από μια κεραία ραντάρ και χρειάζεται να φτάσει στα αντικείμενα εδάφους και στη συνέχεια να επιστρέψει στο ραντάρ. Η φάση είναι το κλειδί που μπορεί να παρατηρηθεί σε όλες τις τεχνικές συμβολομετρίας SAR (Ferretti 2007). Επιπλέον, τα όργανα ραντάρ μπορούν να σχεδιαστούν για να μεταδίδουν και να λαμβάνουν κύματα σε διαφορετικούς προσανατολισμούς του ηλεκτρικού πεδίου. Μεταβάλλοντας την πόλωση ενός μεταδιδόμενου σήματος, είναι δυνατόν να ληφθούν πληροφορίες σχετικά με τις πολωσιμετρικές ιδιότητες των παρατηρούμενων επιφανειών. Συχνά, τα συστήματα SAR είναι μονοπολικά, πράγμα που σημαίνει ότι μεταδίδουν είτε οριζόντια είτε κατακόρυφα πολωμένα κύματα και λαμβάνουν τα ίδια (HH ή VV).

Παρόλα αυτά, υπάρχουν συστήματα SAR που μπορούν να είναι πλήρως πολωσιμετρικά και να λειτουργούν με όλους τους τρόπους πόλωσης: HH, VV, HV, VH. Αναπόφευκτα, λόγω της διαμόρφωσης της γωνίας θέασης της επιφάνειας της γης, θα υπάρχουν αρκετές γεωμετρικές στρεβλώσεις στις εικόνες SAR οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε παρερμηνείες του εδάφους. Επομένως, είναι σημαντικό να εξηγηθεί πώς συμβαίνουν αυτά τα σφάλματα και πώς επηρεάζουν τα αντικείμενα που απεικονίζονται στις εικόνες. Τέτοια προβλήματα είναι:

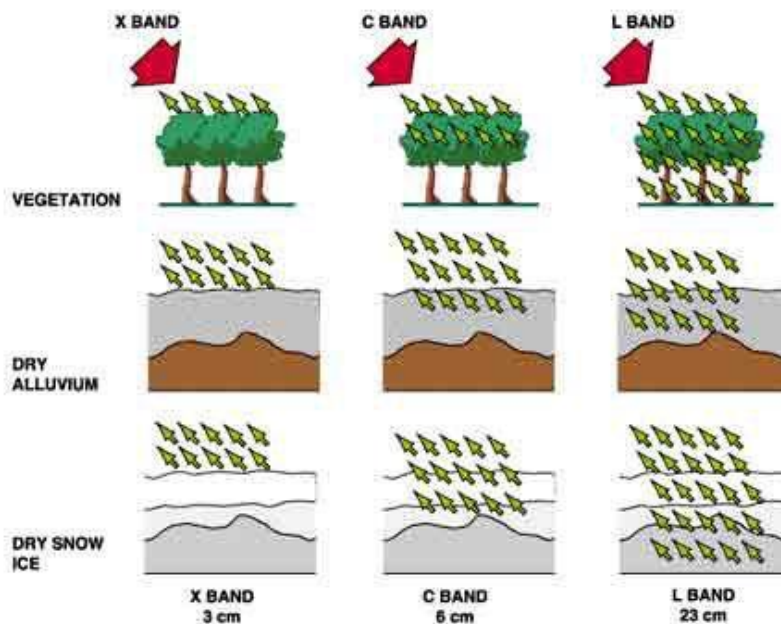
- Foreshortening: Αυτή η επίδραση προκαλεί τη συμπίεση της εικόνας που έχει ως αποτέλεσμα την εσφαλμένη αναπαράσταση μήκους επιφάνειας.
- Layover: αυτή η παραμόρφωση συμβαίνει όταν το σήμα ραντάρ φτάσει στην κορυφή ενός βουνού προτού φτάσει στη βάση, πράγμα που σημαίνει ότι το σήμα από την κορυφή θα επιστρέψει στην κεραία ραντάρ νωρίτερα από εκείνη από τη βάση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αναστροφή της επιφάνειας των ορεινών περιοχών.
- Shadow: Η σκιά ραντάρ παρουσιάζεται όταν η δέσμη ραντάρ δεν είναι σε θέση να φωτίσει τμήματα της επιφάνειας του εδάφους λόγω των υψηλών γωνιών του. Αυτό το φαινόμενο προκαλεί την εμφάνιση κατακόρυφων χαρακτηριστικών ή λόφους στο έδαφος στο σκοτάδι σε εικόνες ραντάρ, καθώς δεν υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια για την επανασύνδεση.

## 2.2 ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΟΛΩΣΗ

Τα ραδιοκύματα αποτελούν το μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που έχουν μήκη κύματος πολύ μεγαλύτερα από το ορατό φως (επίπεδο εκατοστών). Η διείσδυση (penetration) είναι ο συντελεστής κλειδί για την επιλογή του μήκους κύματος, διότι όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος (μικρότερη συχνότητα), τόσο ισχυρότερη είναι η διείσδυση στη βλάστηση και το έδαφος.

Τα βασικά μήκη κύματος που χρησιμοποιούν οι δορυφόροι ραντάρ είναι τα εξής:

- P-band = ~ 65 cm AIRSAR
- L-band = ~ 23 cm JERS-1 SAR, ALOS PALSAR
- S-band = ~ 10 cm Almaz-1
- C-band = ~ 5 cm Sentinel-1, ERS-1/2 SAR, RADARSAT-1/2, ENVISAT ASAR, RISAT-1
- X-band = ~ 3 cm TerraSAR-X-1, COSMO-SkyMed
- K-band = ~ 1.2 cm Στον τομέα του στρατού



Εικόνα 2.2 Διείσδυση ακτινοβολίας με βάση το μήκος κύματος(ESA)

Ανεξάρτητα από το μήκος κύματος, τα ραντάρ μπορούν να μεταδίδουν οριζόντια (H) ή κάθετα (V) σήματα ηλεκτρικού πεδίου και να λαμβάνουν είτε οριζόντια (H) είτε κάθετα (V) σήματα επιστροφής ή και τα δύο. Οι φυσικές διεργασίες που είναι υπεύθυνες για την επιστροφή παρόμοιας πόλωσης (HH ή VV) είναι σχεδόν ορατές από την αντανάκλαση του εδάφους. Για παράδειγμα, το νερό χωρίς κύματα εμφανίζεται μαύρο. Η διπολική (HV ή VH) επιστροφή είναι συνήθως ασθενέστερη και συχνά σχετίζεται με διαφορετικές ανακλάσεις, π.χ. λόγω της τραχύτητας του εδάφους.

Οι εικόνες SAR αντιπροσωπεύουν μια εκτίμηση της επανασκέδασης (backscatter) σε μια συγκεκριμένη περιοχή του εδάφους. Περιοχές με σκούρο χρώμα αντιπροσωπεύουν χαμηλά επίπεδα επανασκέδασης, ενώ οι φωτεινότερες περιοχές υψηλά επίπεδα επανασκέδασης. Αυτά τα φωτεινά χαρακτηριστικά σημαίνουν ότι ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας ανακλάται πίσω στο ραντάρ, εν αντιθέσει με τα σκούρα χαρακτηριστικά που υπονοούν ότι η ανάκλαση είναι πολύ μικρή. Η επανασκέδαση μιας περιοχής σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος θα διαφέρει για μια ποικιλία συνθηκών, όπως το περιεχόμενο υγρασίας, με υγρά αντικείμενα να φαίνονται φωτεινά και τα ξηρότερα να εμφανίζονται μαύρα. Το μήκος κύματος, η πόλωση των SAR, καθώς και οι γωνίες παρατήρησης επηρεάζουν επίσης την επανασκέδαση (backscatter).

Ένας χρήσιμος κανόνας στην ανάλυση εικόνων ραντάρ είναι ότι όσο μεγαλύτερη είναι η επανασκέδαση στην εικόνα, τόσο πιο δύσκολη είναι και η απεικόνιση της επιφάνειας. Επίπεδες επιφάνειες που αντανακλούν λίγο ή και καθόλου μικροκύματα πίσω στο ραντάρ θα εμφανίζονται πάντα μαύρες στις εικόνες. Η βλάστηση είναι συνήθως τραχιά στην κλίμακα των περισσότερων μηκών κύματος και εμφανίζεται ως γκρι ή ανοιχτό γκρι σε εικόνα ραντάρ.

### 2.3 ΚΗΛΙΔΑ

Η κηλίδα αναφέρεται ως ένα χαρακτηριστικό θορύβου το οποίο, παράγεται από συνεκτικά συστήματα όπως το SAR και τα συστήματα λείζερ. Εμφανίζεται ως τυχαία δομή στα πίξελ και προκαλείται από την παρεμβολή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που είναι διάσπαρτα από επιφάνειες ή αντικείμενα. Κατά την μετατροπή δεδομένων SAR σε πραγματικές εικόνες εφαρμόζεται πολλαπλή επεξεργασία (non-coherent averaging). Ο θόρυβος που υπάρχει στα δεδομένα μπορεί να μειωθεί περαιτέρω μέσω τεχνικών αποκατάστασης εικόνας (speckle filtering). Το πρώτο βήμα σε αυτήν την διαδικασία είναι ο έλεγχος της πλήρους ανάπτυξης της κηλίδας στην γειτονιά του εικονοστοιχείου που εξετάζεται. Σε αυτήν την περίπτωση η εκτίμηση της ανακλαστικότητας του ραντάρ πραγματοποιείται με την παρατηρούμενη ένταση, που βασίζεται σε ορισμένα τοπικά στατιστικά δεδομένα και στην μερική επίγνωση της περιοχής. Η καλή αφαίρεση κηλίδων απαιτεί χρήση μεγάλων παράθυρων επεξεργασίας. Σε εικόνες υψηλής ανάλυσης η κηλίδα μπορεί να αναπτυχθεί εν μέρει σε διάφορες περιοχές όπως για παράδειγμα αστικές. Επομένως, το speckle filtering είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ της αφαίρεσης κηλίδων-στιγμάτων (ραδιομετρική ανάλυση) και την διατήρηση λεπτών λεπτομερειών (χωρική ανάλυση). Τα προσαρμοστικά φίλτρα που βασίζονται στα κατάλληλα μοντέλα σκηνης και κηλίδας είναι τα πιο κατάλληλα για εικόνες SAR υψηλής χωρικής ανάλυσης, όταν η κηλίδα δεν είναι πάντα πλήρως ανεπτυγμένη. Γενικά τα φίλτρα αυτά είναι όλα προσαρμοστικά ως συνάρτηση του τοπικού συντελεστή διακύμανσης και καθορίζουν μια ελάχιστη τιμή για την καλύτερη εξομάλυνση των κηλίδων και την διατήρηση της υφής ή του στόχου σημείου.

## 2.4 ΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ SENTINEL 1 ΚΑΙ ALOS-2

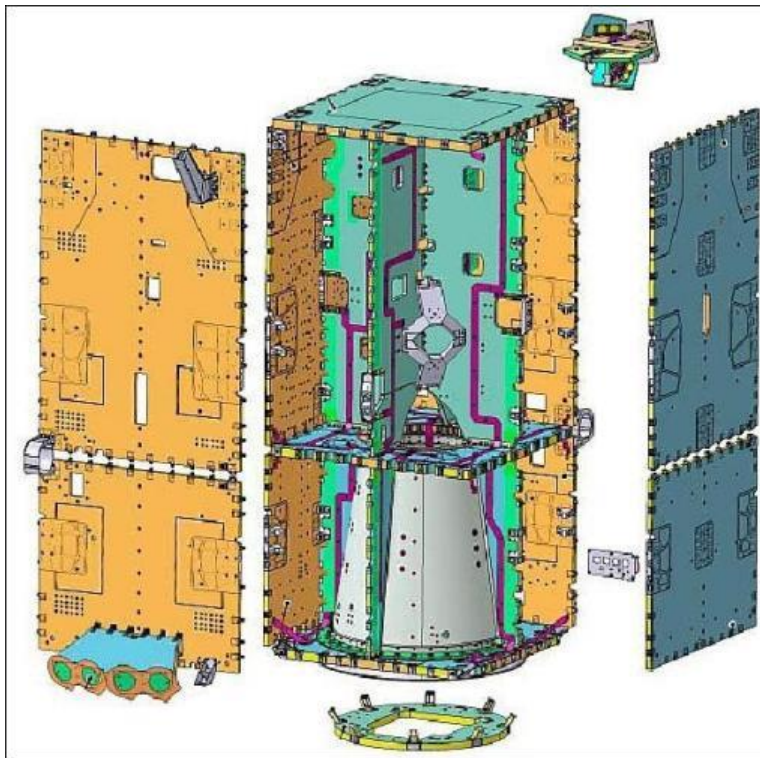
### 2.4.1 SENTINEL 1 ΚΑΙ Η ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ COPERNICUS

Ο δορυφόρος Sentinel-1 (το Ευρωπαϊκό παρατηρητήριο ραντάρ), κυκλοφόρησε το 2011, το οποίο αντιπροσωπεύει το νέο διαστημικό σκέλος της δορυφορικής οικογένειας GMES (Global Monitoring for Environment and Security) σχεδιασμένο και ανεπτυγμένο από την ESA και χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Το GMES αντιπροσωπεύει την ευρωπαϊκή απάντηση στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις του περιβαλλοντικού ελέγχου και, ως εκ τούτου, συμβάλλει σημαντικά στις περιβαλλοντικές πολιτικές σε παγκόσμιο επίπεδο.

Οι αποστολές του Copernicus (Sentinel-1, -2 και -3) αντιπροσωπεύουν την συνεισφορά της Ευρωπαϊκής Ένωσης GEOSS (Global Earth Observation System of Systems). Ο Sentinel-1 αποτελείται από έναν αστερισμό δύο δορυφόρων τον Sentinel-1A και τον Sentinel-1B οι οποίοι μοιράζονται το ίδιο τροχιακό επίπεδο με διαφορά οριζόντιας τροχιακής φάσης 180 μοιρών. Αυτή η αποστολή παρέχει μια ανεξάρτητη επιχειρησιακή ικανότητα για συνεχή χαρτογράφηση της γης με ραντάρ με βελτιωμένη συχνότητα και κάλυψη ιδανική για υπηρεσίες και εφαρμογές που απαιτούν μεγάλες χρονικές σειρές.

Η Thales Alenia Space Italy είναι υπεύθυνη για το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την ολοκλήρωση του δορυφόρου που φέρει ένα ραντάρ συνθετικής διάταξης (SAR) της ζώνης C. Το ραντάρ βασίζεται στις βασικές τεχνολογίες του Thales Alenia Space, όπως είναι οι μονάδες μετάδοσης-λήψης μέσα στην ενεργή κεραία.

Βασισμένο σε μια πλατφόρμα Prima που αναπτύχθηκε από τον Thales Alenia Space για την ιταλική διαστημική υπηρεσία, το Sentinel-1 θα ζυγίζει 2.280 χιλιόγραμμα κατά την εκτόξευση και θα κοιτάξει τη Γη σε αποβάθρες μέχρι 700 χιλιόμετρα με ανάλυση εδάφους μεταξύ 5 και 25 μέτρων σύμφωνα με την επιλεγμένη λειτουργία.

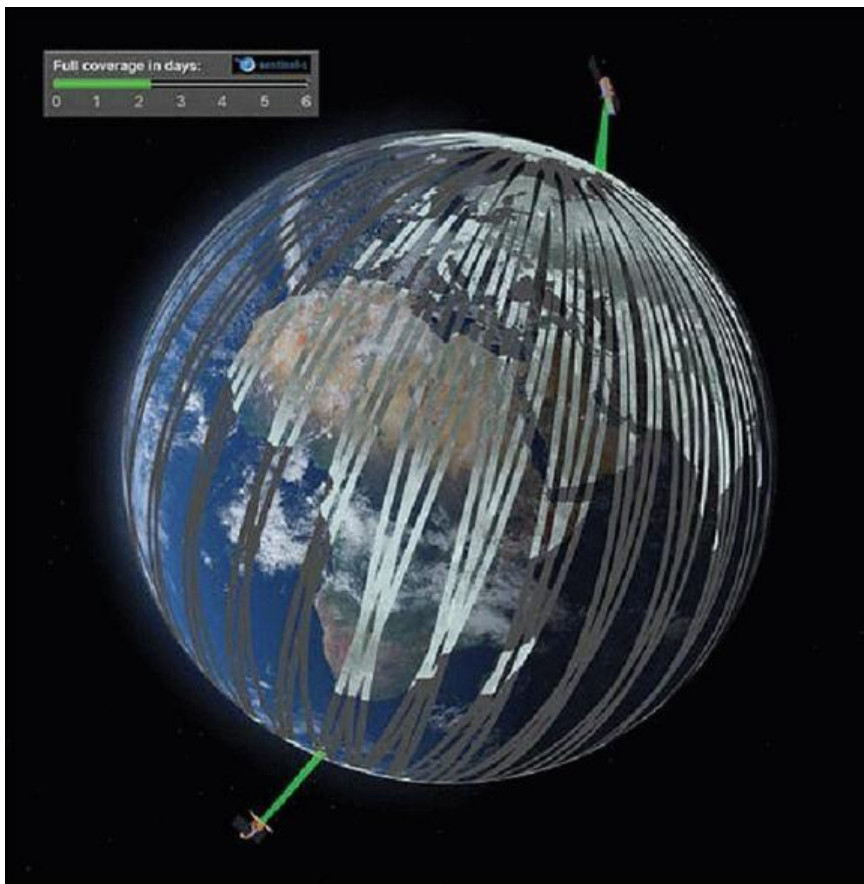


Εικόνα 2.3 Τρισδιάστατη απεικόνιση της πλατφόρμας Sentinel-1, (ESA)

Ο γενικός στόχος της αποστολής Sentinel-1 είναι να εξασφαλίσει την συνέχεια των επιχειρησιακών εφαρμογών και υπηρεσιών SAR της ζώνης C στην Ευρώπη με ιδιαίτερη σημασία να δίνεται στις υπηρεσίες που εντάσσονται στο πρόγραμμα GSE (GMES Service Element) της ESA μετά τη συνταξιοδότηση του ERS-2 και το τέλος της αποστολής Envisat. Η αποστολή του Sentinel-1 αναμένεται να επιτρέψει την ανάπτυξη νέων εφαρμογών και να ανταποκριθεί στις εξελισσόμενες ανάγκες της GMES όπως στον τομέα της κλιματικής αλλαγής και της σχετικής παρακολούθησης (associated monitoring).

Για να επιτευχθεί αυτό, οι δορυφόροι φέρουν έναν αισθητήρα C-SAR, ο οποίος προσφέρει απεικόνιση μέσης και υψηλής ανάλυσης σε όλες τις καιρικές συνθήκες. Το C-SAR είναι σε θέση να αποκτήσει νυχτερινές εικόνες και να εντοπίσει μικρή κίνηση στο έδαφος, γεγονός που το καθιστά χρήσιμο για την παρακολούθηση της ξηράς και της θάλασσας.

Ένας δορυφόρος SENTINEL-1 θα μπορεί να αντιστοιχεί σε ολόκληρο τον κόσμο μία φορά κάθε 12 ημέρες. Ο δορυφόρος δύο δορυφόρων προσφέρει έναν ακριβή κύκλο επανάληψης 6 ημερών. Ο αστερισμός θα έχει επαναλαμβανόμενη συχνότητα (αύξουσα / φθίνουσα) 3 ημερών στον ισημερινό, λιγότερο από 1 ημέρα στην Αρκτική και αναμένεται να παρέχει κάλυψη σε όλη την Ευρώπη, τον Καναδά και τις κύριες διαδρομές αποστολής σε 1-3 ημέρες, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες. Τα δεδομένα ραντάρ παραδίδονται στις υπηρεσίες του Copernicus εντός μίας ώρας από την απόκτηση τους.



Εικόνα 2.4 Η κάλυψη της γης με την χρήση και των δύο δορυφόρων Sentinel-1 A,B σε ταυτόχρονη τροχιά, (ESA)

Τον Δεκέμβριο του 2009, η ESA υπέγραψε σύμβαση για το διπλό δεύτερο διαστημικό σκάφος Sentinel-1B το οποίο κυκλοφόρησε το 2016. Τον Δεκέμβριο του 2015 υπογράφηκε σύμβαση για δύο ακόμη δορυφόρους Sentinel 1C και 1D. Αυτά θα ξεκινήσουν από το 2021 και μετά.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (EC) ξεκίνησε μια πρωτοβουλία για την ανάπτυξη υπηρεσιών Copernicus Data and Information Access Services (DIAS) που διευκολύνουν την πρόσβαση στα δεδομένα και τις πληροφορίες του Copernicus από τις υπηρεσίες του Copernicus. Παρέχοντας πρόσβαση σε δεδομένα και πληροφορίες παράλληλα με τους πόρους επεξεργασίας, τα εργαλεία και άλλα σχετικά δεδομένα. Η πρωτοβουλία αυτή αναμένεται να ενισχύσει την αφομοίωση των χρηστών, να τονώσει την καινοτομία και να δημιουργήσει νέα επιχειρηματικά μοντέλα βασισμένα στα δεδομένα και τις πληροφορίες της Γης.

Το Copernicus είναι ένα διαστημικό πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Μέσω των υπηρεσιών του προσφέρει πλήρη, ελεύθερη και ανοιχτή πρόσβαση σε δεδομένα, μοντέλα και προβλέψεις σχετικά με την παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Κάνει επίσης τα δορυφορικά δεδομένα από τον αστερισμό Sentinel διαθέσιμα σε ελεύθερη πλήρη και ανοιχτή βάση. Το Copernicus είναι ένα επιχειρησιακό πρόγραμμα το οποίο πέρα από τα οφέλη του για το περιβάλλον παρέχει επίσης σημαντική συμβολή στις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης και ασφάλειας στην Ευρώπη.

Όταν όλοι οι δορυφόροι Sentinel λειτουργούν (Sentinel-1A και 1B, Sentinel-2A και Sentinel-3A είναι κατά τη στιγμή της γραφής), θα παράγει περισσότερα από 10 petabytes δεδομένων κάθε χρόνο. Οι πληροφορίες από τις υπηρεσίες του Copernicus, που προέρχονται από τα Sentinel, άλλα δορυφορικά δεδομένα καθώς και πληροφορίες από την επί τόπου συνιστώσα του Copernicus, προσθέτουν στη συνολική ποσότητα των γεωχωρικών δεδομένων που δημιουργούνται ή διατίθενται από το πρόγραμμα Copernicus. Αυτό καθιστά τον Copernicus τον τρίτο μεγαλύτερο πάροχο δεδομένων στον κόσμο, δημιουργώντας μεγάλες ευκαιρίες, αλλά και παρουσιάζοντας μεγάλες προκλήσεις. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει φιλόδοξα σχέδια για να αντιμετωπίσει αυτές τις προκλήσεις σε ένα μεγάλο περιβάλλον με δεδομένα και για το σκοπό αυτό αποφάσισε να δρομολογήσει την υπηρεσία Copernicus DIAS - Υπηρεσίες πρόσβασης δεδομένων και πληροφοριών. Το DIAS θα ξεκινήσει την ανάπτυξη μιας ευρωπαϊκής υπηρεσίας πρόσβασης δεδομένων και επεξεργασίας cloud, που θα είναι ανοιχτή για τους επιχειρηματίες, τους προγραμματιστές και το ευρύ κοινό για την οικοδόμηση και εκμετάλλευση των υπηρεσιών που βασίζονται στο Copernicus.)

Τα δορυφορικά δεδομένα Sentinel διανέμονται από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA) και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό για την Εκμετάλλευση Μετεωρολογικών Δορυφόρων (EUMETSAT). Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί πρόσβασης στα δεδομένα Sentinel, προσαρμοσμένοι στο σκοπό για τον οποίο θα χρησιμοποιηθούν. Τόσο η ESA όσο και η EUMETSAT χρησιμοποιούν κόμβους πρόσβασης δεδομένων για ανοιχτή πρόσβαση στα δεδομένα Sentinel. Επιπλέον, η EUMETSAT λειτουργεί το EUMETCAST, υπηρεσία που αποστέλλει συστηματικά δορυφορικά δεδομένα και άλλες πληροφορίες στους εγγεγραμμένους χρήστες είτε μέσω επίγειων γραμμών δεδομένων είτε μέσω περιοχών δορυφορικής σύνδεσης για περιοχές του κόσμου με περιορισμένη σύνδεση στο διαδίκτυο (ESA).

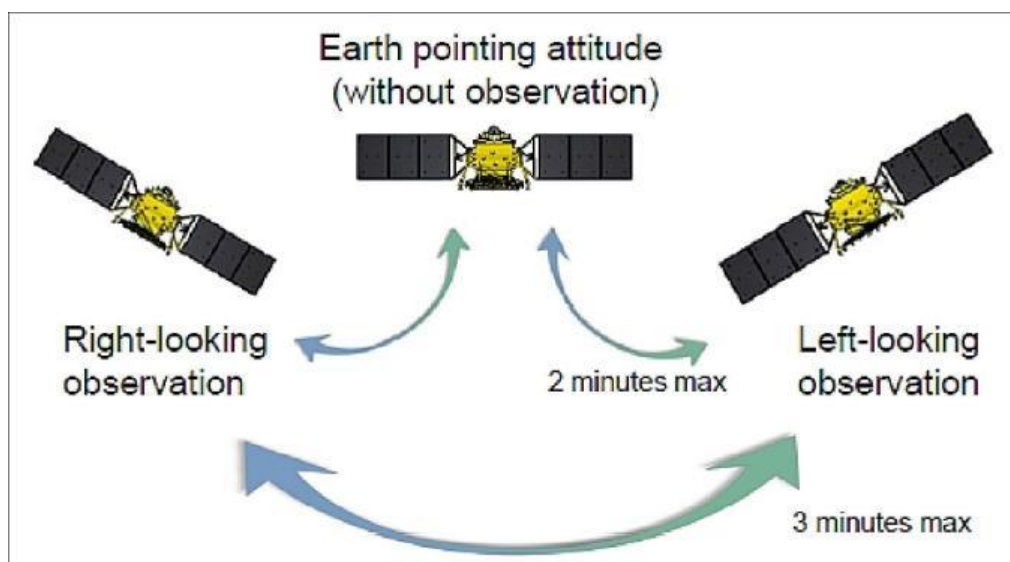
#### 2.4.2 ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ ALOS-2

Ο δορυφόρος ALOS-2 είναι η συνέχεια της δορυφορικής αποστολής JAXA ALOS (DAICHI) που έχει εγκριθεί από την ιαπωνική κυβέρνηση στα τέλη του 2008. Ο γενικός στόχος της αποστολής αυτής ήταν η παροχή συνεχόμενων δεδομένων τα οποία θα χρησιμοποιούνταν για την χαρτογραφία, την παρατήρηση των περιφερειών, την παρακολούθηση καταστροφών και περιβάλλοντος.

Το 2010, ο ALOS βρίσκεται ήδη σε λειτουργία περισσότερα από τέσσερα χρόνια από τον Ιανουάριο του 2006 έχοντας τους εξής στόχους:

- Χαρτογραφία
- Παρακολούθηση καταστροφών
- Παρατήρηση Περιφερειών
- Έρευνα πόρων

Το ALOS-2 θα συνεχίσει τις παρατηρήσεις SAR της ζώνης L του ALOS PALSAR (Phases Array L-band Synthetic Aperture Radar) και θα επεκτείνει τη χρήση δεδομένων βελτιώνοντας την απόδοσή του. Η Ιαπωνία είναι μια επιρρεπής σε σεισμούς και ηφαιστειακή χώρα όπου τα δύο τρίτα της χερσαίας έκτασης της καλύπτονται από δασοκομία. Το σύστημα συνθετικού ανοίγματος κεραίας (SAR) L ζώνης, το οποίο βρισκόταν πάνω στους δύο προηγούμενους δορυφόρους, συγκεκριμένα το FUYO-1 (JERS-1) μεταξύ 1992 και 1998 και DAICHI (ALOS) μεταξύ 2006 και 2011, είναι ένας αισθητήρας που χρησιμοποιεί ένα ραδιοκύμα, και επιτρέπει την παρατήρηση των συνθηκών της επιφάνειας της γης ακόμα και κατά τη διάρκεια της νύχτας και όταν ο καιρός είναι κακός. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του ραδιοκυμάτων L-band (του οποίου το μήκος κύματος είναι περίπου 24 cm) είναι η ικανότητα συλλογής πληροφοριών από την επιφάνεια του εδάφους διεισδύοντας στη βλάστηση όπως τα δάση (σε ορισμένο βαθμό), έτσι μπορεί να αποκτήσει αλλαγές στη γη ακριβέστερα σε σύγκριση με SAR που χρησιμοποιούν κάποια άλλη ζώνη, όταν συμβαίνει κάποιος διατροφισμός λόγω σεισμού ή ηφαιστειακής δραστηριότητας.



Εικόνα 2.5 Υπόδειξη τρόπου σάρωσης(JAXA)

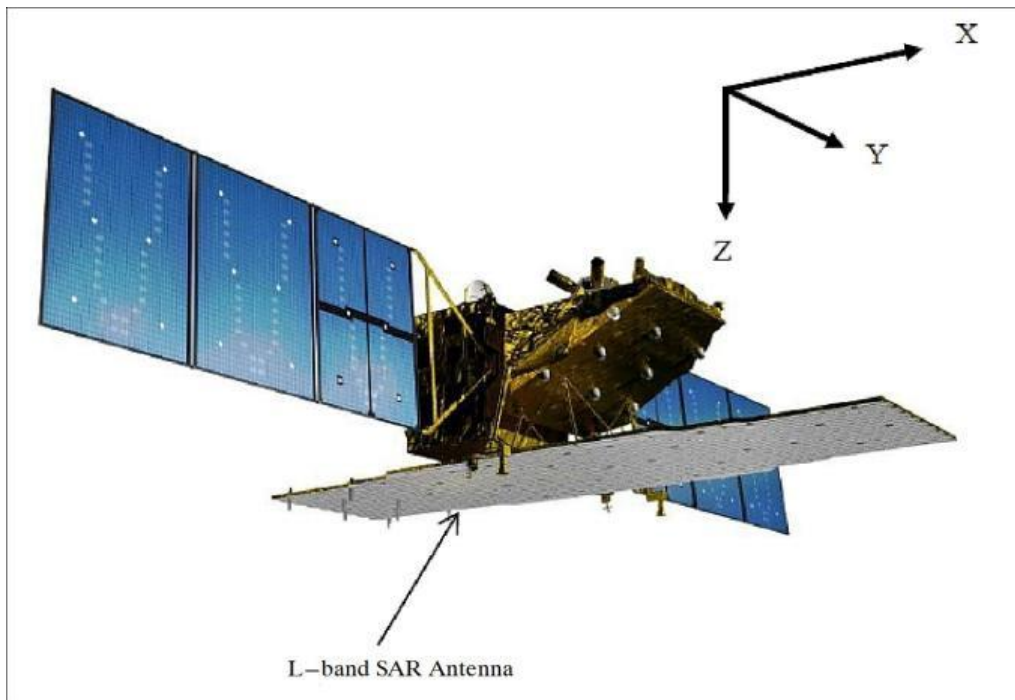
Το σύστημα ALOS-2 αναπτύχθηκε από τη Mitsubishi Electric Corporation με σύμβαση με την JAXA (Japan Aerospace and Exploration Agency). Το ALOS-2 είναι εξοπλισμένο με διαστημικούς δέκτες GPS διπλής συχνότητας που χρησιμοποιούν ζώνες L1 και L2 και

παρουσιάζει ακριβή πλοήγηση σε τροχιά. Ωστόσο, για να επιτευχθεί παρατήρηση υψηλότερης ανάλυσης και πιο ακριβής ελιγμός τροχιάς για τους επόμενους δορυφόρους γεωσκόπησης, ήταν απαραίτητος ένας προηγμένος δέκτης GPS. Η ομάδα καθοδήγησης και ελέγχου JAXA διεξάγει μια σειρά μελετών για έναν διαστημικό δέκτη GPS επόμενης γενιάς. Σε αυτήν την εξέλιξη, η ενίσχυση της ακρίβειας πλοήγησης είναι ένα σημαντικό θέμα και ο νέος δέκτης θα ενισχυθεί με τη δυνατότητα λήψης πολλαπλών συχνοτήτων και πολλαπλών καναλιών για να συναντηθεί με τον εκσυγχρονισμό GPS.

Το ALOS-2 (Daichi-2) κυκλοφόρησε στις 24 Μαΐου 2014 (03:05 UTC) με ένα όχημα H-IIA F24 (No 24) από το Yoshinobu Launch Complex στο TNSC (Tanegashima Space Center), στην Ιαπωνία. Ο πάροχος εκτόξευσης ήταν η MHI (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.) και σε περίπου 15 λεπτά και 47 δευτερόλεπτα μετά την απογείωση, επιβεβαιώθηκε ο διαχωρισμός του DAICHI-2.

Τροχιά: Σύγχρονη σχεδόν κυκλική επαναλαμβανόμενη τροχιά, υψόμετρο = 628 km, κλίση = 97.9°, περίοδος = 97.4 λεπτά, χρόνος επίσκεψης = 14 ημέρες, αριθμός τροχιών / ημέρα = 15 3/14, LSDN (τοπική ώρα Κυρ σε φθίνουσα κόμβο) = 12:00 ώρες ± 15 λεπτά

Το PALSAR-2 είναι ένα όργανο SAR L-band βασισμένο στην τεχνολογία APAA (Active Phased Array Antenna). Το APAA του ALOS-2 επιτρέπει όχι μόνο συμβατικό stripmap και ScanSAR, αλλά και παρατηρήσεις σε λειτουργία Spotlight με ηλεκτρονικό σύστημα διεύθυνσης δέσμης στις κατευθύνσεις της περιοχής και του αζιμούθιου. Για να καλύψει τις παρατηρήσεις ευρείας περιοχής, το PALSAR-2 προσφέρει τη δυνατότητα διεύθυνσης ηλεκτρονικής δέσμης ευρείας γωνίας πρόσκρουσης (8° - 70°) καθώς και ένα μέσο για παρατηρήσεις από την αριστερή ή τη δεξιά πλευρά από το δορυφορικό επίγειο ίχνος. Ο απαιτούμενος ελιγμός του διαστημικού σκάφους για αυτήν την αλλαγή παρατήρησης μπορεί να επιτευχθεί σε περίπου 2 λεπτά από την ονομαστική κατεύθυνση της εμφάνισης του ναδύρ.



Εικόνα 2.6 Απεικόνιση του διαστημικού δορυφόρου ALOS-2(JAXA)

Το σύστημα PALSAR-2 αποτελείται από δύο υποσυστήματα: το υποσύστημα κεραίας (ANT) και την ηλεκτρική μονάδα (ELU). Το ANT είναι μια ενεργή κεραία συστοιχίας



φάσης η οποία κατευθύνει τη δέσμη τόσο σε υψόμετρο όσο και σε αζιμούθιο διεύθυνση ( $\pm 30^\circ$  σε υψόμετρο και  $\pm 3,5^\circ$  σε αζιμούθιο). Έχει μέγεθος 9,9 m (αζιμούθιο) x 2,9 m (υψόμετρο) και αποτελείται από 5 ηλεκτρικά πάνελ. Η κεραία αποτελείται από 1.080 στοιχεία ακτινοβολίας που οδηγούνται από 180 TRMs (μονάδες μετάδοσης και λήψης). Ο σχεδιασμός επιτρέπει την οδήγηση και τη διαμόρφωση της δέσμης σε υψόμετρο και αζιμούθιο για διάφορες λειτουργίες απεικόνισης: Stripmap, Spotlight και ScanSAR. Η ονομαστική κεραία δείχνει προς την κατεύθυνση του nadir και δείχνει  $30^\circ$  πλάγια κατά την παρατήρηση (είτε προς την αριστερή πλευρά είτε προς τη δεξιά πλευρά του εδάφους).

## 2.5 ΜΕΘΟΔΟΙ SAR ΓΙΑ ΤΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΑΣΙΚΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

### 2.5.1 ΔΙΑΝΟΜΗ ΔΑΣΙΚΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Η βλάστηση στα χερσαία οικοσυστήματα καταλαμβάνει ένα σημαντικό ποσοστό του άνθρακα που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα από τα ορυκτά καύσιμα και την αποψίλωση των δασών (LeQuere et al. 2018, Schimel et al. 2015) και δημιουργεί συνθήκες εξαρτώμενες από τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες και δραστηριότητες. Τα δάση καλύπτουν περίπου 3,8 δισεκατομμύρια εκτάρια (FAO 2015) της επιφάνειας της γης και αποθηκεύουν μεγάλα ποσοστά άνθρακα, περίπου τα διπλάσια σε σχέση με αυτά της ατμόσφαιρας (Canadell & Raupach 2008, Sabine et al. 2004). Ο συνδυασμός των δύο (δάση και άνθρακα) συνεισφέρει στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και των οικονομικών οφελών από την μείωση των εκπομπών της αποψίλωσης και της υποβάθμισης των δασών (IPCC 2007, Gibbs et al. 2014). Υπάρχουν, ωστόσο, μεγάλες αβεβαιότητες σχετικά με το μέγεθος του άνθρακα που αποθηκεύεται σε κλίμακες τοπίου (1-100 εκτάρια), όπου τα οφέλη μετριασμού και οι υπηρεσίες οικοσυστήματος αξιολογούνται. Μια πρόσφατη προσπάθεια συλλογής πληροφοριών από διάφορες μετρήσεις σε παγκόσμια κλίμακα, αποτυπώνει τη συνολική κατανομή της δασικής επίγειας βιομάζας (AGB) και του άνθρακα που αποθηκεύεται στα παγκόσμια οικοσυστήματα. Η δομή των δασών, η τρισδιάστατη δηλαδή διάταξη των μεμονωμένων δέντρων, αποτελεί άμεσο δείκτη της ποσότητας άνθρακα που αποθηκεύεται σε ένα οικοσύστημα. Η αποθήκευση αυτή σχετίζεται με τον τρόπο λειτουργίας του οικοσυστήματος (διαχείριση του άνθρακα, του νερού και των θρεπτικών συστατικών). Επιπλέον, υπάρχει αυξημένη ανάγκη κατανόησης της παγκόσμιας δυναμικής του άνθρακα στα οικοσυστήματα, όπου τα αποθέματα άνθρακα αποτελούν προϋπόθεση για την κατανόηση της βιόσφαιρας με άλλους τομείς της Γης. Για παράδειγμα, η ποσότητα άνθρακα σε ένα σύστημα καθορίζει την ποσότητα που τελικά εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα (ως CO<sub>2</sub>, CO και CH<sub>4</sub> μέσω της καύσης και της αποσύνθεσης), όταν τα οικοσυστήματα διαταράσσονται λόγω της αποψίλωσης, της υποβάθμισης ή κάποιας διαταραχής του κλίματος όπως η φωτιά. Συνεπώς, η ποσότητα άνθρακα μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της AGB, η οποία εκτιμάται από μετρήσεις της δομής (π.χ. το μέγεθος και η πυκνότητα) και της μάζας των δέντρων. Έτσι η AGB θεωρείται κρίσιμη μεταβλητή για μια σειρά εφαρμογών όπως:

- της αξιολόγησης δασικών πυρκαγιών,
- της βιομηχανίας ξυλείας,
- αλλαγή χρήσεων γης,
- την μέτρηση αερίων του θερμοκηπίου,
- καθώς και την βιοποικιλότητα και την παραγωγή τροφίμων.

Αν και πολλές από αυτές τις εφαρμογές μπορούν να μετρηθούν χρησιμοποιώντας δορυφορικά δεδομένα με την δασική κάλυψη και την πιθανή αλλαγή της, η κατανόηση της αλλαγής αυτής στην AGB παραμένει υποτυπώδης (Saatchi et al. 2011). Για παράδειγμα,

είναι γνωστό ότι αλλαγές των χρήσεων γης λόγω της αποψίλωσης των δασών και των πυρκαγιών, εκτιμώνται να έχουν μειώσει σημαντικά τα επίπεδα βιομάζας παγκοσμίως.

### 2.5.2 ΔΑΣΙΚΗ ΒΙΟΜΑΖΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΣΗ

Υπάρχει μεγάλη συνεργασία, μεταξύ εδαφικής και μη, ανίχνευσης των μετρήσεων για την ποσοτικοποίηση της δασικής επίγειας βιομάζας (AGB). Δεδομένα εδάφους (που αποτελούνται από όλες τις διαμέτρους των δέντρων, μια δειγματοληψία του υψόμετρου και αναγνώριση των ειδών που επιτρέπουν την εξαγωγή συμπερασμάτων για τις πυκνότητες του ξύλου) είναι πιο ολοκληρωμένα σε τοπικό επίπεδο από τα δεδομένα τηλεπισκόπησης που μετράνε το συνολικό ύψος των ανώτερων επιπέδων του δάσους (Canopy Height), στην περίπτωση αισθητήρων LIDAR ή ορισμένους δείκτες ύψους του δάσους και έντασης στην περίπτωση αισθητήρων ραντάρ. Αντιθέτως, αερομεταφερόμενα ή δορυφορικά δεδομένα που βασίζονται σε δεδομένα τηλεπισκόπησης είναι πολύ πιο εκτεταμένα, με εκατομμύρια μετρήσεις σε περιφερειακές ή ηπειρωτικές κλίμακες παρέχοντας μια πιο χωρικά ολοκληρωμένη μέτρηση των διακυμάνσεων της δασικής βιομάζας. Ωστόσο και τα δύο δίνουν έμφαση στη μέτρηση ορισμένων φυσικών ιδιοτήτων (π.χ. ύψος ή διάμετρος, όγκος κ.λπ.) που δεν χαρακτηρίζονται ως δασική βιομάζα (Clark & Kellner 2012). Και οι δύο προσπάθειες βασίζονται σε στατιστικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της βιομάζας. Υπόκεινται και οι δύο όμως, σε λάθη μέτρησης και αλγοριθμικά σφάλματα. Διάφοροι αισθητήρες τηλεπισκόπησης παρέχουν μετρήσεις των βιοφυσικών και δομικών χαρακτηριστικών των δασών με βάση την αλληλεπίδραση του φωτός ή ενέργεια μικροκυμάτων με την επιφάνεια των δασών και τα ξυλώδη στοιχεία. Αυτοί οι αισθητήρες συνήθως κατηγοριοποιούνται σε παθητικούς αισθητήρες, όπως μετρητές φάσματος ή ραδιομετρητές που μετρούν την ανακλώσα ή εκπεμπόμενη ακτινοβολία από τις επιφάνειες της Γης, και σε ενεργούς αισθητήρες, που παράγουν και εκπέμπουν εσωτερικά ενέργεια και στη συνέχεια μετρούν τις διαφορετικές ιδιότητες της επιστρεφόμενης ενέργειας που αναπηδά πίσω από την επιφάνεια. Οι παθητικοί αισθητήρες μετρούν διάφορα μήκη κύματος της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας και παρέχουν δισδιάστατες πληροφορίες που μπορούν να συνδέονται έμμεσα με βιοφυσικές ιδιότητες της βλάστησης (Rosette et al. 2012, Shugart et al. 2010). Παραδείγματα παθητικών συστημάτων είναι το Landsat (μετράει το ορατό φάσμα), το Quickbird, το AVIRIS και το MODIS με τα δύο τελευταία να κάνουν μετρήσεις από την ορατή ακτινοβολία σε υπέρυθρη. Από την άλλη, οι ενεργοί αισθητήρες έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν σε περιορισμένα μήκη κύματος όπως το lidar σε ορατά ή υπέρυθρα μήκη κύματος, ή ραντάρ σε μεγάλα μήκη κύματος (μικροκύματα).

Οι τεχνικές τηλεπισκόπησης για την δασική δομή και βιομάζα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται σε παρατηρήσεις συστημάτων τηλεπισκόπησης που παρέχουν τις πιο άμεσες μετρήσεις της δομής των δασών, όπως το ύψος της ανώτατης επιφάνειας από αισθητήρες lidar σε αερομεταφερόμενες ή διαστημικές πλατφόρμες. Οι μετρήσεις του αισθητήρα lidar πρέπει να αντιμετωπίζονται όπως και οι εδαφικές μετρήσεις όπου μετριέται το ύψος δέντρου με τη χρήση λέιζερ ή κλινομέτρων στο πεδίο μελέτης. Και στις δύο περιπτώσεις, οι μετρήσεις γίνονται σχετικά άμεσα. Το ύψος μετριέται με λέιζερ από τον αέρα η το διάστημα και οι μετρήσεις γωνιών από το έδαφος. Υπάρχει ισχυρή απόδειξη ότι το ύψος των δέντρων μπορεί να μετρηθεί με την ίδια ακρίβεια, αν όχι καλύτερα από τις εδαφικές μετρήσεις, με την χρήση συστήματος lidar.
- Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται σε ενεργά συστήματα τηλεπισκόπησης που παρέχουν έμμεσες μετρήσεις της δασικής δομής, όπως για παράδειγμα ενεργούς

αισθητήρες ραντάρ για τον όγκο των δασών ή τη βιομάζα και το ύψος. Σε αυτή την περίπτωση, οι μετρήσεις επανασκέδασης του ραντάρ (backscatter) παρέχουν ισχυρή ευαισθησία στη δασική δομή και βιομάζα. Αυτή η ευαισθησία μπορεί να μειωθεί όταν η βιομάζα αυξάνεται σε ένα εύρος από 100 έως 150 Mg/ha σε μήκη κύματος ζώνης L (~25 cm), και πάνω από 200 έως 300 Mg/ha σε μήκη κύματος p-ζωνών (~70). Με την προσθήκη ιντερφερομετρικών τεχνικών ραντάρ (οι μετρήσεις PolInSAR και TomoSAR), η ευαισθησία των αισθητήρων μπορεί να αυξηθεί σε ολόκληρο το εύρος της βιομάζας των δασών. Οι υψηλής ανάλυσης, διδιάστατες μετρήσεις ραντάρ έχουν παράσχει τον διαχωρισμό των δασών με βάση των κενών στην επιφάνεια τους και την χωρική ετερογένεια τους, και έχουν χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο παρακολούθησης του φαινομένου της αποψίλωσης.

Τα συστήματα lidar και τα ραντάρ αναγνωρίζονται επί του παρόντος ως οι καλύτερες προσεγγίσεις για την παρακολούθηση και τη μέτρηση αλλαγών στην δασική βιομάζα παγκοσμίως. Για το λόγο αυτό, πολυάριθμες διαστημικές υπηρεσίες έχουν επιχειρήσει την βελτίωση και την χρήση αυτών των τεχνικών για τη διαστημική παρατήρηση της δασικής βιομάζας, με την NASA και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) να έχουν ήδη εγκρίνει σχέδια ανάπτυξης και εκτόξευσης συστημάτων lidar και αισθητήρες ραντάρ στο εγγύς μέλλον. Οι αποστολές της NASA GEDI (2018) και NISAR (2021), και η αποστολή της ESA Biomass (θα πραγματοποιηθεί το 2022), έχουν παρόμοιους στόχους για την ανάπτυξη περιφερειακών ή παγκόσμιων εκτιμήσεων της δασικής δομής και της AGB. Αυτές οι αποστολές θα απευθυνθούν σε έναν από τους βασικούς στρατηγικούς στόχους της NASA, την κατανόηση δηλαδή των αλλαγών στο κλίμα της Γης, εστιάζοντας στην πιο αβέβαιη συνιστώσα του παγκόσμιου κύκλου άνθρακα που σχετίζεται με τις επίγειες πηγές άνθρακα. Όλες οι αποστολές που παρέχουν ενεργές μετρήσεις της δασικής δομής πρέπει να μετατραπούν σε AGB χρησιμοποιώντας αλγοριθμικά μοντέλα και να επικυρωθούν από τις ήδη υπάρχοντες εδαφικές μετρήσεις AGB κατανεμημένες σε παγκόσμιο επίπεδο, σε διαφορετικούς τύπους δασών. Καθεμία από τις αποστολές αυτές επικεντρώνεται σε διαφορετικές παρατηρήσεις, χρησιμοποιεί διαφορετικούς αλγόριθμους και ανακτά διαφορετικά επίπεδα βιομάζας (AGB) σε διαφορετικές χωρικές και χρονικές κλίμακες. Η επιτυχία τους εξαρτάται από το πώς τα επιστημονικά προϊόντα τους μπορούν να προωθήσουν τα επιστημονικά και κοινωνικά οφέλη που φέρουν ως αποτέλεσμα.

Οι παρατηρήσεις βιομάζας στη P-band θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τα δάση υψηλών αποθεμάτων βιομάζας σε τροπικές περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα ποσοτικοποίησης της δασικής βιομάζας λόγω της έλλειψης εθνικών δεδομένων απογραφής και της χαμηλής αποτελεσματικότητας των υφιστάμενων ραντάρ και τεχνικών οπτικής τηλεπισκόπησης. Η συμβολή της αποστολής της ESA Biomass στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα είναι η παροχή ετήσιων αποθεμάτων άνθρακα και των αλλαγών και δεδομένων για υποβαθμισμένα δάση. Αναμένεται ότι η ευαισθησία μέτρησης της αποστολής θα επιτρέψει την εκτίμηση δασών υψηλής βιομάζας (>100 Mg/ha). Ωστόσο, για περιοχές χαμηλής πυκνότητας βιομάζας (<100 Mg/ha), η αποστολή NISAR της NASA στη συχνότητα της ζώνης L θα έχει καλύτερες επιδόσεις όσον αφορά την ακρίβεια και τη χωρική ανάλυση (<100 m).

### 2.5.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΑΣΙΚΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ SAR

Οι μετρήσεις επανασκέδασης των SAR παρουσιάζουν ευαισθησία στην βλάστηση και το AGB. Παρατηρήσεις από ένα διαστημικό SAR μπορούν έτσι να χρησιμοποιηθούν για τη χαρτογράφηση AGB σε παγκόσμιο επίπεδο. Ωστόσο, η ευαισθησία ραντάρ στις τιμές AGB αλλάζει ανάλογα με το μήκος κύματος και τη γεωμετρία του ραντάρ και

επηρεάζεται από την επιφανειακή τοπογραφία, τη δομή της βλάστησης και συνθήκες όπως η υγρασία του εδάφους. Όλοι οι αλγόριθμοι ή τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση AGB πρέπει να λάβουν υπόψιν όλες τις μεταβλητές που επηρεάζουν τις μετρήσεις SAR. Οι επιπτώσεις της χωρικής δομής των δασών και σφάλματα που σχετίζονται με τη γεωεντοπισμό των παρατηρητηρίων που χρησιμοποιούνται για τη συσχέτιση της επανασκέδασης με τη βιομάζα, τη γεωμετρία μέτρησης ραντάρ και το θόρυβο κηλίδας αποτελούν όλα σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ευαισθησία ραντάρ στη δομή των δασών και AGB.

Οι παρατηρήσεις ραντάρ για τη βλάστηση έχουν μελετηθεί για περισσότερες από τέσσερις δεκαετίες, και θεωρητικά και πειραματικά (Ulaby et al. 1982, Tsang et al. 1985, Ulaby & Dobson 1989, Cloude 2014). Αυτές οι μελέτες έχουν δείξει ότι οι μετρήσεις ραντάρ εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη δομή, τις διηλεκτρικές ιδιότητες των συστατικών της βλάστησης και την υγρασία της επιφάνειας. Το έδαφος περιγράφεται συχνότερα ως ομοιογενές μέσο με σύνθετη διηλεκτρική σταθερά που είναι συνάρτηση της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας, καθώς και της υψής του εδάφους, της θερμοκρασίας, και της πυκνότητας. Μελέτες διασποράς της επιφάνειας και της υγρασίας του εδάφους στη L-band έχουν δείξει ότι η επιφάνεια διασποράς μπορεί να εκφραστεί με βάση τη διηλεκτρική σταθερά στην κορυφή 5 cm και με τα χαρακτηριστικά της τραχύτητας της επιφάνειας σε σχέση με τη Root Mean Square (RMS) ύψος τραχύτητας και μήκος χωρικής συσχέτισης (Fung et al. 1992). Στα περισσότερα μοντέλα που σχετίζονται με SAR για την σάρωση των επιφανειών του εδάφους, θεωρείται ότι η επίδραση της χωρικής συσχέτισης μειώνεται κατά τη διάρκεια της αζιμοθλιακής επεξεργασίας SAR και ότι η ευαισθησία του ραντάρ στην επιφάνεια του εδάφους, η RMS διακύμανση του ύψους, παραμένει ως κυρίαρχη δομή επιφάνειας που επηρεάζει την επιφάνεια διασποράς (Oh et al. 1992, Shi et al. 1997, Dubois et al. 1995, Baghdadi et al. 2002, Bryant et al. 2007). Άλλα χαρακτηριστικά του τοπίου, όπως η κατευθυντική γραμμή μπορεί να επηρεάσει διατομές ραντάρ σε χωρική ανάλυση 100 m, αλλά θεωρείται άνευ σημασίας σε βλάστηση, όπως δάση και θαμνώδεις εκτάσεις.

Γενικά, η ενέργεια που μεταδίδεται από τα ραντάρ, με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικού παλμού, διεισδύει το δασικό θόλο και αντανακλάται πίσω από τα δασικά συστατικά όπως τα φύλλα, οι κλάδοι, οι μίσχοι, και το υποκείμενο χώμα. Γνωρίζοντας το μέγεθος της μεταδιδόμενης και λαμβανόμενης ενέργειας, μια φυσική σχέση που βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία έχει αναπτυχθεί και αφορά την αναλογία αυτών των ενεργειών προς τις ιδιότητες του δάσους. Οι μετρήσεις ραντάρ εκτελούνται σε διαφορετικές συχνότητες ή μήκη κύματος, το καθένα από τα οποία παρέχει διαφορετική διείσδυση στη βλάστηση και το έδαφος, καθώς και ευαισθησία στη βιομάζα βλάστησης.

Οι μετρήσεις εκτελούνται σε συνδυασμό μετάδοσης και λήψης (Οριζόντια (H) και κατακόρυφη (V)) σε γωνία επίπτωσης του ναδίρ και σε χωρική ανάλυση που προβάλλεται στο ραντάρ στην κατεύθυνση εύρους. Επομένως, η ευαισθησία του ραντάρ προς το AGB σε οποιαδήποτε συχνότητα και συνδυασμό πόλωσης (π.χ. HH, HV, VV) εξαρτάται από δύο παραμέτρους: (1) γεωμετρία μέτρησης (όπως γωνία επίπτωσης, θέση και μέγεθος των εικονοστοιχείων της εικόνας) όσον αφορά το μέγεθος και τον προσανατολισμό του εδάφους και (2) δασικές διαρθρωτικές παραμέτρους όπως το μέγεθος (όγκος) και την πυκνότητα των δένδρων (αριθμός ανά κελί ανάλυσης), τον προσανατολισμό των στοιχείων του δάσους (φύλλα, κλαδιά, μίσχοι), τις υποκείμενες συνθήκες επιφάνειας (υγρασία, τραχύτητα και κλίση) και (3) τη διηλεκτρική σταθερά που με τη σειρά της εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε νερό βλάστησης ή την ειδική βαρύτητα (δηλ. πυκνότητα) (Dobson et al. 1995, Saatchi & Moghaddam 2000).

#### 2.5.4 ΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΟΣ ΡΑΝΤΑΡ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΔΑΣΟΥΣ

Συνήθως τα δεδομένα SAR λαμβάνονται σε X-band, C-band και L-band συχνότητες για τηλεπισκόπηση του περιβάλλοντος από αερομεταφερόμενες και διαστημικές πλατφόρμες. Άλλες συχνότητες όπως P-band και S-band, χρησιμοποιούνται επίσης για εφαρμογές τηλεπισκόπησης αλλά μόνο σε αερομεταφερόμενες πλατφόρμες με σκοπό την εφαρμογή τους για διαστημικές παρατηρήσεις στο εγγύς μέλλον. Ο αισθητήρας P-band έχει σχεδιαστεί για το μελλοντικό Earth Explorer της ESA. Εξαιρετικές μελέτες έχουν διεξαχθεί για την εξέταση των ιδιοτήτων της επανασκέδασης του ραντάρ σε δασικές περιοχές (π.χ. Freeman & Durden 1998, Dobson et al. 1992, Ranson et al. 1997). Η μεγαλύτερη σκέδαση συμβαίνει όταν τα σωματίδια βρίσκονται στην κλίμακα του μήκος κύματος του ραντάρ, έτσι στην περίπτωση των δασών η επανασκέδαση του L-band προκύπτει περισσότερο από τον κορμό και τα κλαδιά των δέντρων, σε αντίθεση με την επανασκέδαση της X-band, η οποία προκύπτει περισσότερο από τα φύλλα και τις βελόνες. Επίσης το βάθος διείσδυσης των μικροκυμάτων στα δάση ποικίλλει ανάλογα με την συχνότητα. Ενώ η L και η P μπορούν να διεισδύσουν βαθιά στα δάση, η X αντανακλάται από το ανώτατο στρώμα του δάσους. Συνεπώς για την εκτίμηση της βιομάζας, οι μάντες L και P προτιμώνται από υψηλότερες συχνότητες και μικρότερα μήκη κύματος για δύο λόγους:

- Σε αυτές τις μάντες τα κύματα ραντάρ ή η ενέργεια μπορούν να διεισδύσουν τα ανώτερα επίπεδα των δέντρων και να επιστρέψουν αποτέλεσμα από μεγαλύτερα ξυλώδη συστατικά του δάσους.
- Η επιστροφή αποτελεσμάτων από μεγαλύτερα συστατικά δέντρων είναι πιο αξιόπιστα στο χρόνο σε περίπτωση επαναλαμβανόμενων μετρήσεων σε εφαρμογές change detection ή άλλες ενδομετρικές εφαρμογές.

Σε μεγαλύτερες συχνότητες (X και C) η διείσδυση του SAR θα είναι περιορισμένη στα ανώτερα επίπεδα των δασών που κυριαρχούνται από φύλλα και μικρότερα κλαδιά εκτός αν χρησιμοποιούνται σε πολύ αραιά δασικά καλύμματα όπως στις σαβάνες και σε δασικές εκτάσεις. Συστήματα ραντάρ υψηλής συχνότητας όπως ο Sentinel και ο RadarSAT που λειτουργούν σε C-band παρέχουν μετρήσεις που είναι πιο ευαίσθητες στην δασική βιομάζα χαμηλής πυκνότητας (π.χ. αραιά σαβάνια, θάμνους, λιβάδια ή γεωργικές καλλιέργειες). Πρόσφατες μελέτες επικεντρώθηκαν στην σχέση μεταξύ του AGB και του ραντάρ και χρησιμοποιούν διαστημικά δεδομένα SAR από τον δορυφόρο ALOS PALSAR (L-band,  $\lambda=23,62$  cm) και αερομεταφερόμενα δεδομένα SAR τόσο από συχνότητες P-band όσο και από L-band. Η ικανότητα του ραντάρ να επιστρέφει αποτελέσματα, από μεγάλες διακλαδώσεις των δασών, σε χαμηλές συχνότητες ή μεγάλα μήκη κύματος θεωρείται ο κύριος λόγος που χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες ραντάρ για την εκτίμηση της δασικής βιομάζας. Παλαιότερες μελέτες διαπίστωσαν ότι οι τιμές επανασκέδασης αυξάνονται με την αύξηση των επιπέδων του AGB από χαμηλό σε μεσαίο επίπεδο, ωστόσο σταδιακά σε υψηλότερα επίπεδα AGB χάνουμε την ευαισθησία τους. Το ασυμπτωτικό επίπεδο κορεσμού ποικίλλει με βάση το μήκος κύματος του ραντάρ και τον τύπο και την δομή του δάσους. Αποτελέσματα από το αερομεταφερόμενο AIRSAR και τα δεδομένα E-SAR υποδηλώνουν ότι ο κορεσμός μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 80 και 150 Mg ανά εκτάριο με μήκος κύματος 70 cm. Ο αντίκτυπος της δομής της βλάστησης και της βιομάζας σχετικά με τα δεδομένα SAR μπορούν να διερευνηθούν με την μοντελοποίηση των κυρίαρχων μηχανισμών σκέδασης που ελέγχουν τις μετρήσεις των SAR. Υπάρχει μια ποικιλία προσεγγίσεων για την μοντελοποίηση της βλάστησης, συμπεριλαμβανομένου του χαρακτηρισμού της δομής της δασικής βλάστησης, γνωστή ως scatters ή στοιχεία σκέδασης όπως κλαδιά και φύλλα σε όρους κανονικού διηλεκτρικού και κυλινδρικού σχήματος με καθορισμένες τιμές μεγέθους και προσανατολισμού. Οι διηλεκτρικές σταθερές αποδίδονται σε κάθε ένα στοιχείο σκέδασης για την αντανάκλαση του ζωντανού

ξύλου των δέντρων, των φύλλων καθώς και την περιεκτικότητα τους σε νερό (Saatchi et al. 1994, Saatchi & McDonald 1997, Saatchi & Moghaddam 2000, Yueh et al. 1992, Lang et al. 1983, Karam et al. 1992, Ulaby et al. 1990). Η συνολική επανασκέδαση των συστημάτων SAR προκύπτει από τον συνδυασμό σκέδασης και εξασθένησης μεμονωμένων στοιχείων σκέδασης που μπορεί να αναπαρασταθεί ως αραιό μέσο διασποράς (Lang 1981, Saatchi et al. 1994, Chauhan et al. 1994). Αυτή η προσέγγιση απαιτεί γνώση της δομής των δέντρων (μέγεθος, προσανατολισμό και πυκνότητα), της διηλεκτρικής σταθεράς και των χαρακτηριστικών του εδάφους (ύψος RMS, μήκος συσχέτισης και διηλεκτρική σταθερά επιφάνειας εδάφους). Η μέτρηση του συντελεστή επανασκέδασης των συστημάτων SAR μπορεί να εκφραστεί ως ο συνδυασμός τριών στοιχείων σκέδασης:

- Όγκος σκέδασης
- Όγκος και επιφάνεια αλληλεπίδρασης
- Επιφανειακή σκέδαση

$$\sigma_{pq}^0 = \sigma_{pq-vol}^0 + \sigma_{pq-vol-surf}^0 + \sigma_{pq-surf}^0$$

όπου  $p$  και  $q$  υποδηλώνουν την πόλωση των μεταδιδόμενων και λαμβανόμενων σημάτων ραντάρ που μπορούν να εκχωρούνται είτε κάθετα ( $V$ ) είτε οριζόντια ( $H$ ) για ένα γραμμικό σύστημα ραντάρ πόλωσης. Οι τρεις κυρίαρχοι όροι σκέδασης προέρχονται από την βασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία επιλύοντας τις εξισώσεις του Maxwell σε ένα διακριτό τυχαίο μέσο (Saatchi & Lang 1989, Lang 1981, Tsang & Kong 1988, Saatchi & McDonald 1997, Chauhan et al. 1991). Υπάρχουν απλούστερες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν μόνο το περιεχόμενο νερού βλάστησης ( $VWC$ ) που παρέχει αναλυτικές μορφές εξασθένησης και διασποράς. Το πιο κοινό μοντέλο που χρησιμοποιείται σε συχνότητες μικροκυμάτων είναι το μοντέλο Water Cloud, το οποίο περιλαμβάνει δύο στοιχεία σκέδασης, τον όγκο βλάστησης και το υποκείμενο έδαφος τους, αλλά αγνοεί την αλληλεπίδραση όγκου εδάφους που κυριαρχεί στα δασικά οικοσυστήματα και σε παρατηρήσεις μεγαλύτερων μηκών κύματος ραντάρ. Επομένως το μοντέλο Water Cloud χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρότερα μήκη κύματος ( $C$  band και άνω).

Τα μεταδιδόμενα και λαμβανόμενα σήματα ραντάρ διαδίδονται σε ένα ορισμένο επίπεδο πόλωσης. Τα περισσότερα ραντάρ έχουν σχεδιαστεί για να μεταδίδουν ακτινοβολία μικροκυμάτων είτε οριζόντια πολωμένη ( $H$ ) είτε κάθετα πολωμένη ( $V$ ). Ομοίως η κεραία ραντάρ μπορεί να λάβει είτε την οριζόντια είτε την κάθετη πολωμένη ενέργεια επανασκέδασης ή και τις δύο. Διαφορετικές συνδυαστικές επιλογές για την πόλωση του ραντάρ θα παράγουν διαφορετικά χαρακτηριστικά εικόνας:

- Ενιαία πόλωση όπου το σύστημα ραντάρ λειτουργεί με την ίδια πόλωση και την μετάδοση και την λήψη του σήματος.
- Διασταυρούμενη πόλωση όπου μια διαφορετική πόλωση χρησιμοποιείται για την μετάδοση και την λήψη του σήματος.
- Διπλή πόλωση όπου το σύστημα ραντάρ λειτουργεί με μια πόλωση για τη μετάδοση και δύο για την λήψη.
- Τετραπολική πόλωση όπου η οριζόντια και η κάθετη πόλωση χρησιμοποιείται για την μετάδοση εναλλακτικών παλμών και την λήψη σήματος και με τα δύο.

Μεταξύ των τετραπολικών διαμορφώσεων υπάρχουν επίσης, πολλές παραλλαγές όπως οι πλήρως πολωμετρικές μετρήσεις που περιλαμβάνουν όλα τα στοιχεία πλάτους και φάσης του πίνακά σκέδασης. Η πόλωση είναι επομένως το κύριο χαρακτηριστικό των σημάτων ραντάρ που διαδίδονται στην επιφάνεια των δέντρων ή στον όγκο βλάστησης και σκέδασης από μεμονωμένα στοιχεία βλάστησης που συμβάλλουν συλλογικά στην

ενέργεια επανασκέδασης, η οποία μετριέται από τον δείκτη του συστήματος ραντάρ. Η πόλωση, ως προσανατολισμό των κυματικών διανυσμάτων του ραντάρ, αλληλοεπιδρά με στοιχεία βλάστησης και επανασκέδασης ανάλογα με το μέγεθος και τον προσανατολισμό των scatterers. Για παράδειγμα ένα όρθιο ζωντανό δέντρο με σχεδόν κάθετο προσανατολισμό αποπολώνει τα εισερχόμενα κύματα με διαφορετικές αντοχές από τα κλαδιά ή τα φύλλα. Η χρήση ραντάρ που παρέχουν μετρήσεις σε διαφορετικές πολώσεις επιτρέπουν στην βλάστηση με διαφορετικές δομές να αντανακλαστεί στο μέσο μέγεθος και προσανατολισμό των διαφορετικών στοιχείων. Ο καλύτερος τρόπος για να αποδειχθεί αυτό είναι η εξέταση των εικόνων ραντάρ πάνω σε αγροτικά τοπία με διαφορετικούς τύπους καλλιεργειών.

Οι μεταβλητές σύγχυσης που επηρεάζουν τις μετρήσεις SAR και καθιστούν την ερμηνεία αυτών διαφορετική μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

(1) περιβαλλοντικές

Δύο μετρήσεις επανασκέδασης του ραντάρ επιφανειών βλάστησης που λαμβάνονται από το ίδιο όργανο χρησιμοποιώντας ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά και γεωμετρία παρατήρησης μπορούν να είναι σημαντικά διαφορετικές χωρίς καμία αλλαγή στην δομή της βλάστησης ή της βιομάζας. Οι διαφορές αυτές μπορεί να αποδοθούν σε επιφανειακές συνθήκες ή περιβαλλοντικές αλλαγές μεταξύ των δύο μετρήσεων ραντάρ και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση των δεδομένων.

και (2) γεωμετρικές.

Σε αντίθεση με τους οπτικούς παθητικούς αισθητήρες και τους αισθητήρες lidar, οι μετρήσεις των SAR εκτελούνται σε μία εκτός-ναδίρ κατεύθυνση, και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι είναι ένας ενεργός αισθητήρας, τόσο η γεωμετρία των παρατηρήσεων, όσο και η γεωμετρία των στόχων (συμπεριλαμβανομένων επιφανειών βλάστησης, αλλά και μη φυτικές επιφάνειες) επηρεάζουν αυτές τις μετρήσεις. Η επιφανειακή τοπογραφία και ο προσανατολισμός των κλίσεων και των πτυχών της παρατηρούμενης επιφάνειας είναι ίσως οι πιο κυρίαρχες επιπτώσεις στις μετρήσεις ραντάρ. Ωστόσο, άλλοι παράγοντες όπως ο προσανατολισμός των δέντρων, των κλαδιών, των φύλλων, και άλλων στοιχείων μπορούν επίσης να επηρεάσουν τις μετρήσεις SAR.

#### 2.5.5 ΒΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ SAR ΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Πριν από την εκτίμηση της βιομάζας από τις μετρήσεις SAR, τα δεδομένα SAR πρέπει να επεξεργαστούν έτσι ώστε, το μέγεθος του pixel, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις να είναι όλα κανονικοποιημένα και ραδιομετρικά βαθμονομημένα. Μολονότι μπορεί να είναι δυνατόν να περιλαμβάνουν όλα τα στάδια επεξεργασίας SAR εντός του αλγόριθμου εκτίμησης βιομάζας, η προετοιμασία εικόνων SAR πριν από την εφαρμογή του αλγόριθμου επιτρέπουν τον διαχωρισμό της διαδικασίας εκτίμησης βιομάζας από την ποιότητα των δεδομένων και τη διαδικασία βαθμονόμησης.

Μια από τις σημαντικότερες διαφορές μεταξύ ενεργών αισθητήρων, όπως SAR ή λέιζερ, και των παθητικών αισθητήρων (σαν αυτόν που χρησιμοποιείται σε Landsat) είναι η επίδραση της κηλίδας ή των στιγμάτων στη χωρική ανάλυση του αισθητήρα. Εικόνες που λαμβάνονται από ενεργούς αισθητήρες χαρακτηρίζονται από κηλίδα ή στίγματα. Το γεγονός αυτό, αποτελεί έναν τυχαίο χωρικά πολλαπλασιαστικό θόρυβο λόγω της συνεκτικής υπέρθεσης πολλαπλών πηγών σκέδασης μέσα σε ένα στοιχείο ανάλυσης SAR. Με άλλα λόγια, η κηλίδα είναι μια στατιστική διακύμανση που σχετίζεται με την ανακλαστικότητα ραντάρ (φωτεινότητα) του κάθε pixel στην εικόνα μιας περιοχής. Η

χωρική ανάλυση του αισθητήρα SAR καθορίζει τον ελάχιστο διαχωρισμό μεταξύ μετρήσεων που ο αισθητήρας είναι σε θέση να διακρίνει και να καθορίσει την ποσότητα στιγμάτων που εισάγεται στο σύστημα. Όσο υψηλότερη είναι η χωρική ανάλυση του αισθητήρα, τόσο περισσότερα αντικείμενα μπορεί να διακρίνει στο έδαφος. Ο όρος χωρική ανάλυση συχνά συγγέεται με το μέγεθος του pixel, το οποίο είναι η απόσταση των pixels στην κατεύθυνση εύρους του αζιμούθιου και του εδάφους μετά την επεξεργασία των δεδομένων. Ένα πρώτο βήμα για τη μείωση της κηλίδας, εις βάρος της χωρικής ανάλυσης, πραγματοποιείται συνήθως κατά τη διάρκεια της πολυεναίθου, όπου μετριέται ο μέσος όρος του εύρους ή/και των κελιών ανάλυσης αζιμούθιου. Όσο περισσότερες εμφανίσεις χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία μιας εικόνας, τόσο λιγότερη κηλίδα υπάρχει. Ο επεξεργαστής σήματος SAR μπορεί να χρησιμοποιήσει το συνθετικό διάφραγμα και το πλήρη ιστορικό δεδομένων σήματος, προκειμένου να παραχθεί η καλύτερη δυνατή ανάλυση, αν και, με πολλά στίγματα. Τα δεδομένα συχνά που λαμβάνονται από τα SAR είναι σε διαφορετικές μορφές:

- Συγκρότημα μίας εμφάνισης (SLC ή single-look complex) ή
- συγκρότημα πολλαπλής εμφάνισης (MLC ή multi-look complex).

Τα δεδομένα εικόνας SLC βαθμονομούνται με μία εμφάνιση σύνθετων αρχείων για κάθε πόλωση (HH, HV, VH και VV) που είναι συχνά σε μορφή κινητής υποδιαστολής, εν αντιθέσει τα αρχεία MLC είναι βαθμονομημένα πολλαπλών διαγώνιων προϊόντων που μπορεί να είναι είτε σε πλάτος είτε σε ισχύ για κάθε πόλωση και παρέχονται είτε ως ακέραιος (εύρος κλίμακας) είτε ως αιωρούμενο σημείο (δύναμη επανασκέδασης).

#### 2.5.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ SAR

Η μείωση των επιπέδων στίγματος είναι ιδιαίτερα σημαντική κατά την χρήση δεδομένων SAR για την εκτίμηση της δασικής βιομάζας ή την εκτέλεση άλλων λειτουργιών, όπως η ταξινόμηση και η κατάτμηση της εικόνας. Στην διαδικασία ανάπτυξης μοντέλων με επανασκέδαση SAR και βιομάζας, η σχέση βελτιώνεται σημαντικά όταν η κηλίδα μειώνεται. Η μείωση των κηλίδων από τον χωρικό μέσο όρο επηρεάζει τις μετρήσεις του ραντάρ και βελτιώνει τη σχέση μεταξύ του εικονοστοιχείου SAR και τις μετρήσεις του εδάφους ή του lidar. Τα SAR συλλέγουν δεδομένα κατά μήκος μιας λοξής περιοχής που καταγράφουν μόνο ένα κομμάτι του δασικού μέσου κάτω από το εικονοστοιχείο. Για γυμνές επιφάνειες χωρίς όγκο βλάστησης, η προβολή του εικονοστοιχείου στο έδαφος μπορεί εύκολα να συσχετίσει τις μετρήσεις SAR με τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Ωστόσο, στα δασικά οικοσυστήματα, η δειγματοληψία σε όγκο καλύπτει πάντα μια τεμαχισμένη περιοχή στο θόλο διαφορετική από το αποτύπωμα του lidar και τη θέση των οικοπέδων εδάφους.

#### 2.5.7 ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ SAR

Για την σωστή ερμηνεία των υπογραφών σκέδασης, η διόρθωση των επιπτώσεων της τοπικής γωνίας επίπτωσης λόγω της τοπογραφίας και της ομαλοποίησης για την πραγματική περιοχή pixel είναι απαραίτητα βήματα πριν από την ανάκτηση βιομάζας. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι οι μη αντιρροπούμενες τοπογραφικές επιδράσεις προκαλούν διασπορά 2 έως 7 dB του L-band backscatter, το οποίο είναι περίπου το ίδιο εύρος backscatter που χρησιμοποιείται για τη διάκριση του δάσους και τη μη δασική αντίθεση στις εικόνες SAR. Η ραδιομετρική διόρθωση θα τροποποιήσει τις τιμές  $\sigma^0$  σε  $\gamma^0$ . Ο τρόπος μετατροπής  $\sigma^0$  σε  $\gamma^0$  είναι ο εξής:  $\gamma^0 = \sigma^0 * \frac{A_{flat}}{A_{slope}} * \left(\frac{\cos\theta_{ref}}{\cos\theta_{loc}}\right)^n$



όπου  $\theta_{ref}$  και  $\theta_{loc}$  αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τη γωνία αναφοράς για την κανονικοποίηση του backscatter (π.χ. η γωνία επίπτωσης στο μέσο της SAR εικόνας) και τοπική γωνία επίπτωσης που προέρχεται από την γεωμετρία ραντάρ όσον αφορά την επιφανειακή τοπογραφία (κλίση και όψη). Η Aflat και η Aslope αντιπροσωπεύουν περιοχή pixel για ένα θεωρητικά επίπεδο έδαφος και πραγματική περιοχή pixel λόγω του sloped εδάφους, αντίστοιχα. Η δύναμη  $n$  αντιπροσωπεύει τη δύναμη τη διόρθωση γωνίας λόγω παραλλαγών του ραντάρ backscatter σε όλες τις γωνίες επίπτωσης. Για μια γυμνή επιφάνεια, ο εκθέτης είναι ίσος με 1, αλλά για τις επιφάνειες βλάστησης, μπορεί να είναι μικρότερος από 1 λόγω διακυμάνσεων των μηχανισμών σκέδασης (όγκος πάνω από κλίση) που προέρχονται από κενά στην επιφάνεια και διαφορετική διείδυση ραντάρ στην επιφάνεια. Η τιμή του  $n$  μπορεί επίσης να διαφέρει ανάλογα με την πόλωση. Ωστόσο, για την απλότητα, το  $n$  μπορεί να θεωρηθεί ως 1 για όλες τις πολώσεις και για τις πιο πρακτικές περιπτώσεις. Όλοι οι υπάρχοντες αλγόριθμοι RTC βασίζονται στην ποσοτικοποίηση της τοπικής γωνίας επίπτωσης και το Aslope πάνω από το έδαφος με σημαντική τοπογραφία. Οι προσεγγίσεις αυτές βασίζονται σχετικά με την εκτίμηση της τοπικής φωτισμένης περιοχής Aslope μέσω είτε (1) την εκτίμηση της τοπικής γωνίας επίπτωσης ή τη γωνία προβολής (Ulander 1996) ή (2) την ενσωμάτωση του ψηφιακού μοντέλου ανύψωσης (DEM) (Small 2011, Small et al. 1998). Ενώ οι μέθοδοι που βασίζονται στην τοπική γωνία επίπτωσης έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι απλούστερες, οι μέθοδοι που περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση DEM έχουν αποδειχθεί πιο ακριβείς, ιδίως σε απότομο έδαφος. Η προσέγγιση ενσωμάτωσης DEM περιλαμβάνει τον καθορισμό του αριθμού των εικονοστοιχείων που ανήκουν σε κάθε εύρος ραντάρ και αζιμούθιο pixel μέσω της γνώσης της διαδικασίας γεωκωδικοποίησης.

#### 2.5.8 ΠΟΛΥΜΕΤΡΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ SAR

Παρακάτω θα γίνει ανάλυση του τρόπου με τον οποίο οι φασματικές υπογραφές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της δασικής κάλυψης ή της βιομάζας σε διαφορετικά τοπία. Η χρήση υπογραφών ή δεικτών είναι σημαντική, διότι έχουν αναπτυχθεί από ένα συνδυασμό μετρήσεων ραντάρ, οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν την ευαισθησία για την εκτίμηση ή την παρακολούθηση των χαρακτηριστικών μιας επιφάνειας και να μειώσει άλλες επιπτώσεις. Για την παρακολούθηση της δασικής βιομάζας, οι μετρήσεις της επανασκέδασης ενός συστήματος ραντάρ μπορούν να επηρεαστούν από τις διακυμάνσεις του τύπου και της δομής του δάσους (τύπος και προσανατολισμός), των περιβαλλοντικών συνθηκών (π.χ. υγρασία), την γεωμετρία απεικόνισης του ραντάρ (π.χ. γωνία επίπτωσης και τοπογραφία). Επιλέγοντας ένα συνδυασμό πολωσιμετρικών ή μετρήσεων ραντάρ που μπορούν να μειώσουν αυτές τις επιδράσεις και να αυξήσουν την ευαισθησία μιας εικόνας ραντάρ στην κάλυψη της δασικής βιομάζας μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη παράμετρος παρακολούθησης. Αν και υπάρχουν πιο πολύπλοκοι τύποι που μπορούν να αναπτυχθούν είτε από αερομεταφερόμενα πολωσιμετρικά συστήματα ή από πολωσιμετρικές ιντερφερομετρικές μετρήσεις, δύο απλοί δείκτες πόλωσης, ο δείκτης βλάστησης ραντάρ (RVI) και ο δείκτης υποβάθμισης των δασών ραντάρ (RFDI), προτείνονται για την παρακολούθηση των τύπων δασών και οι οποίες μπορούν να αναπαράγονται εύκολα από υφιστάμενα δορυφορικά συστήματα SAR:  $RVI = \frac{8\gamma_{Hv}^0}{(\gamma_{HH}^0 + \gamma_{vv}^0 + 2\gamma_{Hv}^0)}$

Όπου το  $\gamma_0$  αντιπροσωπεύει τις ραδιομετρικές και γεωμετρικές διορθώσεις της επανασκέδασης του συστήματος ραντάρ για κάθε συνδυασμό πόλωσης σε μονάδες linear (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>). Ο RVI είναι ένας λόγος διασταυρούμενης πόλωσης και χρησιμοποιείται για

την προσέγγιση της συνολικής ισχύος από όλα τα κανάλια πόλωσης. Κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1, και αποτελεί μέτρηση της τυχειότητας της σκέδασης. Ο RVI είναι κοντά στο 0 για μια ομαλή γυμνή επιφάνεια, αυξάνεται με την growth της βλάστησης και έχει αυξημένη ευαισθησία στην κάλυψη της βλάστησης και της βιομάζας. Ο RVI έχει μικρότερη ευαισθησία στη γεωμετρία μέτρησης ραντάρ και δεν μπορεί να εξηγήσει απόλυτα σφάλματα βαθμονόμησης στα δεδομένα ραντάρ. Το RFDI υπολογίζεται ως:  $RFDI = \frac{\gamma_{HH}^0 - \gamma_{HV}^0}{\gamma_{HH}^0 + \gamma_{HV}^0}$

Όπου οι όροι είναι όλοι ραδιομετρικά διορθωμένοι. Ωστόσο, μπορεί να γίνει χρήση της αναλογίας πριν από κάθε ραδιομετρική και γεωμετρική διόρθωση των εικόνων συστήματος SAR. Η τιμή του RFDI κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1 γιατί σχεδόν σε όλες τις συνθήκες, ακόμη και στα περισσότερα τοπογραφικά πολύπλοκα εδάφη, η HH παραμένει μεγαλύτερη από την HV. Ωστόσο, οι τιμές του RFDI παραμένουν κυρίως σε >0,3 για πυκνά δάση, σε τιμές περίπου 0,4 για τα υποβαθμισμένα δάση, και >0,6 για τα αποψιλωμένα τοπία. Ο RFDI μπορεί να χρησιμοποιηθεί με εικόνες διπλής πόλωσης, όπως το ALOS PALSAR.

Χρησιμοποιώντας δεδομένα από τις ίδιες δορυφορικές τροχιές, η γεωμετρία και η γωνία επίπτωσης δεν διαφέρουν σε σχέση με τα εικονοστοιχεία SAR, επιτρέποντας έτσι, την χρονική ανάλυση του RFDI χωρίς ανησυχίες για αλλαγές στη γεωμετρία και τη γωνία επίπτωσης. Στην πραγματικότητα, ο RFDI από δορυφορικές εικόνες όπως του ALOS PALSAR ή του Sentinel μπορεί να υπολογιστεί χωρίς καμία διόρθωση για τη συχνότητα γωνίας και την τοπογραφία. Η κύρια εφαρμογή του RFDI είναι ως δείκτης για την παρακολούθηση των αλλαγών στη δασική κάλυψη λόγω της αποψίλωσης και της υποβάθμισης. Οι χαμηλές τιμές αναφέρονται σε δάση όπου η επίδραση της αλληλεπίδρασης όγκου-επιφάνειας είναι είτε μικρή (π.χ. δάση με μικρότερους μίσχους και πυκνές επιφάνειες) ή σχετικά ίσα και στα δύο κανάλια (π.χ. δάση πάνω από πλαγιές). Οι υψηλές τιμές αναφέρονται σε δάση με μεγάλες διαφορές μεταξύ HH και HV, υποδηλώνοντας ότι είναι ανοικτά ή πρόσφατα υποβαθμισμένα δάση, ή πλημμυρισμένα δάση. Θεωρητικά, ο RFDI μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε ανάλυση ραντάρ. Ωστόσο, η καλύτερη χωρική ανάλυση για την ανάπτυξη RFDI εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το θόρυβο κηλίδας στο backscatter του ραντάρ και τη φυσική ετερογένεια της δομής των δασών και τις διακυμάνσεις του μεγέθους του χάσματος πάνω από το τοπίο, όπου η συμβολή της αλληλεπίδρασης του όγκου-επιφάνειας είναι μεγαλύτερη σε HH σε σύγκριση με HV τιμών επανασκέδασης. Γενικά, ο RFDI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση τόσο της απώλειας δασικής κάλυψης, όσο και της ανάκαμψής της από διαταραχές που προκύπτουν από υλοτομία ή άλλους τύπους φυσικών ή ανθρωπογενών επιπτώσεων.

### 2.5.9 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Η εκτέλεση όλων των απαραίτητων αποτελεσμάτων επεξεργασίας στις SAR εικόνες, οι οποίες έχουν διορθωθεί για επιπτώσεις εδάφους μέσω τεχνικών RTC (radiometric terrain correction) και προβάλλονται στο έδαφος σε ένα συγκεκριμένο διάστημα εικονοστοιχείων (π.χ. 25m – 100m) ανάλογα με την αρχική ανάλυση της εικόνας. Βασικές τεχνικές παρουσιάζονται στην συγκεκριμένη ενότητα για την εκτίμηση της βλάστησης ή του δασικού AGB. Έτσι θα παρουσιαστούν η γενική σχέση μεταξύ της βιομάζας και των μετρήσεων ραντάρ, η ανάπτυξη στατιστικών μοντέλων συγκεκριμένων τοποθεσιών είτε από αερομεταφερόμενα είτε από δορυφορικά δεδομένα ραντάρ, ανάπτυξη ενός φυσικού μοντέλου που περιλαμβάνει διαφορετικά στοιχεία στον πίνακα σκέδασης και χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για την χαρτογράφηση βιομάζας μεγάλης κλίμακας.

### 2.5.10 ΓΕΝΙΚΗ ΣΧΕΣΗ PANTAP-BIΟΜΑΖΑΣ

Για να αναπαραστήσει τη σχέση μεταξύ μετρήσεων ραντάρ και AGB, αυτή η ενότητα επικεντρώνεται σε χαμηλή συχνότητας – μεγάλου μήκους κύματος, συστήματα ραντάρ L-band λόγω της διαθεσιμότητας από το διάστημα μέσω του δορυφόρου ALOS PALSAR και λόγω της ισχυρής ευαισθησίας επανασκέδασης που παρουσιάζει στα επίπεδα βιομάζας με εύρος χαμηλού έως μεσαίου. Ωστόσο μερικά αποτελέσματα εμφανίζονται και παρατίθενται από τις μπάντες C και P εικόνων SAR, οι οποίες είναι διαθέσιμες από τον δορυφόρο Sentinel και από την αποστολή Biomass της ESA αντίστοιχα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι κυρίαρχοι μηχανισμοί σκέδασης καθώς και το μέγεθος (όγκος) και η διηλεκτρική σταθερά (υγρασία ή πυκνότητα ξύλου) των δασών καθορίζουν το μέγεθος και την συμπεριφορά της επανασκέδασης σε κάθε πόλωση του AGB. Ως αποτέλεσμα, η ενέργεια επανασκέδασης του ραντάρ σε γραμμικές πολώσεις σχετίζεται με τον όγκο και την βιομάζα των δασικών συστατικών.

Οι σχέσεις της επανασκέδασης της βιομάζας από δεδομένα L-band από τον δορυφόρο ALOS PALSAR και αερομεταφερόμενα δεδομένα P-band διάφορων περιοχών μελέτης βασίζονται στην άμεση σύγκριση των μετρήσεων ραντάρ και του AGB του εδάφους. Η μορφή της σχέσης υποδηλώνει ότι υπάρχει μια γρήγορη άνοδος επανασκέδασης στα επίπεδα χαμηλής βιομάζας και στη συνέχεια μια πιο αργή αύξηση σε μια ασυμπτωματική τιμή σε υψηλότερα επίπεδα βιομάζας. Στην περίπτωση της L-band, το ασυμπτωματικό μπορεί να φτάσει σε τιμές περίπου 100 Mg / ha ή και περισσότερο ανάλογα με τον τύπο του δάσους, ενώ στην περίπτωση της P-band το ασυμπτωματικό μπορεί να φτάσει τα 300 Mg / ha ή υψηλότερο. Αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο η μορφή της σχέσης όσο και οι τιμές κορεσμού ή του ασυμπτωματικού μπορούν να αλλάξουν σημαντικά ανάλογα με την ποιότητα και την ανάλυση δεδομένων. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για σύγκριση εικόνων ραντάρ είναι μικρά. Επομένως η ισχύς της επανασκέδασης μπορεί να είναι θορυβώδης λόγω της παρουσίας στίγματος στην παρουσία ραντάρ. Τα θορυβώδη δεδομένα μπορούν να προκαλέσουν ψευδή κορεσμό σε χαμηλότερες τιμές βιομάζας. Μεγαλύτερες εκτάσεις άνω των 100 μέτρων σε μέγεθος θα βελτιώσουν αισθητά την σχέση αυτή. Σφάλματα γεωγραφικής θέσης τόσο σε SAR όσο και σε εδαφικές τοποθεσίες εμφανίζουν θόρυβο στα δεδομένα κατά την σύγκριση επιφανειών και της επανασκέδασης. Παρόμοιο με την έκταση το σφάλμα γεωγραφικής θέσης μπορεί να προκαλέσει ψευδή κορεσμό. Η χρήση μεγαλύτερων εκτάσεων και εικονοστοιχείων μέσου όρου SAR μειώνουν τα γεωγραφικά σφάλματα.

Αλλαγές στην γεωμετρία του SAR στις εκτάσεις μπορεί να εισάγουν θόρυβο στα δεδομένα επηρεάζοντας έτσι την σχέση και το επίπεδο κορεσμού της σχέσης ραντάρ και βιομάζας. Αν η εικόνα δεν έχει υποστεί ραδιομετρική διόρθωση, οι εκτάσεις με παρόμοια βιομάζα εμφανίζουν σημαντικές διαφορές στην επανασκέδαση. Περιβαλλοντικές διαφορές και αλλαγές στην υγρασία του εδάφους στην επανασκέδαση μπορούν να εμφανίσουν θόρυβο στην σχέση. Με την χρήση πολυχρονικών εικόνων SAR θα επιτραπεί η καταγραφή του μέσου όρου των επιπτώσεων της υγρασίας και θα βελτιωθούν οι τιμές επανασκέδασης. Με αυτόν τον τρόπο γίνονται πιο σταθερές χωρικά και χρονικά για την εκτίμηση της βιομάζας. Οι διαφορές στο χρόνο απόκτησης της εικόνας και δεδομένων έκτασης μπορούν επίσης να παρουσιάσουν θόρυβο στην σχέση. Εάν τα αποθέματα εκτάσεων έχουν καθοριστεί πολύ καιρό πριν ή μετά την απόκτηση δεδομένων SAR, οι αλλαγές στην βιομάζα και στην δομή του δάσους τόσο η διαταραχή όσο και η ανάκαμψη σε αυτή την περίοδο θα επηρεάσει την επανασκέδαση του ραντάρ. Συνιστάται η ελαχιστοποίηση μεταξύ εδαφικών παρατηρήσεων και παρατηρήσεων ραντάρ.

### 2.5.11 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ RADAR-BIOMASS

Ανάλογα με το μήκος κύματος της μέτρησης, η επανασκέδαση από ένα δάσος μπορεί να σχετίζεται με την διασπορά ζωντανών στελεχών, κλαδιών και φυλλωμάτων που βασίζονται στην αφθονία και την υγρασία μέσα σε ένα κελί ανάλυσης:  $\gamma_{pq}^0 \propto f_{pq}(n_i, V_i, \epsilon_i)$

Όπου το  $f$  είναι μια συνάρτηση κατά μέσο όρο όλων των πιθανών προσανατολισμών και κατανομών μεγέθους, το  $p$  και το  $q$  αντιπροσωπεύουν την μεταδιδόμενη και την λαμβανόμενη πόλωση (HV), το  $n_i$  αντιπροσωπεύει την πυκνότητα των δέντρων, το  $v_i$  αντιπροσωπεύει τον όγκο των δέντρων και το  $\epsilon_i$  αντιπροσωπεύει την υγρασία ή την διηλεκτρική σταθερά των στοιχείων του δάσους (κλαδιά και φύλλα). Αυτή η εξίσωση αντιπροσωπεύει την σχέση της επανασκέδασης με την δομή του δάσους και την πυκνότητα του ξύλου, μαζί με τις κατανομές προσανατολισμού και μεγέθους του δέντρου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία ενός μοντέλου εκτίμησης της δασικής βιομάζας ή του δασικού όγκου. Εκτός από την δομή του δάσους και της βιομάζας άλλοι παράμετροι όπως η υγρασία του εδάφους και η δομή του εδάφους (κλίση και τραχύτητα) επηρεάζουν τη λειτουργία του δορυφόρου. Το πιο σημαντικό έργο στην εκτίμηση δασικής βιομάζας ραντάρ είναι η ανάπτυξη του μοντέλου  $f_{pq}$ . Η αναλογία αυτού του μοντέλου στις δασικές εφαρμογές είναι να σχεδιαστεί μια παραμετρική παλινδρομική σχέση για άμεση εκτίμηση του AGB σε σχέση με την δομή του δάσους. Παρακάτω, παρέχονται ανάλογα με το μήκος κύματος της μέτρησης:

- Η επανασκέδαση του ραντάρ είναι ραδιομετρικά διορθωμένη, κανονικοποιείται για γωνία επίπτωσης ( $\gamma_{pq}$ ) και μετατρέπεται σε γραμμικές μονάδες και όχι σε λογαριθμική κλίμακα (dB). Η μετατροπή αυτή γίνεται με την εξίσωση  $10^{(0.1 \text{ dB})}$ , όπου το dB αναφέρεται σε τιμές επανασκέδασης (backscatter) σε dB, οι οποίες έχουν συχνά αρνητικό αριθμό.
- Το μέγεθος του plot είναι αρκετά μεγάλο και έχει καλή γεωγραφική θέση και σχήμα για να ταιριάζει με τα εικονοστοιχεία ραντάρ.
- Τα δεδομένα backscatter του συστήματος ραντάρ είναι από εικόνες πολλών μετρήσεων για την παροχή αρκετά μεγάλων εικονοστοιχείων με μειωμένο θόρυβο κηλίδας.
- Η επανασκέδαση του ραντάρ επίπεδου plot, σε κάθε πόλωση, ή για τους δείκτες βλάστησης, προέρχεται από τον μέσο όρο της επανασκέδασης εικονοστοιχείων στη γραμμική μονάδα (Linear).

Εδώ, παρουσιάζεται ένα στατιστικό μοντέλο με βάση τον μη γραμμικό συνδυασμό της επανασκέδασης του ραντάρ για την εκτίμηση βιομάζας. Με βάση προηγούμενες μελέτες, το μοντέλο παλινδρόμησης βρίσκεται μεταξύ μιας άγνωστης ισχύος της AGB και ενός γραμμικού συνδυασμού μετρήσεων επανασκέδασης σε τρεις πολώσεις (Ranson & Sun 1994, Saatchi et al. 2007, Saatchi et al. 2011):  $AGB^\lambda = a_0 + a_1\gamma_{HH}^0 + a_2\gamma_{HV}^0 + a_3\gamma_{VV}^0$

Όπου οι άγνωστοι συντελεστές ( $\lambda, a_0, a_1, a_2, \text{ και } a_3$ ) προσδιορίζονται στατιστικά με τη χρήση μετρήσεων ραντάρ και δεδομένων πεδίου. Το παραπάνω μοντέλο έχει το πλεονέκτημα ότι είναι ευέλικτο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για μία μόνο πόλωση, όπως  $\gamma_{HV}^0$ , ή για πολλαπλή πόλωση. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει άλλες πληροφορίες, όπως η εκτίμηση του ιντερφερομετρικού ύψους από ραντάρ ή οποιαδήποτε άλλη φασματική πληροφορία για τη βελτίωση της πρόβλεψης του μοντέλου. Η ισχύς  $\lambda$  για AGB έχει σχεδιαστεί για να ρυθμίζει την ασύμπτωτη στο μοντέλο.

Υπάρχουν και άλλες επιλογές για την εκτίμηση του AGB από συντελεστές επανασκέδασης που έχουν χρησιμοποιηθεί σε εύκρατα και τροπικά δάση (Saatchi et al. 2007):  $\log \log(AGB) = \alpha_0 + \alpha_1\gamma_{HH}^0 + \alpha_2(\gamma_{HH}^0)^2 + b_1\gamma_{HV}^0 + b_2(\gamma_{HV}^0)^2 + c_1\gamma_{VV}^0 + c_2(\gamma_{VV}^0)^2$

Αυτές οι εξισώσεις έχουν μεγαλύτερο αριθμό συντελεστών για να καθορίσουν, αλλά αποδίδουν καλύτερα την διασφάλιση ότι η ασύμπτωτη στη σχέση επανασκέδασης-βιομάζας του ραντάρ παρουσιάζεται καλά στο μοντέλο.

### 2.5.12 ΦΥΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ RADAR-BIOMASS

Τα φυσικά μοντέλα έχουν συχνά πολύπλοκη διατύπωση και περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό μεταβλητών που καλύπτουν τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα, την γεωμετρία των μετρήσεων και τα χαρακτηριστικά των δασών. Υπάρχουν διάφοροι τύποι φυσικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των μετρήσεων ραντάρ των δασικών επιφανειών. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το μοντέλο βασίζεται στη διαμόρφωση των τριών κυρίαρχων μηχανισμών σκέδασης ραντάρ που ανασφάλίζουν την ισχύ από τα στρώματα βλάστησης. Σε αυτές περιλαμβάνονται ο όγκος, η επιφάνεια όγκου και η σκέδαση επιφάνειας:  $\gamma^0 = \gamma_{\text{vol}}^0 + \Gamma_{\text{surf}}\gamma_{\text{vol-surf}}^0 + \Gamma_{\text{vol}}\gamma_{\text{surf}}^0$

Όπου  $\gamma_{\text{vol}}$  είναι ο όγκος επανασκέδασης από την βλάστηση,  $\gamma_{\text{vol-surf}}$  είναι ο όγκος forward scattering από την βλάστηση,  $\gamma_{\text{surf}}$  είναι η σκέδαση από την επιφάνεια του εδάφους,  $\Gamma_{\text{vol}}$  είναι η εξασθένιση του όγκου (απορρόφηση), και  $\Gamma_{\text{surf}}$  είναι η ανακλαστικότητα επιφάνεια του εδάφους.

Εδώ, το μοντέλο ταιριάζει μόνο για μία πόλωση, και η μεθοδολογία για την ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων που περιλαμβάνουν τη φυσική διατύπωση δίνεται. Η HV πόλωση έχει συνήθως καλύτερη ευαισθησία στο δάσος AGB από τη HH ή VV πόλωσης, ωστόσο έχει λιγότερη ευαισθησία στην επιφάνεια του εδάφους και την υγρασία. Μια άλλη εστίαση είναι στα L-band δεδομένα, καθώς φαίνεται να είναι τα ευρέως χρησιμοποιούμενα δεδομένα από το δορυφόρο ALOS PALSAR. Ωστόσο, η μεθοδολογία μπορεί να λειτουργήσει τόσο για L-band και για C-band σε διαφορετικό εύρος βιομάζας ανάλογα με την ευαισθησία κάθε αισθητήρα. Σε δάση όπου η πυκνότητα της επιφάνειας τους δεν είναι τόσο πυκνή, όπως για παράδειγμα τα κωνοφόρα δάση, το μέγεθος, η ευαισθησία στην βιομάζα και οι συνεισφορές κάθε στοιχείου σκέδασης μπορεί να είναι διαφορετικές. Για παράδειγμα, στα αρκτικά δάση, το backscatter της L-band μπορεί ενδεχομένως να έχει σημαντικές συνεισφορές από τον επιφανειακό όγκο με δυνητικά ενισχυμένη ευαισθησία στη δασική βιομάζα και την υγρασία του εδάφους. Η δυνατότητα αυτή διερευνάται με την τοποθέτηση μορφής εξίσωσης που περιλαμβάνει τόσο τον όγκο όσο και την σκέδαση όγκου-επιφάνειας:  $\gamma^0 = AW^a(1 - e^{-BW}) + (CW^\beta + D)Se^{-BW}$

όπου A, B, C, D, a, and  $\beta$  είναι οι συντελεστές και οι άγνωστοι είναι το W (AGB) και το S (η κατάσταση της επιφάνειας του εδάφους). Ο όρος S περιλαμβάνει την ανακλαστικότητα της επιφάνειας που εξαρτάται κυρίως από την υγρασία της επιφάνειας του εδάφους. Μετά την ανάπτυξη του μοντέλου για το σημείο μελέτης, το επόμενο βήμα είναι να εκτιμηθεί AGB από το μοντέλο. Η διαδικασία εκτίμησης βιομάζας από το μοντέλο βασίζεται στην μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων ώστε η λειτουργία να μπορεί να αντιστραφεί για να εκτιμηθεί το w και το s. Εάν τα μόνα δεδομένα που διατίθενται είναι από τον ALOS PALSAR, ο οποίος παρέχει εικόνες διπλής πόλωσης σε HH και HV σε σχεδόν παγκόσμια κλίμακα, η μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων μπορεί να είναι γραμμένη ως:  $LOSS = \sum_{t=1}^n \left\{ [\eta_{HH}(f_{HH}(W, S_t) - \gamma_{HV,t})]^2 + [\eta_{HV}(f_{HV}(W, S_t) - \gamma_{HV,t})]^2 \right\}$

όπου  $\eta = 1$  για HH, ή 3,5 για HV. Η συνάρτηση Loss θα ελαχιστοποιηθεί σε μια προσέγγιση ελάχιστων τετραγώνων για την εκτίμηση του W και του S σε κάθε pixel. Αξίζει να σημειωθεί ότι με πολλαπλές εικόνες SAR που αποκτήθηκαν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές t, η ανωτέρω εξίσωση χρησιμοποιείται επιτρέποντας τον εδαφολογικό όρο S να

αλλάξει μέσα στο χρόνο, αλλά το  $W$  (AGB) παραμένει σταθερό για τη βελτίωση της προσέγγισης εκτίμησης. Αυτό προϋποθέτει ότι για μια περίοδο, σεζόν ή λίγους μήνες, για την συσσώρευση δεδομένων ραντάρ πολλαπλών προτύπων, το AGB παραμένει σταθερό ή έχει κάποια μη ανιχνεύσιμη αλλαγή, εκτός εάν εμφανίζεται μια σημαντική διαταραχή.

Η παραπάνω διατύπωση σχεδιάστηκε για να αποδείξει ότι ένας εμπειρικός η φυσικός αλγόριθμος μπορεί να προκύψει για ένα οικοσύστημα ή ένα τύπο δάσους και να εφαρμοστεί σε μεγάλες περιοχές. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω του γεγονότος ότι τα στατιστικά μοντέλα αναπτύχθηκαν με βάση τα δεδομένα πεδίου σε μια μικρή περιοχή και έτσι, μπορεί να έχουν μεγάλα σφάλματα όταν εφαρμόζονται σε περιοχές μακριά από την αρχική περιοχή δοκιμής λόγω πιθανών διακυμάνσεων στην τοπογραφία του τοπίου, την τραχύτητα, και τη δομή της βλάστησης.

Ωστόσο, ο εμπειρικός αλγόριθμος βασίζεται περισσότερο στη φυσική του προβλήματος και αντισταθμίζει το τοπίο και τις περιφερειακές διακυμάνσεις. Σε μια πιο αυστηρή εφαρμογή του προβλήματος, η λειτουργία Loss μπορεί επίσης να βελτιστοποιηθεί τοπικά, ενημερώνοντας τους συντελεστές του μοντέλου (A, B, C, D) πάνω από ένα τοπικό παράθυρο εικονοστοιχείων ( $3 \times 3$  ή  $5 \times 5$  ή μεγαλύτερο) ώστε το μοντέλο να είναι καλύτερο και να προσαρμόζεται στις τοπικές διακυμάνσεις της δασικής δομής εντός ενός οικοσυστήματος.

Μια απλούστερη έκδοση του αλγόριθμου φυσικής βάσης έχει εφαρμοστεί σε λίγες περιπτώσεις. Ο Γιου και ο Σαάτσι (2016) χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο που δίνει έμφαση περισσότερο στη σκέδαση του όγκου και συνδυάζει την επιφάνεια τόσο στην αλληλεπίδραση όγκου-επιφάνειας όσο και στη σκέδαση επιφάνειας ως άγνωστος όρος:  $\gamma^0 = AW^a(1 - e^{-BW}) + C$

όπου  $W$  είναι AGB σε Mg/ha και A, B, Γ, και  $a$  είναι κατάλληλοι συντελεστές. Η παραπάνω εξίσωση έχει χρησιμοποιηθεί για το μοντέλο παραλλαγών του ALOS PALSAR σε σχέση με την παγκόσμια βιομάζα βλάστησης (Yu & Saatchi 2016).

Ο Bouvet (2018) χρησιμοποίησε μια ελαφρώς απλούστερη έκδοση του μοντέλου που μπορεί να αντιστραφεί αναλυτικά, αν και με λιγότερη ευελιξία για την ρύθμιση της ασύμπτωτης. Στην εκδοχή του, το μοντέλο είναι σε τιμές ντεσιμπέλ της επανασκέδασης του συντελεστή:  $\gamma^0 = A(1 - e^{-BW}) + Ce^{-BW}$

Αυτή η διατύπωση αγνοεί τη σκέδαση όγκου-επιφάνειας και λαμβάνει υπόψη μόνο τον όγκο και την επιφανειακή σκέδαση. Η σύνθεση αντιστοιχεί στο Water Cloud Model (Santoro et al. 2002), μια προσαρμογή του αρχικού Μοντέλου Υδατικού Νέφους (Attema & Ulaby 1978) που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την εκτίμηση της βιομάζας βλάστησης σε υψηλότερες συχνότητες, όπως η ζώνη C. Το παραπάνω μοντέλο έχει ήδη χρησιμοποιηθεί για L-band στοιχεία από διάφορους συγγραφείς (Cartus et al. 2012, Mermoz et al. 2014, Michelakis et al. 2014, Mitchard et al. 2011).

## 2.6 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΑΠΟΣΤΟΛΕΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

### 2.6.1 Η ΑΠΟΣΤΟΛΗ GEDI

Ο στόχος του δορυφόρου GEDI είναι να χαρακτηρίσει τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και των χρήσεων γης στη δομή οικοσυστήματος με σκοπό την τη βελτίωση της ποσοτικοποίησης και της κατανόησης του κύκλου άνθρακα και της βιοποικιλότητας της Γης. Επικεντρώθηκε σε τροπικά και εύκρατα δάση από την πλεονεκτική θέση της στο Διεθνές διαστημικό σταθμό (ISS), ο GEDI χρησιμοποιεί έναν αισθητήρα lidar (υπέρυθρο

μήκος κύματος 1.064-nm) για να παρέχει τις πρώτες παρατηρήσεις δειγματοληψίας υψηλής ανάλυσης (25 m) της δομής των δασών παγκόσμια. Ο GEDI αντιμετωπίζει τρία βασικά επιστημονικά ερωτήματα: (1) Ποιο είναι το υπέργειο ισοζύγιο άνθρακα της επιφάνειας της γης; (2) Ποιος θα είναι ο ρόλος της επιφάνειας εδάφους στον μετριασμό του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> τις επόμενες δεκαετίες; (3) Πώς η δομή του οικοσυστήματος θα επηρεάσει την ποιότητα των οικοτόπων και τη βιοποικιλότητα; Η απάντηση σε αυτά τα ερωτήματα είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της μελλοντικής πορείας της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής και της βιοποικιλότητας της Γης.

Ο GEDI αναλύει αυτές τις ερωτήσεις της επιστήμης με τη συλλογή ~ 12 δισεκατομμυρίων lidar παρατηρήσεων κατά τη διάρκεια μιας διετούς σε διάρκεια ζωής αποστολής. Το σύστημα χρησιμοποιεί τρεις πομπούς λέιζερ, οι οποίοι χωρίζονται σε πέντε δοκούς που παράγουν 10 παράλληλες διαδρομές εδάφους των 25-m. Ο Gedi θα παράγει εκτιμήσεις σε μετρήσεις ύψους, ανύψωσης και κατακόρυφου θόλου. Οι μετρήσεις 25 m (~0,0625 εκτάρια) χρησιμοποιούνται για το μοντέλο AGB και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για να αντλήσει τον μέσο όρο AGB και τη διακύμανση σε ένα πλέγμα 1 χιλιομέτρου.

Από το πλεονεκτικό της σημείο στον ISS, ο GEDI επικεντρώνεται σε τροπικά και εύκρατα δάση μεταξύ 51,5°S και 51,5°B. Η στρατηγική βαθμονόμησης της βιομάζας του GEDI είναι η ανάπτυξη παγκοσμίως αντιπροσωπευτικών μοντέλων προ-εκκίνησης για το αποτύπωμα AGB χρησιμοποιώντας αερομεταφερόμενα δεδομένα σάρωσης με λέιζερ (ALS) και δεδομένα απογραφής παρατηρητηρίων. Το μέσο και τυπικό σφάλμα του AGB για κελιά πλέγματος 1 χιλιομέτρου στη συνέχεια εκτιμάται από το πρότυπο αποτύπωμα AGB μέσω στατιστικών συμπερασμάτων. Η βασική απαίτηση για το gedi είναι ότι το τυπικό σφάλμα των εκτιμήσεων AGB εντός του 80% του δικτυωμένου προϊόντος επιπέδου 4B σε κυσέλες 1 χιλιομέτρου θα είναι <20 Mg ανά εκτάριο ή 20%. Τα επιστημονικά προϊόντα του GEDI αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας μια σειρά αερομεταφερόμενων μοντέλων για την εκτίμηση της βιομάζας από κυματομορφές GEDI. Αυτά τα σύνολα δεδομένων λαμβάνονται συνολικά από το δείγμα για να είναι αντιπροσωπευτικά των κύριων τύπων δασών.

### 2.6.2 Η ΑΠΟΣΤΟΛΗ NISAR

Η αποστολή NISAR είναι ένα κοινό έργο μεταξύ της NASA και ISRO να αναπτύξουν και να ξεκινήσουν τον πρώτο διπλής συχνότητας δορυφόρο SAR. Η NASA θα παρέχει την L-band (24-cm μήκος κύματος), και η ISRO θα παρέχει το S-band (μήκος κύματος 12 cm). Η αποστολή θα αποκτήσει πολωσιμετρικές και ιντερφερομετρικές παρατηρήσεις σε άνευ προηγουμένου κάλυψη στο χώρο και το χρόνο, η οποία έχει βελτιστοποιηθεί για τη μελέτη των αλλαγών της επιφάνειας της γης παγκοσμίως.

Η NISAR θα επικεντρωθεί στα πιο δυναμικά οικοσυστήματα όπως τα διαταραγμένα και αναρρωμένα δάση, τους πλημμυρισμένους υγροτόπους και τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Η NISAR θα μετρήσει την υπέργεια ξυλώδης βιομάζα βλάστησης και την διαταραχή και την ανάκαμψή της σε παγκόσμιο επίπεδο σε κλίμακα εκταρίων. Η ακρίβεια βιομάζας πρέπει να είναι 20 Mg/ha ή καλύτερη για περιοχές ξυλώδους βιομάζας ≤100 Mg/ha άνω του 80% τουλάχιστον των περιοχών αυτών. Ως εκ τούτου, η αποστολή θα επικεντρωθεί σε περιοχές χαμηλής βιομάζας, που καλύπτουν ένα σημαντικό τμήμα των αρκτικών, εύκρατων, και των δασικών εκτάσεων σαβάνας. Θα παρέχουν εποχιακές έως ετήσιες παρατηρήσεις της αλλαγής της βιομάζας στα πιο δυναμικά δάση που επηρεάζονται από την διαταραχή του AGB και την αποκατάσταση. Η αποστολή NISAR θα είναι σε θέση να παρέχει παρατηρήσεις διπλής πόλωσης (HH, HV) L-band κάθε 12 ημέρες σε αύξουσα και φθίνουσα τροχιά που καλύπτει παγκόσμια δάση κάθε 6 ημέρες. Αυτές οι

παρατηρήσεις θα χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή χαρτών κατανομής της δασικής βιομάζας σε κύτταρα πλέγματος 1 εκταρίων. Το ραντάρ της NISAR έχει σχεδιαστεί για παγκόσμιες μετρήσεις InSAR, αλλά τα επιστημονικά προϊόντα που παράγονται δεν περιλαμβάνουν άμεσες πληροφορίες σχετικά με την κάθετη δομή δασών. Αντίθετα, το AGB εκτιμάται από backscatter μετρήσεις και εκμεταλλεύεται είτε εμπειρικές στατιστικές προσεγγίσεις είτε αναστροφή φυσικών μοντέλων σκέδασης που πρέπει να βαθμονομηθούν σε χώρους μελέτης σε παγκόσμιο επίπεδο για τη σύλληψη της δομής και της σύνθεσης διάφορων δασών στις διαφορετικές οικοπεριφέρειες.

Ο αλγόριθμος της NISAR βασίζεται σε αναλυτικό εμπειρικό μοντέλο με συντελεστές που βαθμονομούνται με πληροφορίες δομής και βιομάζας από μετρήσεις εδάφους. Τα δεδομένα απογραφής δασών είναι διαθέσιμα σε ένα δίκτυο παρατηρητηρίων βαθμονόμησης κατανεμημένων σε παγκόσμιο επίπεδο σε διαφορετικές οικοπεριφέρειες και συνοδεύονται από παρατηρήσεις lidar για την επέκταση των παρατηρήσεων εδάφους και ώστε να καταστεί δυνατή η επικύρωση των χωρικών παραλλαγών της AGB.

Το μέγεθος των οικοπέδων που χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση του αλγορίθμου NISAR πρέπει να είναι είτε >1 εκτάριο εάν χρησιμοποιείται απευθείας με τα δεδομένα SAR, ή μικρότερα (~0,25 εκτάρια) εάν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με παρατηρήσεις ALS. Επιπλέον, τα δεδομένα δασικών αποθεμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση και την αναφορά της αβεβαιότητας της NISAR AGB σε εθνική ή περιφερειακή κλίμακα και για τη λογιστική και τις αξιολογήσεις του άνθρακα.

### 2.6.3 Η ΑΠΟΣΤΟΛΗ BIOMASS

Η Biomass, η έβδομη αποστολή της ESA ξεκίνησε τη χρονική περίοδο 2020-2021 και έχει ως στόχο την παροχή κρίσιμων πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση των δασών και τον τρόπο με τον οποίο αλλάζουν παγκοσμίως. Σκοπός της αποστολής είναι η παροχή εκτιμήσεων του ύψους και του AGB στα δάση του κόσμου. Η επιστημονική περίπτωση στην οποία επιλέχθηκε η Biomass βασίζεται στην ικανότητά να παρέχει εκτιμήσεις της AGB, εντός πυκνών τροπικών δασών, καθώς και την παρακολούθηση της αποθήκευσης τους και των διαταραχών που υπάρχουν σε εποχιακή και ετήσια συχνότητα. Ο στόχος της αποστολής Biomass είναι η εκτίμηση της δασικής βιομάζας με ακρίβεια  $\leq 20\%$  για περισσότερο από το 67% των περιοχών με βιομάζα >50 Mg/ha σε κελί χωρικού πλέγματος 4 εκταρίων (200 m x 200 m pixel) κάθε έξι μήνες, για περίοδο πέντε ετών διάρκειας της αποστολής. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με τη χρήση αισθητήρα SAR p-band (μήκος κύματος 70 cm), λόγω των μοναδικών δυνατοτήτων του να διαπερνά ακόμη και πυκνά τροπικά δάση. Οι μετρήσεις θα παρέχουν πολωσιμετρική σκέδαση (HH, HV, VH, VV) και ιντερφερομετρική παρατήρηση με δυνατότητα PolInSAR για την εκτίμηση του ύψους του δάσους και την ικανότητα TomoSAR για επανασκέδαση κάθετων μετρήσεων. Επιπλέον, η αποστολή Biomass θα παρέχει παγκόσμιους χάρτες με τα ύψη των δασών στην ίδια χωρική κλίμακα 4 εκταρίων για όλα τα δάση >10-m ύψους με ακρίβεια 30% και θα περιλαμβάνουν ένα παγκόσμιο χάρτη αποψίλωσης 50x50m κάθε έξι μήνες. Οι μετρήσεις αυτές, θα βελτιώσουν σημαντικά την ικανότητα μείωσης της αβεβαιότητας στον παγκόσμιο κύκλο άνθρακα παρέχοντας χωρικά αναδιαμορφωμένες και χρονικά συχνές παρατηρήσεις των ροών άνθρακα στα δασικά οικοσυστήματα. Η κάλυψη της Biomass είναι παγκόσμια με περιορισμό, που επιβάλλεται από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ Σταθμοί ραντάρ παρακολούθησης διαστημικών αντικειμένων (SOTR), στην Ευρώπη και τη Βόρεια και Κεντρική Αμερική. Υπό αυτούς τους περιορισμούς, μόνο το 3% της κάλυψης των αποθεμάτων άνθρακα AGB χάνεται στο τροπικό δάσος, το οποίο



αποτελούσε το 66% των παγκόσμιων αποθεμάτων άνθρακα AGB το 2005. Η απώλεια είναι πιο σημαντική στο εύκρατο (72%), αρκτικό (37%), και μισοτροπικό (29%) δάσος.

Οι απαιτήσεις βαθμονόμησης/επικύρωσης (CAL/VAL) της Biomass επικεντρώνεται κυρίως στα οικοσυστήματα τροπικών δασών, όπου βρίσκεται και το μεγαλύτερο μέρος των παρατηρήσεων της αποστολής. Οι αλγόριθμοι βιομάζας και δομής απαιτούν μεγάλα οικόπεδα (>4 εκτάριο) ή AGB εκτιμήσεις από αερομεταφερόμενες παρατηρήσεις.

Αυτές οι μετρήσεις πρέπει να αντιπροσωπεύουν τις διακυμάνσεις δομικών τύπων τροπικών δασών και αλλομετρικών χαρακτηριστικών και πρέπει να επαναλαμβάνονται κατά τη διάρκεια της αποστολής ώστε να είναι δυνατή η επικύρωση τόσο των αποθεμάτων βιομάζας όσο και των μεταβολών διαταραχών και αποκατάστασης.

### 3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 3.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Το δημόσιο δάσος «Κονόσπολης-Διάβας», το οποίο περιλαμβάνει τα δημόσια δάση Κονόσπολης Συκαμινέας και Διάβας Ελασσόνας εξετάζεται σαν σύνολο.



Εικόνα 3.1 Περιοχή μελέτης (Google Maps)

Τα πετρώματα της περιοχής αποτελούνται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό από αργιλικό σχιστόλιθο, καθώς και από ασβεστόλιθο και ψαμμίτη. Οι κλίσεις του εδάφους κυμαίνονται σε εύρος ομαλών έως απότομων με επικρατέστερες αυτές των 25-45%. Το έδαφος, ως προϊόν αποσάθρωσης των ανωτέρω πετρωμάτων, παρουσιάζει διαφορετική σύνθεση και γονιμότητα από λίαν καλή έως καλή. Έτσι, αλλού είναι αμμοαργιλώδες και αλλού αργιλοαμμώδες με βάθος το οποίο κυμαίνεται από αβαθές μέχρι μέσου βάθους και σε ορισμένα σημεία βαθύ. Γενικά το έδαφος, όπως συμπεραίνεται από επιτόπιες παρατηρήσεις, είναι ευμενές για την περαιτέρω ανάπτυξη της υπάρχουσας δασικής βλάστησης. Στις μεσημβρινές κυρίως κλιτύες του δάσους, οι οποίες ως επί των πλείστον καλύπτονται από αείφυλλα πλατύφυλλα, κυριαρχούν τα παραμεσόγεια ξηρά εδάφη, ενώ στις εκτάσεις που καλύπτονται από φυλλοβόλα πλατύφυλλα και από Μ. Πεύκη κυριαρχούν τα παραμεσόγεια δασικά εδάφη. Το γενικό κλίμα της περιοχής εντός του οποίου αναπτύσσεται το μελετώμενο δάσος χαρακτηρίζεται ως ήπιο ηπειρωτικό. Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας είναι ομαλές, χωρίς μεγάλες απότομες μεταπτώσεις κατά την χειμερινή περίοδο. Κατά την θερινή περίοδο η θερμοκρασία δεν φθάνει στο δυσμενές όριο για την ανάπτυξη των δασικών φυτών. Δεν παρατηρούνται κατά τον χειμώνα βλαπτικοί παγετοί αν και οι θερμοκρασίες του αέρος και του εδάφους είναι συνήθως χαμηλές. Η σχετική υγρασία παρουσιάζεται σχετικά υψηλή. Επικρατούντες άνεμοι είναι βόρειοι και βορειοανατολικοί των οποίων η θερμοκρασία είναι χαμηλή και η ταχύτητά τους μεγάλη. Γενικά οι κλιματικές συνθήκες είναι ευνοϊκές για την ανάπτυξη της δασικής βλάστησης. Η έκτασή του, σύμφωνα με τη διαχειριστική μελέτη, ανέρχεται σε 1.755, 54 ha.



Εικόνα 3.2 Χάρτης επαρχίας Ελασσόνας (Ellassona.com)

### 3.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Πριν την ανάλυση δεδομένων για την εκτίμηση της βιομάζας υπάρχουν πέντε πρακτικές προσεγγίσεις στην επεξεργασία δεδομένων SAR:

- Λήψη των εικόνων έντασης SAR σε οποιαδήποτε μορφή και δημιουργία εικόνων σε γραμμική ισχύ (linear) και όχι σε ντεσιμπέλ. Τα δεδομένα γραμμικής ισχύος, τα οποία συχνά παρέχονται σε κινητή υποδιαστολή, θεωρούνται οι βαθμονομημένες εικόνες ραντάρ που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την συσχέτιση και την ενσωμάτωση οποιαδήποτε επιφάνειας και μοντέλου αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί πως η εργασία με τιμές επανασκέδασης σε ντεσιμπέλ μπορεί να εισαγάγει μεγάλα στατιστικά σφάλματα στην ανάλυση επειδή όλες οι μαθηματικές εξισώσεις και οι αλγεβρικές σχέσεις πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις λογαριθμικές ποσότητες.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μέσος όρος εικόνων SAR (multi-looked) για την δημιουργία εικόνων σε πιο χονδροειδή χωρική ανάλυση με μειωμένη κηλίδα. Η κηλίδα στις εικόνες μπορεί επίσης να μειωθεί με την χρήση διάφορων φίλτρων.
- Όλες οι εικόνες SAR που αποκτήθηκαν από δορυφορικά ή αερομεταφερόμενα σύνολα δεδομένων πρέπει να είναι γεωαναφερμένα έτσι ώστε κάθε εικονοστοιχείο που προβάλλεται από το έδαφος να έχει γεωγραφική συντεταγμένη. Οι εικόνες SAR πολλαπλών μετρήσεων με μειωμένη κηλίδα μπορούν να βελτιώσουν την σχέση μεταξύ των μετρήσεων και της επανασκέδασης. Ανάλογα με τα

δεδομένα ραντάρ οι εικόνες πολλαπλών μετρήσεων μπορεί να έχουν διαφορετική ανάλυση. Για παράδειγμα, για δεδομένα ALOS PALSAR (αρχικά στα 20 m με 3 μετρήσεις), μια εικόνα 100 m μπορεί να θεωρηθεί ως εικόνα με περίπου 75 μετρήσεις με σημαντικά μειωμένη κηλίδα.

- Εάν τα δεδομένα που λαμβάνονται δεν περιλαμβάνουν RTC, γίνεται χρήση οποιονδήποτε εμπορικών ή ελεύθερων διαθέσιμων λογισμικών για την εκτέλεση διόρθωσης εδάφους. Η Ραδιομετρική διόρθωση μπορεί να εφαρμοστεί σε εικόνες πολλαπλών μετρήσεων δεδομένης της γεωμετρίας των παρατηρήσεων SAR και του μοντέλου εδάφους (όπως τα δεδομένα αποστολής τεχνολογίας ραντάρ (SRTM)). Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την ανίχνευση της τοπικής γωνίας επίπτωσης και τους παράγοντες κανονικοποίησης της περιοχής στο χάρτη (στην τελική προβολή εδάφους) συντεταγμένων για διορθώσεις γωνίας προβολής.
- Ανάπτυξη έγχρωμων σύνθετων εικόνων από πολώσεις SAR και πολωσιμετρικούς δείκτες για τον εντοπισμό διαφορετικών χαρακτηριστικών του τοπίου και της βλάστησης με την χρήση χρώματος χωρίς να επηρεάζεται η τοπογραφία και η γεωμετρία της εικόνας.

### 3.2.1 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SENTINEL 1 ΚΑΙ ALOS PALSAR 2

Ο χρονικός προσδιορισμός της έρευνας αντιπροσωπεύει μια παρακολούθηση της δασικής βιομάζας στην περιοχή μελέτης για την περίοδο 2015 και 2018. Για την καλύτερη παρακολούθηση της δασικής βιομάζας θα ήταν καλύτερη μία έρευνα ετήσιας χρονοσειράς. Αυτό όμως απαιτεί τεράστιο χώρο αποθήκευσης δεδομένων. Ο δορυφόρος Sentinel 1A δίνει λήψεις για την ίδια περιοχή ανά 12 μέρες και ο δορυφόρος ALOS PALSAR 2 ανά 14 μέρες. Επίσης, τα δεδομένα διατίθενται διορθωμένα και έτοιμα προς χρήση, γεγονός το οποίο μειώνει αισθητά τον χρόνο της επεξεργασίας που χρειάζεται.

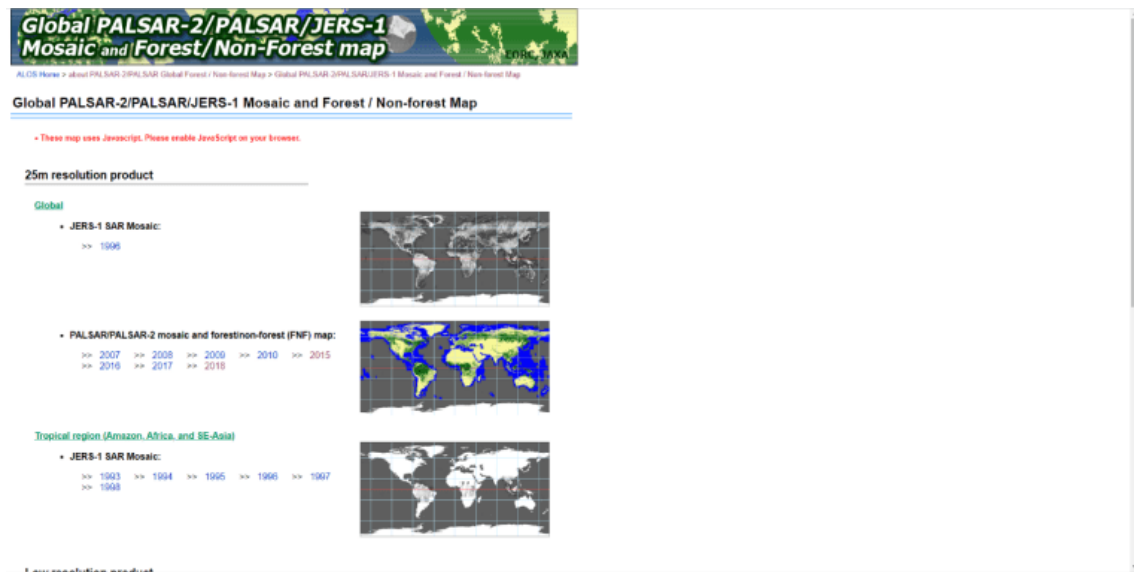
Για την πιο πρόσφατη αποστολή (ALOS-1 και ALOS-2), η JAXA παράγει ετήσια μωσαϊκά PALSAR για το 2007, 2008, 2009 και 2010 και PALSAR-2 για το 2015, 2016, 2017, και το 2018. Το μωσαϊκό PALSAR/PALSAR 2 είναι μία εικόνα SAR που δημιουργείται με την μέτρηση του συντελεστή επανασκέδασης που γίνεται από τον PALSAR/PALSAR 2. Η Διόρθωση της γεωμετρικής παραμόρφωσης και των τοπογραφικών επιδράσεων στην ένταση της εικόνας έχει ήδη εφαρμοστεί και έχει ως αποτέλεσμα την εύκολη ταξινόμηση των δασών. Το μέγεθος του ενός εικονοστοιχείου είναι 25 m και το χρονικό διάστημα του ψηφιδωτού είναι 1 χρόνος. Τα μωσαϊκά ALOS διανέμονται με διπλή πόλωση, HH και HV, τα οποία είναι ιδανικά για την παρακολούθηση υγροτόπων και δασών αντίστοιχα. Η πόλωση HH παρουσιάζει μια ισχυρή επίδραση διπλής αναπήδησης σε πλημμυρισμένους υγροτόπους, ενώ η HV είναι η καλύτερη διαμόρφωση πόλωσης για να χαρτογραφήσει και να παρακολουθεί την κάλυψη των δασών και της βιομάζας. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα ψηφιδωτά πλακάκια είναι κατασκευασμένα από πολλαπλές εικόνες ραντάρ που δεν αποκτήθηκαν ταυτόχρονα.



Εικόνα 3.1 Πλατφόρμα Copernicus (Copernicus Hub)

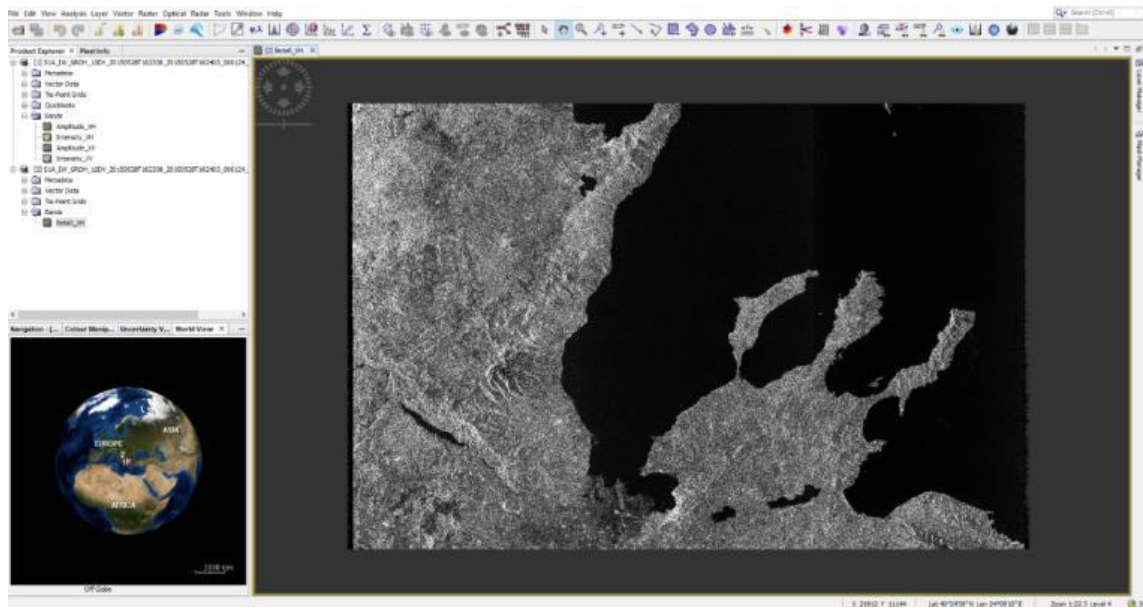
### 3.2.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΣΩ SNAP

Αφού πραγματοποιήθηκε λήψη δύο εικόνων PALSAR 2 χρονολογίας 2015 και 2018, με μέγεθος εικονοστοιχείου περίπου 25 m μέσω της υπηρεσίας JAXA καθώς και δύο εικόνες Sentinel 1A χρονολογίας Μάιο του 2015 και Μάιο του 2018 από την πλατφόρμα του Copernicus. Ακολουθεί το βασικότερο μέρος, το οποίο είναι η επεξεργασία των δεδομένων στα ανοιχτού κώδικα λογισμικά SNAP και QGIS.

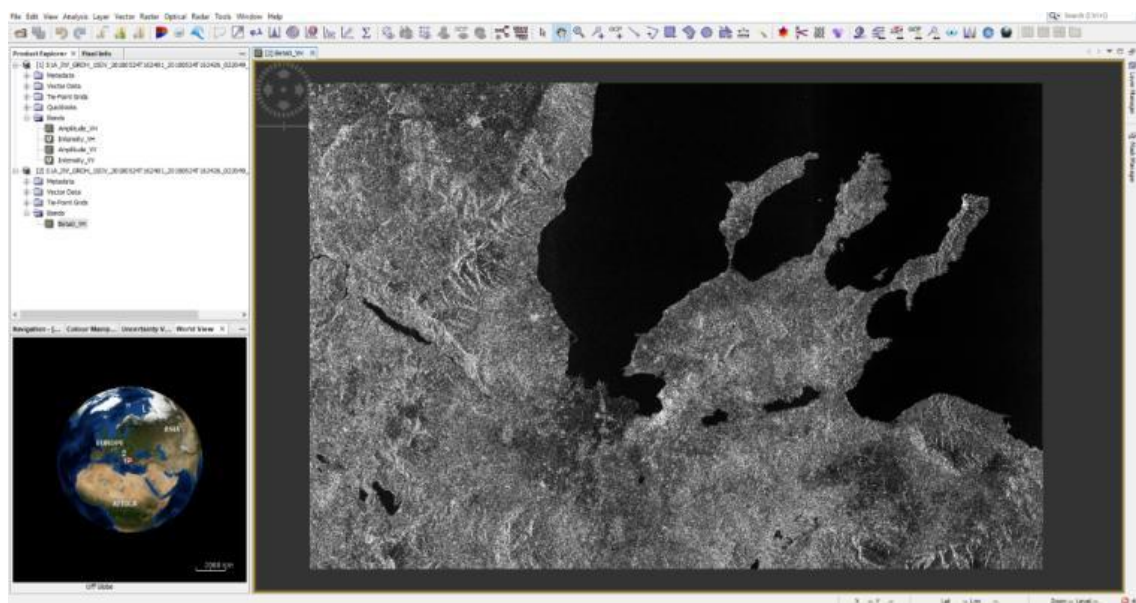


Εικόνα 3.2 Υπηρεσία JAXA(JAXA)

Με την χρήση του λογισμικού SNAP έγινε η επεξεργασία των εικόνων Sentinel 1, δηλαδή η ραδιομετρική βαθμονόμηση των εικόνων και η μείωση του θορύβου κηλίδας. Στην συνέχεια τα δεδομένα φορτώθηκαν στο λογισμικό QGIS στο οποίο εκτελέστηκε περαιτέρω ανάλυση.

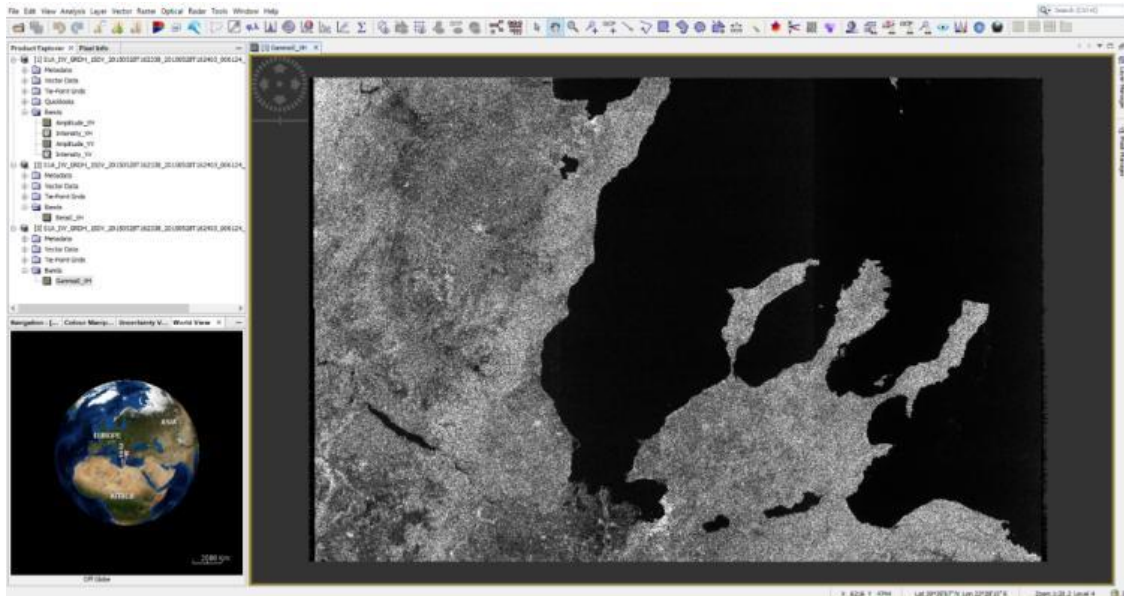


Εικόνα 3.3 Βαθμονόμηση εικόνας Sentinel 1 2015(ίδια επεξεργασία)

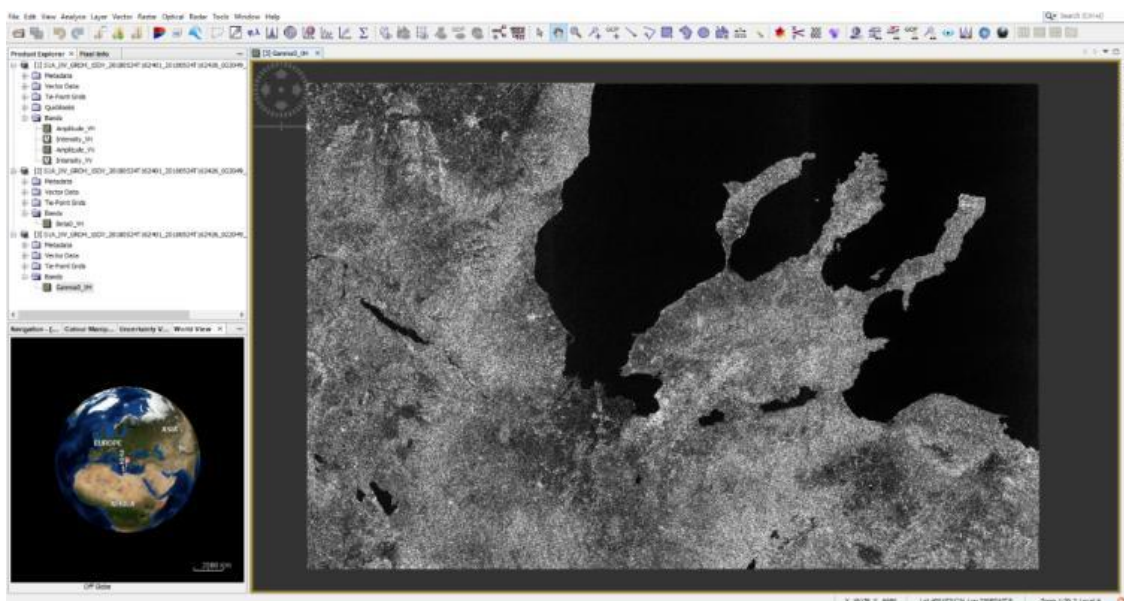


Εικόνα 3.4 Βαθμονόμηση εικόνας Sentinel 1 2018(ίδια επεξεργασία)

Στο προηγούμενο βήμα βαθμονομήθηκε η ραδιομετρία των εικόνων, δεδομένου των παραμέτρων του συστήματος. Τώρα, γίνεται η αφαίρεση των επιπτώσεων της τοπογραφίας από την εικόνα ραντάρ, η οποία ονομάζεται "ραδιομετρική ισοπέδωση εδάφους".

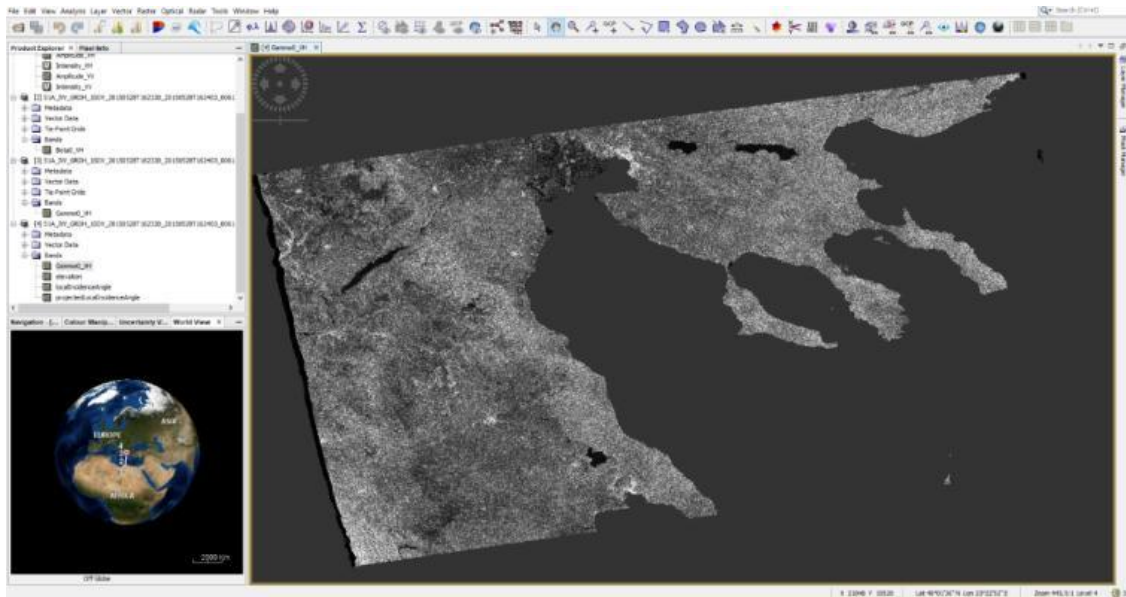


Εικόνα 3.5 Αφαίρεση επιπτώσεων τοπογραφίας 2015 (ίδια επεξεργασία)

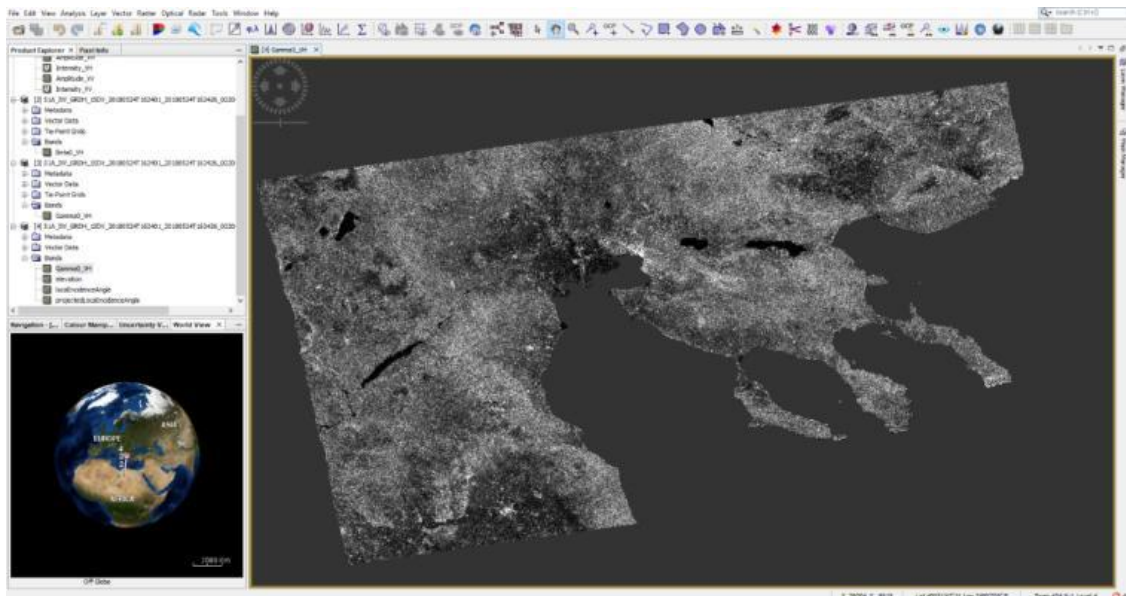


Εικόνα 3.6 Αφαίρεση επιπτώσεων τοπογραφίας 2018 (ίδια επεξεργασία)

Αυτό φέρνει την εικόνα από το Beta0 στο Gamma0 αφαιρώντας τοπογραφικά εφέ backscatter. Μέχρι στιγμής, οι εικόνες έχουν γεωμετρία προβολής (συχνά ονομάζεται "εύρος κλίσης"). Χρειάζεται η μετατροπή της γεωμετρίας σε γεωγραφική προβολή προκειμένου να χρησιμοποιηθούν οι εικόνες για επιστημονική ανάλυση και άλλες εφαρμογές.



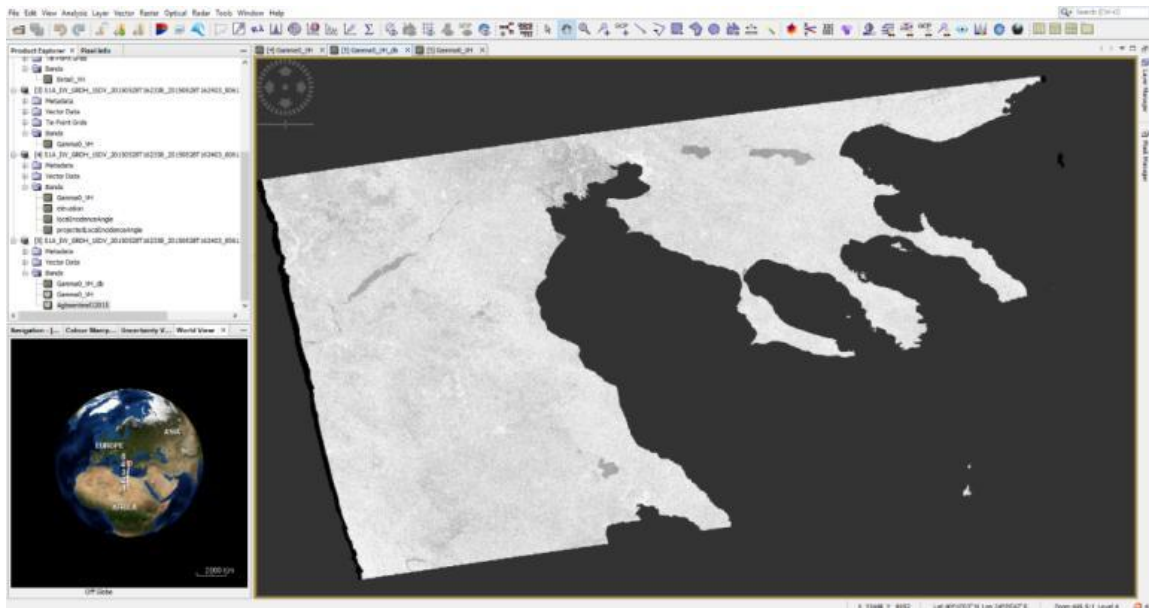
Εικόνα 3.7 Γεωμετρική διόρθωση για το 2015(ίδια επεξεργασία)



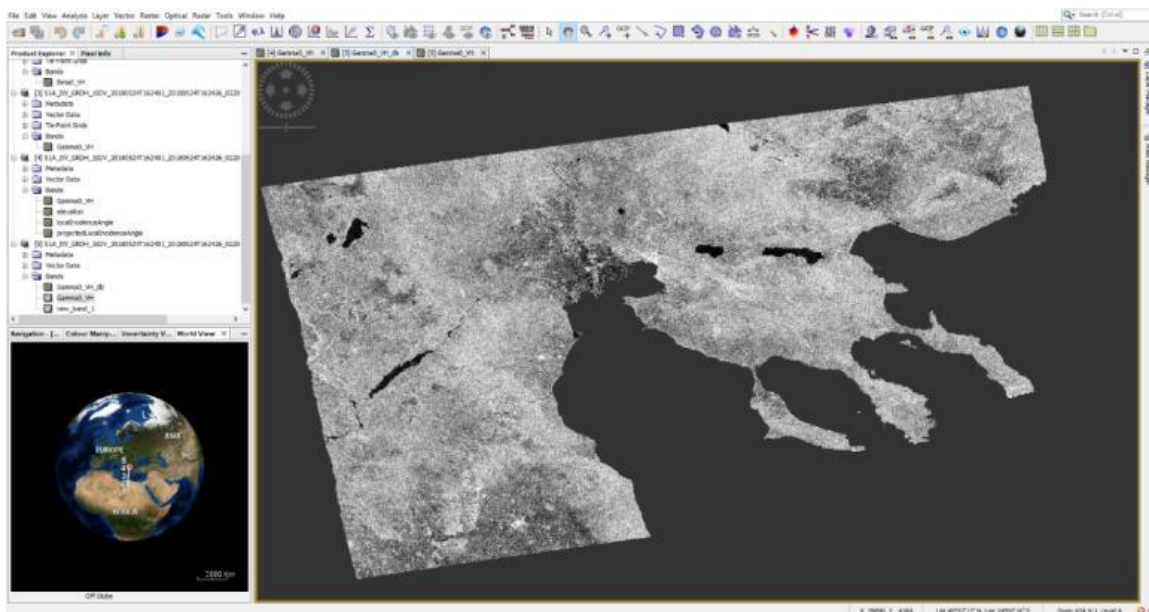
Εικόνα 3.7 Γεωμετρική διόρθωση για το 2018(ίδια επεξεργασία)

Οι εικόνες ραντάρ αποτελούνται από ένα ευρύ φάσμα τιμών, με περισσότερα pixels σε χαμηλότερες τιμές. Για να συμπιεστεί αυτή η περιοχή και να μειωθεί η επίδραση του θορύβου, προτιμάται η μετατροπή της εικόνας σε τιμές ντεσιμπέλ.





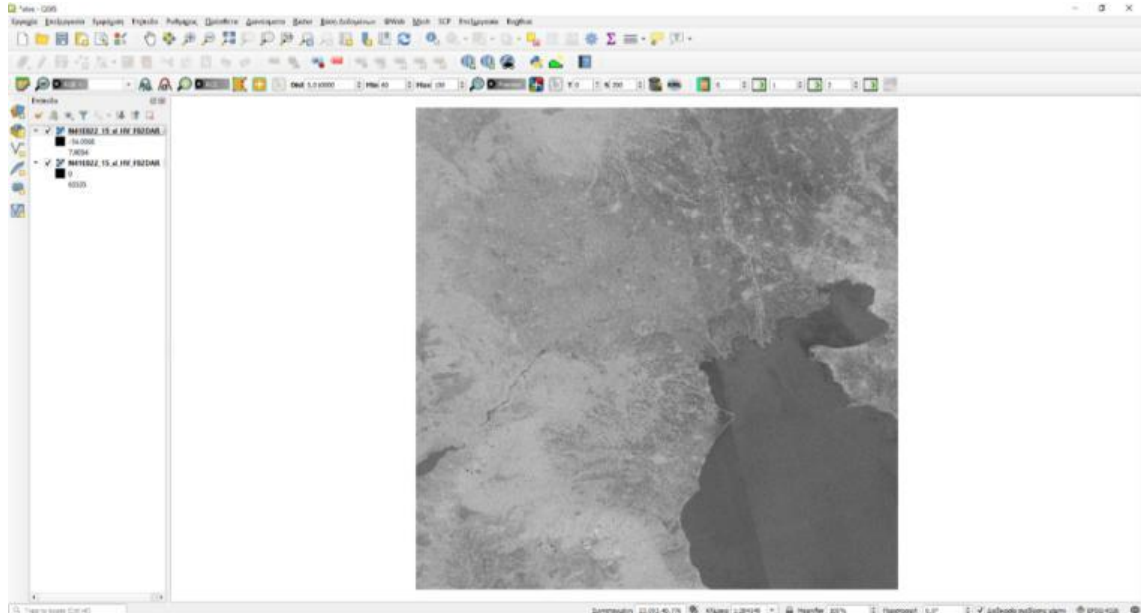
Εικόνα 3.8 Μετατροπή τιμών σε ντεσιμπέλ για το 2015(ίδια επεξεργασία)



Εικόνα 3.9 Μετατροπή τιμών σε ντεσιμπέλ για το 2018(ίδια επεξεργασία)

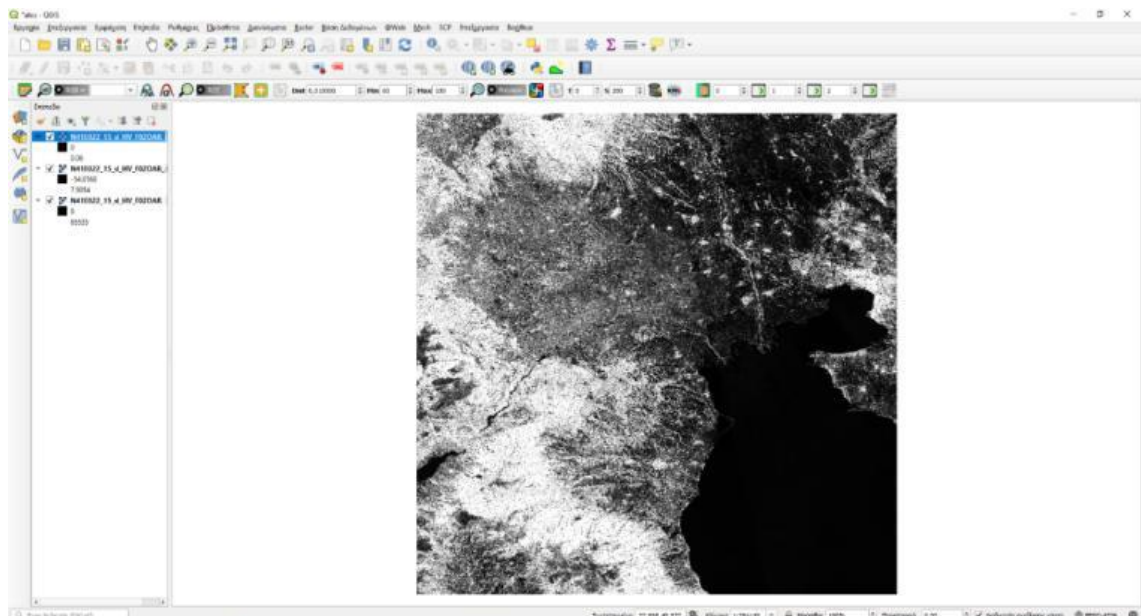
### 3.2.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ QGIS

Αξίζει να σημειωθεί πως τα δεδομένα ALOS είναι έτοιμα για χρήση. Η ραδιομετρική διόρθωση εδάφους και οι ακριβείς γεωμετρικές διορθώσεις έχουν ήδη εκτελεστεί. Τα δεδομένα ALOS έρχονται σε ψηφιακό αριθμό και πρέπει να μετατραπούν σε τιμές ντεσιμπέλ:  $\text{Gamma\_dB} = 10 * \log_{10} [(DN)2] - 83.0$



Εικόνα 3.10 Μετατροπή τιμών σε ντεσιμπέλ(ίδια επεξεργασία)

Στην συνέχεια γίνεται μετατροπή των τιμών ντεσιμπέλ σε τιμές σκέδασης με την χρήση της εξίσωσης  $\text{Gamma\_pw} = 10^{(0.1 * \text{Gamma\_dB})}$ . Αυτά τα βήματα γίνονται για καθεμία εικόνα ξεχωριστά.



Εικόνα 3.11 Μετατροπή τιμών σε τιμές σκέδασης(ίδια επεξεργασία)

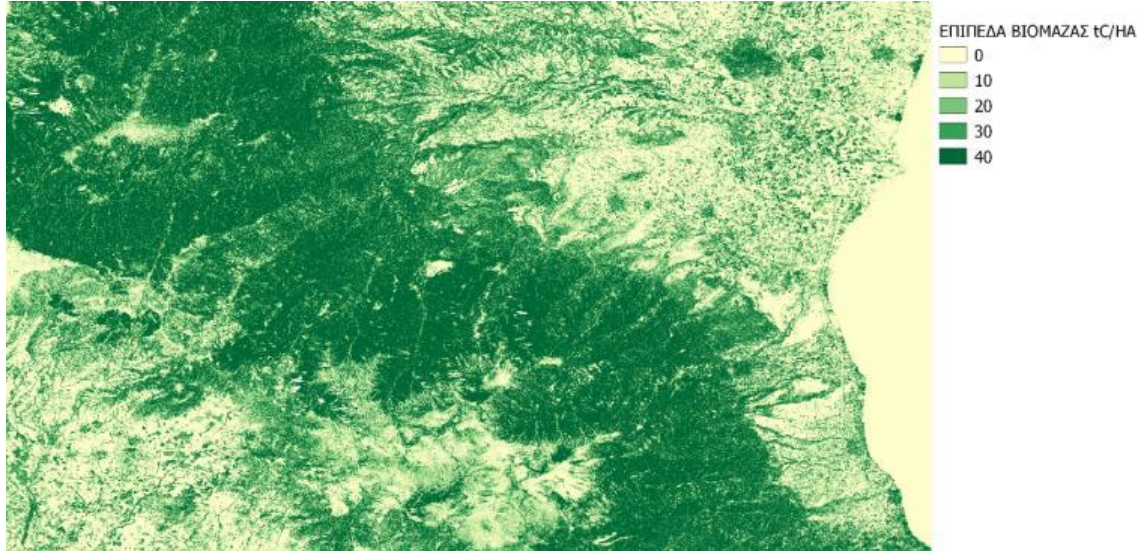
Θα χρησιμοποιηθεί μία έτοιμη εξίσωση για την εκτίμηση της βιομάζας τροπικών δασών λόγω έλλειψης δεδομένων πεδίου και οι τιμές βιομάζας θα είναι σε εύρος 0-40 tC/ha.

$\text{AGB} = 715.667 * \gamma_0(\text{natural}) - 5.967$  (McNicol et al. (2018)).

### 3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

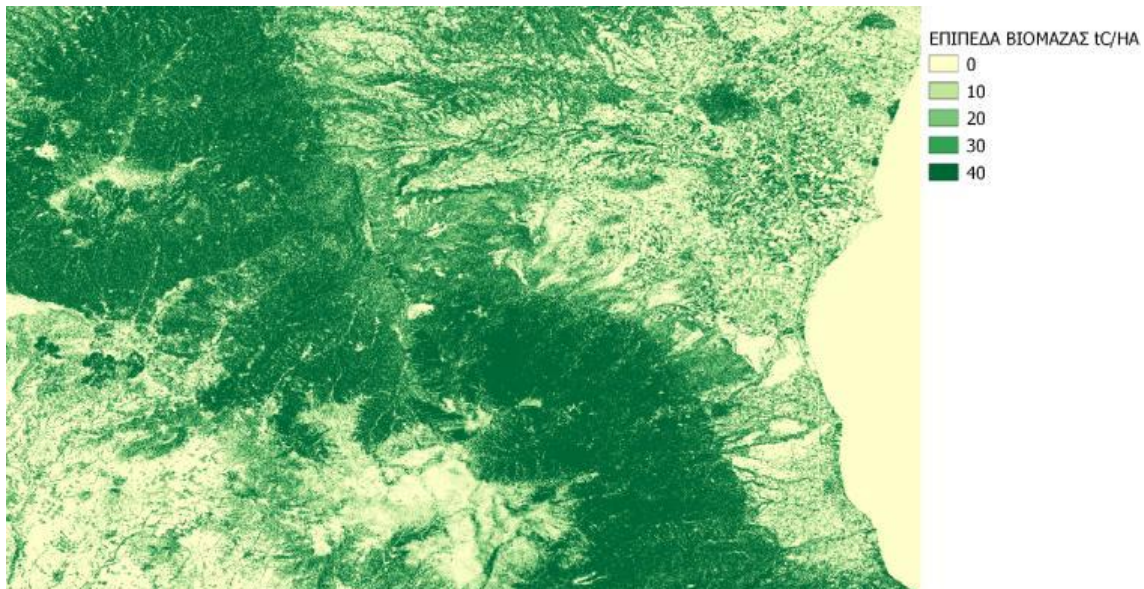
#### 3.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ALOS PALSAR 2

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της επεξεργασίας, υπολογίζοντας τα επίπεδα βιομάζας στην περιοχή μελέτης και των τεσσάρων εικόνων έχουμε τα εξής αποτελέσματα παρακάτω.



Εικόνα 3.12 Χάρτης απεικόνισης των επιπέδων βιομάζας ALOS 2015 (ίδια επεξεργασία)

Έπειτα από επεξεργασία της εικόνας για την χρονολογία 2015 πραγματοποιήθηκε η χαρτογράφηση των επιπέδων βιομάζας σε εύρος 0-40 τόνων άνθρακα ανά εκτάριο. Έτσι στις περιοχές με σκούρο πράσινο χρώμα έχουμε υψηλές τιμές δασικής βιομάζας όπως και στην περιοχή της Ελασσόνας.

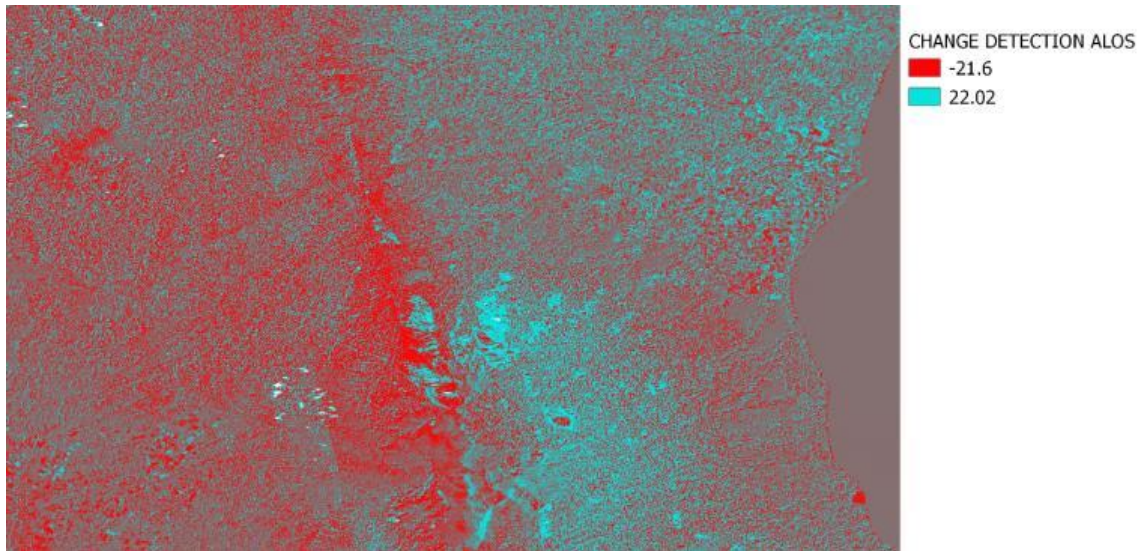


Εικόνα 3.13 Χάρτης απεικόνισης των επιπέδων βιομάζας ALOS 2018 (ίδια επεξεργασία)

Το ίδιο συμπέρασμα βγαίνει και στην περίπτωση της εικόνας του 2018. Όπου παρατηρείται υψηλό επίπεδο βιομάζας εύρους 30-40 tC/ha στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης.

Τέλος, γίνεται προσδιορισμός των αλλαγών μεταξύ των δύο εικόνων με την εξίσωση:

$$AGB_{change} = AGB_{2018} - AGB_{2015}$$

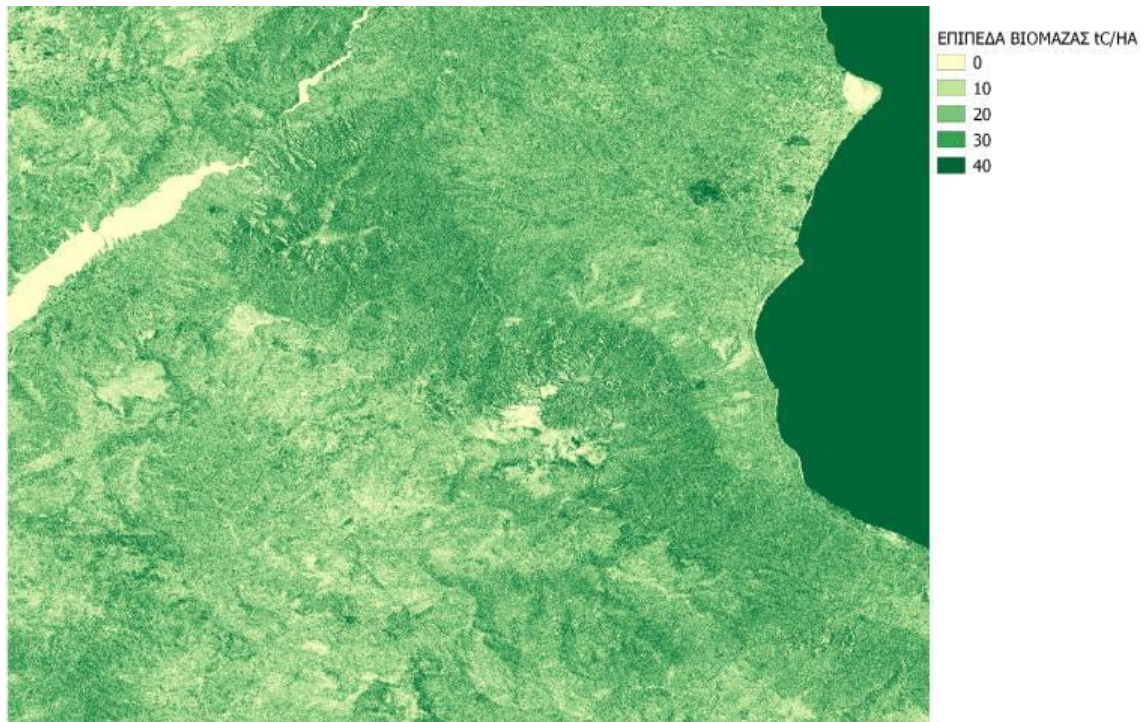


Εικόνα 3.14 Απεικόνιση του *change detection* για τις εικόνες ALOS 2015-2018 στην περιοχή μελέτης (ίδια επεξεργασία)

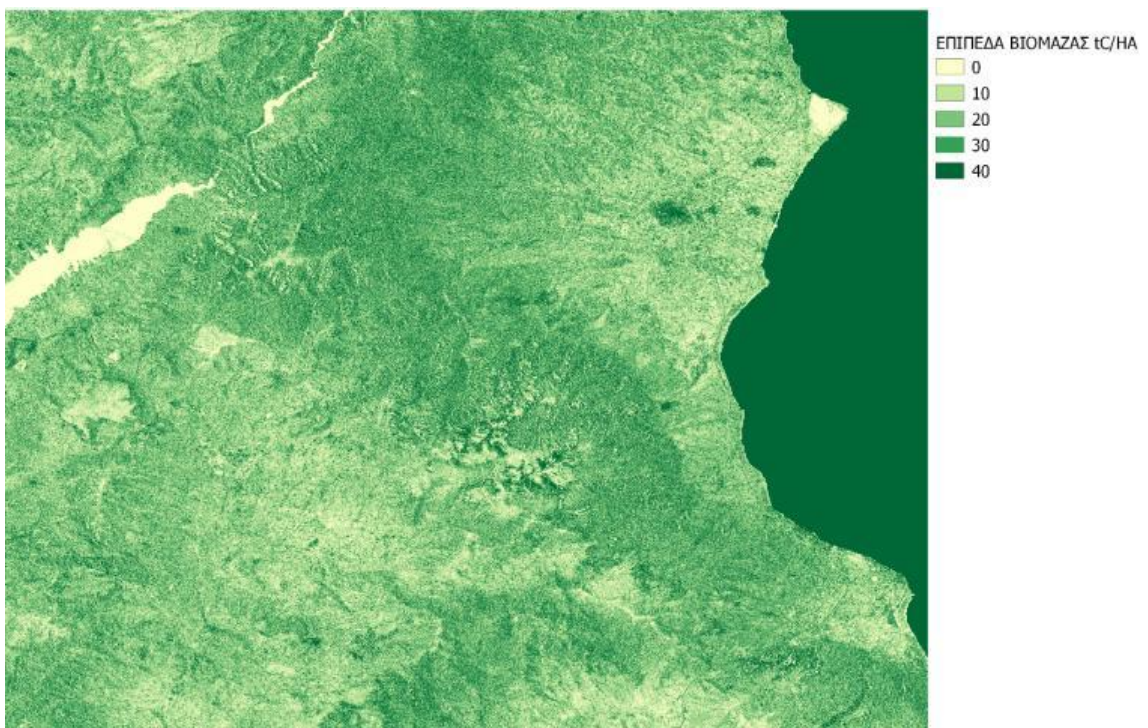
Η εικόνα που προκύπτει δείχνει περιοχές απώλειας βιομάζας σε κόκκινο χρώμα και περιοχές κέρδους σε γαλάζιο. Επίσης, παρατηρείται πως στην περιοχή μελέτης υπάρχει μία αύξηση των επιπέδων της βιομάζας στις δασικές εκτάσεις ενώ στον αστικό χώρο υπάρχει μία εμφανής μείωση το 2018 σε σχέση με το 2015. Αυτό γίνεται κατανοητό από τις χρωματικές αποχρώσεις που παράχθηκαν όπου με κόκκινο χρώμα φαίνεται η μείωση της βιομάζας και με γαλάζιο η αύξηση. Συνοψίζοντας, διακρίνονται μεγάλα επίπεδα βιομάζας στην περιοχή μελέτης που κυμαίνονται μεταξύ 30 και 40 tC/ha στο μεγαλύτερο μέρος της.

### 3.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ SENTINEL 1

Στην περίπτωση τώρα των εικόνων Sentinel 1 τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο αφού έχει διαφορετικό μήκος κύματος και η διείσδυση στις δασικές εκτάσεις είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή των δεδομένων ALOS. Επίσης να σημειωθεί ότι πραγματοποιήθηκε εστίαση στις εικόνες Sentinel 1.

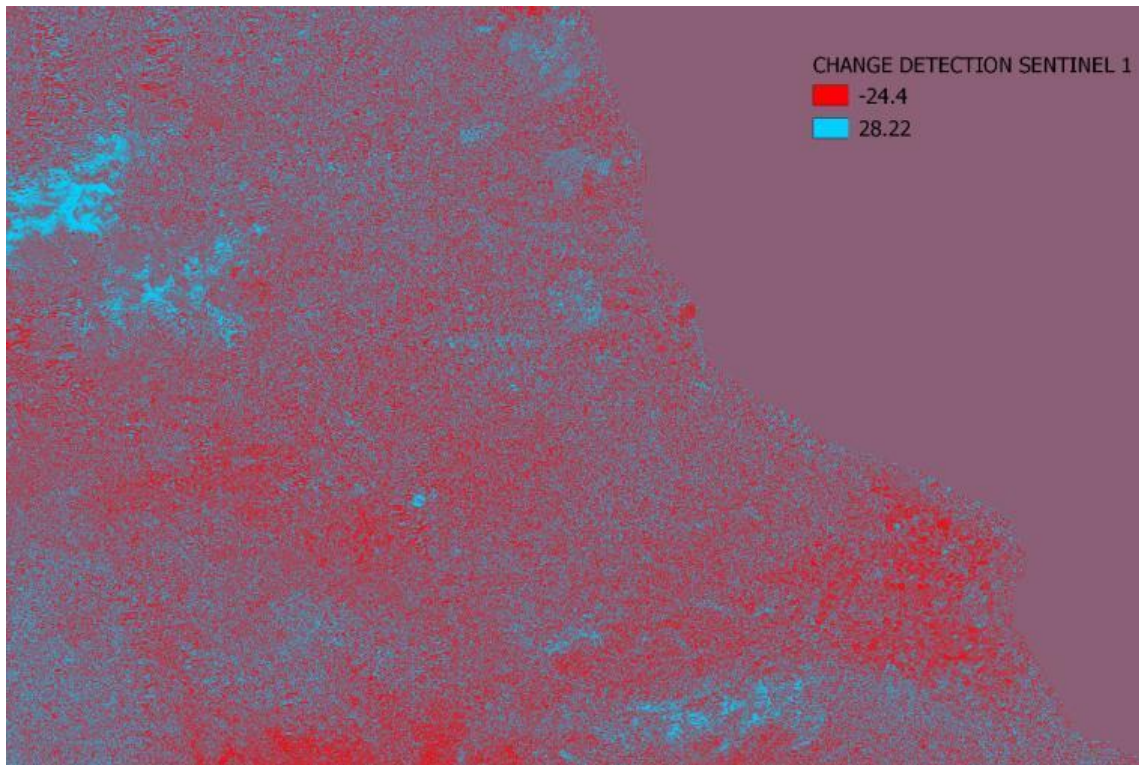


Εικόνα 3.15 Χάρτης απεικόνισης των επιπέδων βιομάζας Sentinel 1 2015(ίδια επεξεργασία)



Εικόνα 3.16 Χάρτης απεικόνισης των επιπέδων βιομάζας Sentinel 1 2018(ίδια επεξεργασία)

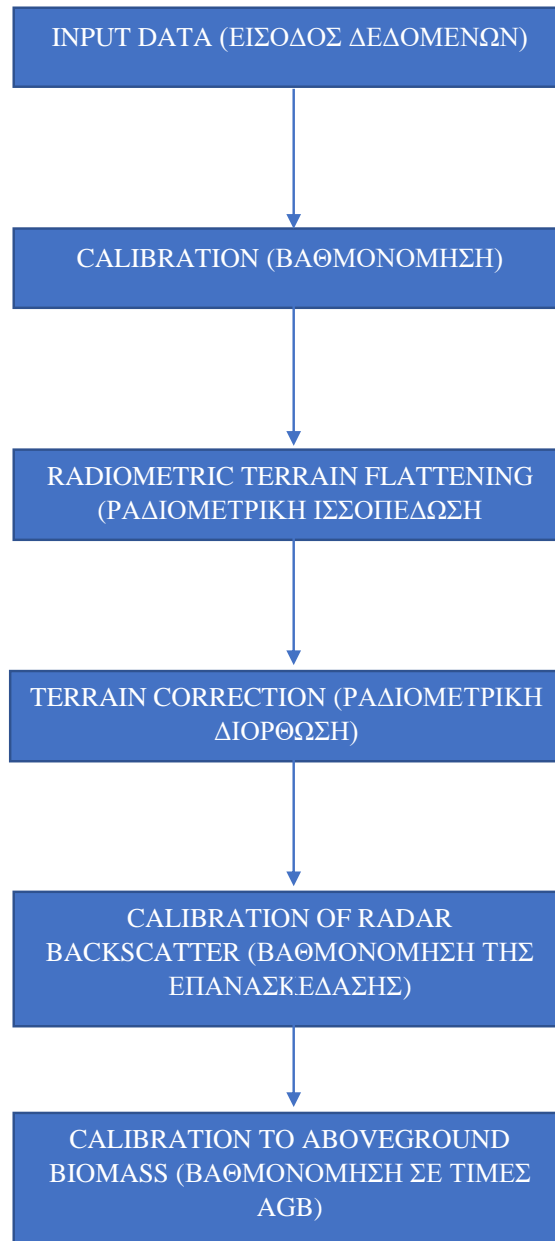
Στις παραπάνω εικόνες παρατηρείται πως στην περιοχή μελέτης τα επίπεδα της βιομάζας κυμαίνονται μεταξύ 10 και 30 tC/ha.



Εικόνα 3.17 Απεικόνιση του *change detection* για τις εικόνες *Sentinel 1* 2015-2018 στην περιοχή μελέτης (ίδια επεξεργασία)

Στην εικόνα που εμφανίζεται το *change detection*, παρατηρείται πως το επίπεδο βιομάζας στην περιοχή μελέτης μειώθηκε αισθητά το χρονικό εύρος 2015-2018. Αυτό γίνεται κατανοητό από το κόκκινο χρώμα που επικρατεί το οποίο αντιπροσωπεύει την μείωση της βιομάζας.

Παρακάτω δίδεται ένα διάγραμμα ροής σχετικό με την μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των αποτελεσμάτων.



3.18 Διάγραμμα ροής επεξεργασίας (ίδια επεξεργασία)

Εικόνα

### 3.3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα και των δύο δορυφόρων γίνεται διακριτή η μεγάλη διαφορά του μήκους κύματος που έχουν μεταξύ τους. Στην περίπτωση ALOS PALSAR 2 χρησιμοποιείται μήκος κύματος 24 cm ενώ στην περίπτωση του Sentinel 1 χρησιμοποιείται μήκος κύματος 6 cm. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων στην χαρτογράφηση της δασικής βιομάζας στην περιοχή μελέτης. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται διαφορά στο επίπεδο βιομάζας της περιοχής μελέτης με την εικόνα ALOS να παρουσιάζει μεγαλύτερο εύρος τιμών (30-40 tC/ha) από την εικόνα Sentinel 1 (20-30 tC/ha). Τέλος, στο change detection των εικόνων Sentinel 1 παρατηρείται πως στην περιοχή μελέτης δεν υπάρχει κάποια αισθητή αύξηση των επιπέδων της βιομάζας σε σχέση πάντα με τη περίπτωση των εικόνων ALOS PALSAR 2 όπου συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο. Συνεπώς, γίνεται κατανοητό ότι σε αυτό συμβάλει το μήκος κύματος του δορυφόρου όπου στην περίπτωση του Sentinel 1 η διείσδυση που πραγματοποιείται στο δασικό οικοσύστημα περιορίζεται κυρίως στο ανώτερο επίπεδο αυτού. Στις εικόνες ALOS PALSAR 2 η διείσδυση είναι αρκετά μεγαλύτερη και έτσι παράγεται περισσότερη πληροφορία.



#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην ανάδειξη των διάφορων μεθόδων που υπάρχουν για την εκτίμηση και τη χαρτογράφηση της δασικής βιομάζας με τους διάφορους περιορισμούς οι οποίοι τους χαρακτηρίζουν. Τα αποτελέσματα ενδεχομένως να μην παρουσιάζουν μεγάλη ακρίβεια καθώς υπήρχε έλλειψη δεδομένων πεδίου. Σε περίπτωση που υπήρχαν δεδομένα πεδίου, τα αποτελέσματα, τα οποία βρίσκονται υπό διερεύνηση, θα βελτιώνονταν σημαντικά, αφού θα γινόταν άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα δεδομένα πεδίου παραθέτοντας με αυτόν τον τρόπο συμπεράσματα για την αξιοπιστία τους.

Τα λογισμικά QGIS και SNAP διατίθενται δωρεάν και είναι πλήρως ικανά και προσαρμοσμένα στην επεξεργασία εικόνων Sentinel 1 και ALOS PALSAR 2. Τα δύο αυτά λογισμικά συμπληρώνουν το ένα το άλλο σε εργασίες τηλεπισκόπησης και πιο συγκεκριμένα στην μέθοδο εκτίμησης δασικής βιομάζας κάτι το οποίο έγινε και στην παρούσα εργασία. Οι δορυφορικές εικόνες ALOS PALSAR 2 ίσως να εμφάνισαν καλύτερα αποτελέσματα διότι έχουν μεγαλύτερο μήκος κύματος των 24 cm επιτρέποντας τους να παρουσιάζουν καλύτερη διείσδυση στις δασικές εκτάσεις και τα δασικά οικοσυστήματα. Η επεξεργασία των εικόνων που απαιτήθηκε ήταν μικρή καθώς διατίθενται ήδη ραδιομετρικά και γεωμετρικά διορθωμένες. Οι δορυφορικές εικόνες Sentinel 1 έχουν μήκος κύματος 6 cm με αποτέλεσμα η διείσδυση να περιορίζεται στα ανώτερα τμήματα της επιφάνειας των δασικών οικοσυστημάτων για αυτό και χρησιμοποιείται κυρίως σε πολύ αραιές δασικές εκτάσεις, σε σαβάνες και σε μαγγρόβια δάση. Η χρήση των δωρεάν λογισμικών, αποδείχτηκε επαρκέστατη για την εκπλήρωση του σκοπού της εργασίας και μπορούν να βρουν εφαρμογή σε διάφορες υπηρεσίες της χώρας μας.

Ένα σύστημα ραντάρ, ορίζεται ως ένα ενεργό σύστημα παρουσιάζοντας κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παθητικά συστήματα. Έχουν την ικανότητα παρακολούθησης τη μέρα αλλά και τη νύχτα και την ικανότητα να καταγράφουν ανεξάρτητα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Επιπλέον, λειτουργεί με ηλεκτρομαγνητική μικροκυματική ακτινοβολία, η οποία επιτρέπει την μέτρηση με την ακρίβεια κλάσματος της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας. Με αυτό τον τρόπο γίνεται αντιληπτή η προσφορά δεδομένων και πληροφοριών που μπορούν να δώσουν τα συστήματα ραντάρ εν αντιθέσει με τα παθητικά συστήματα όπως για παράδειγμα ο Landsat, εμπλουτίζοντας την επιστήμη της τηλεπισκόπησης. Ένα σύστημα ραντάρ προσφέρει πολλές εφαρμογές οι οποίες φάνταζαν αδύνατες στο παρελθόν. Μία από αυτές τις εφαρμογές είναι και οι μέθοδοι εκτίμησης και χαρτογράφησης της δασικής βιομάζας όπου πραγματοποιήθηκε και η συγκεκριμένη εργασία. Η δομή των δασών, η τρισδιάστατη δηλαδή διάταξη των μεμονωμένων δέντρων, αποτελεί άμεσο δείκτη της ποσότητας άνθρακα που αποθηκεύεται σε ένα οικοσύστημα. Η αποθήκευση αυτή σχετίζεται με τον τρόπο λειτουργίας του οικοσυστήματος (διαχείριση του άνθρακα, του νερού και των θρεπτικών συστατικών). Επιπλέον, υπάρχει αυξημένη ανάγκη κατανόησης της παγκόσμιας δυναμικής του άνθρακα στα οικοσυστήματα, όπου τα αποθέματα άνθρακα αποτελούν προϋπόθεση για την κατανόηση της βίοςφαιρας με άλλους τομείς της Γης. Στην εργασία πραγματοποιήθηκε μία ολοκληρωμένη παρουσίαση της πολυπλοκότητας της διαδικασίας αλλά και των παραμέτρων που απαρτίζουν την εκτίμηση της δασικής βιομάζας καθώς και τον τεράστιο ρόλο που διαδραματίζουν στην έκβαση των παραγόμενων αποτελεσμάτων.

Συνοψίζοντας το σύστημα ραντάρ χρόνο με τον χρόνο φαίνεται να επικρατεί όλο και περισσότερο στην επιστήμη της τηλεπισκόπησης, καθώς εμπλουτίζεται με ραγδαίο ρυθμό, με μεθοδολογίες και προσεγγίσεις. Οι εφαρμογές και τα ελεύθερα δεδομένα,

αποτελούν μία μεγάλη ευκαιρία προσχώρησης της έρευνας στην Ελλάδα, σε τέτοιου είδους εφαρμογές, δημιουργώντας έτσι, νέα πεδία μελέτης στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Τα δεδομένα ραντάρ προσφέρουν διάφορες εφαρμογές όπως:

- Ανάλυση πλημμυρών
- Χαρτογράφηση πυρκαγιών
- Ανάπτυξη και παρακολούθηση αστικού χώρου
- Εντοπισμός αλλαγών στις χρήσεις γης
- Εκτίμηση της υγρασίας του εδάφους
- Ταξινόμηση καλλιεργειών
- Ανάλυση σεισμών
- Παρακολούθηση ωκεανών
- Παρακολούθηση ανέμων
- Εντοπισμός εδαφικών παραμορφώσεων
- Παρακολούθηση πάγων κ.α.

Όλες οι παραπάνω εφαρμογές υλοποιούνται με διάφορες τεχνικές που χαρακτηρίζουν τα δεδομένα ραντάρ όπως η μέτρηση της πόλωσης, της σκέδασης και την συμβολομετρία. Εξαρτώνται επίσης, από το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας το οποίο χαρακτηρίζει τον εκάστοτε δορυφόρο. Τα βασικότερα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές με δεδομένα ραντάρ είναι:

- L-band με μήκος κύματος 24 cm όπως ο ALOS-PALSAR
- C-band με μήκος κύματος περίπου 6 cm όπως ο Sentinel-1
- P-band με μήκος κύματος περίπου 65 cm όπως ο AirSAR
- X-band με μήκος κύματος περίπου 3 cm όπως ο TerrasAR-X

Το κάθε μήκος κύματος παρουσιάζει διαφορετική διείσδυση στις επιφάνειες και σε διάφορους στόχους του εδάφους με αποτέλεσμα να διαφοροποιούνται οι δυνατότητες ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται.

Η τηλεπισκόπηση είναι μια επιστήμη που εξελίσσεται συνεχόμενα και δίνει έμφαση στην παρακολούθηση, την καταγραφή και την κατανόηση της γης. Στην Ελλάδα ωστόσο, δεν είναι το ίδιο διαδεδομένη και δεν εξελίσσεται όπως σε άλλες χώρες του εξωτερικού. Αυτό όμως μπορεί να αλλάξει λόγω της προσφοράς δορυφορικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης δωρεάν μέσω της πλατφόρμας Copernicus της ESA και των δεδομένων ALOS μέσω της JAXA. Εμφανίζεται έτσι, μια μεγάλη ευκαιρία επένδυσης στην επιστήμη της τηλεπισκόπησης στην Ελλάδα η οποία μπορεί να αποδώσει όφελος στο εθνικό και τοπικό συμφέρον του περιβάλλοντος.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική βιβλιογραφία:

- [1] Μερτίκας, Σ. (2006) *Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας*. Αθήνα: ΙΩΝ
- [2] Παρχαρίδης, Ι., 2015. *Αρχές δορυφορικής τηλεπισκόπησης*.
- [3] Περάκης, Κ., Μουσιάδης, Α., Φαρασλής, Ι., 2015. *Η τηλεπισκόπηση σε 13 ενότητες*.
- [4] Μηλιαρέσης, Γ. (2003) *Φωτοερμηνεία Τηλεπισκόπηση*. Αθήνα: ΙΩΝ
- [5] Λέτσιος, Β. (2017) *Δεδομένα Ραντάρ: ανάλυση επιφανειακών εδαφικών παραμορφώσεων μέσω συμβολομετρίας στην ευρύτερη περιοχή της λίμνης Κάρλας* (Διπλωματική Εργασία) Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Πολυτεχνική Σχολή. Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης.
- [6] Καρανίκας, Χ. (2018) *Εκτίμηση παραμέτρων βλάστησης δασικών οικοσυστημάτων με τη χρήση δορυφορικών εικόνων* (Μεταπτυχιακή Διατριβή) Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Πολυτεχνική Σχολή. Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης.
- [7] Μπαντουβάκη, Κ. (2018) *Διερεύνηση ανάπτυξης μεθοδολογίας διαχρονικής παρακολούθησης εδαφικής παραμόρφωσης ηφαιστείου με βάση το ανοιχτού κώδικα λογισμικό SNAP*. Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο. Τμήμα Γεωγραφίας. Σχολή Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας και Εφαρμοσμένων Οικονομικών.

### Ξένη Βιβλιογραφία:

- [8] Andersen, H. E., S. E. Reutebuch, R. J. McGaughey, M. V. N. d'Oliveira, M. Keller. (2014). *Monitoring selective logging in western Amazonia with repeat lidar flights. Remote Sensing of Environment*.
- [9] Arlot, S., and A. Celisse. (2010). *A survey of cross-validation procedures for model selection. Statistics Surveys*
- [10] Asner, G. P., J. Mascaro. (2014). *Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple Lidar metric. Remote Sensing of Environment*
- [11] Asner, G. P., G. V. N. Powell, J. Mascaro, D. E. Knapp, J. K. Clark, J. Jacobson, T. Kennedy-Bowdoin, A. Balaji, G. Paez-Acosta, E. Victoria, L. Secada, M. Valqui, and R. F. Hughes. (2010). *High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*.
- [12] Baccini, A., S. J. Goetz, W. S. Walker, N. T. Laporte, M. Sun, D. Sulla-Menshe, J. Hackler, P. S. A. Beck, R. Dubayah, M. A. Friedl, S. Samanta, and R. A. Houghton. (2012). *Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. Nature Climate Change*.
- [13] Baghdadi, N., C King, A. Bourguignon, and A. Remond. (2010). *Potential of ERS and Radarsat data for surface roughness monitoring over bare agricultural fields: Application to catchments in Northern France. International Journal of Remote Sensing*
- [14] Bonan, G. B. (2008). *Forests and climate change. Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. Science*.
- [15] Bouvet, A., Mermoz, S., Le Toan, T., Villard, L., Mathieu, R., Naidoo, L., & Asner, G. P. (2018). *An above-ground biomass map of African savannahs and woodlands at 25m resolution derived from ALOS PALSAR. Remote Sensing of Environment*.
- [16] Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer (Vol. 134)*. Food & Agriculture Org.
- [17] Brown, S., (2002). *Measuring carbon in forests: current status and future challenges. Environmental pollution*.

- [18] Bryant, R., M. S. Moran, D. P. Thoma, C. D. Holifield Collins, S. Skirvin, M. Rahman, K. Slocum, P. Starks, D. Bosch, M. P. Gonzalez Dugo. (2007). *Measuring surface roughness height to parameterize radar backscatter models for retrieval of surface soil moisture. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter.*
- [19] Canadell, J. G., and M. R. Raupach. (2008). *Managing forests for climate change mitigation. Science.*
- [20] Cartus, O., M. Santoro, J. Kellndorfer. (2012). *Mapping forest aboveground biomass in the northeastern United States with ALOS PALSAR dual-polarization L-band. Remote Sensing of Environment.*
- [21] Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., ... & Yamakura, T. (2005). *Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests.*
- [22] Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., ... & Vieilledent, G. (2014). *Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees.*
- [23] Chen, Q., Laurin, G. V., & Valentini, R. (2015). *Uncertainty of remotely sensed aboveground biomass over an African tropical forest: Propagating errors from trees to plots to pixels.*
- [24] Clark, D. B., and J. R. Kellner (2012). *Tropical forest biomass estimation and the fallacy of misplaced concreteness. Journal of Vegetation Science.*
- [25] Ene, L. T., Næsset, E., Gobakken, T., Bollandsås, O. M., Mauya, E. W., & Zahabu, E. (2017). *Large-scale estimation of change in aboveground biomass in miombo woodlands using airborne laser scanning and national forest inventory data.*
- [26] Enghart, S., Jubanski, J., & Siegert, F. (2013). *Quantifying dynamics in tropical peat swamp forest biomass with multi-temporal lidar datasets.*
- [27] Ferraz, A., S. Saatchi, C. Mallet, V. Meyer. (2016). *Lidar detection of individual tree size in tropical forests.*
- [28] García, M., Saatchi, S., Casas, A., Koltunov, A., Ustin, S. L., Ramirez, C., & Balzter, H. (2017). *Extrapolating forest canopy fuel properties in the California Rim Fire by combining airborne lidar and Landsat OLI Data.*
- [29] Gibbs, H. K., S. Brown, J. O. Niles, J. A. Foley. (2007). *Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: Making REDD a reality.*
- [30] Hajnsek, I., Kugler, F., Lee, S. K., & Papathanassiou, K. P. (2009). *Tropical-forest-parameter estimation by means of Pol-InSAR: The INDREX-II campaign. Geoscience and Remote Sensing*
- [31] Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., ... & Townshend, J. R. G. (2013). *High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. Science*
- [32] Harris, N. L., Brown, S., Hagen, S. C., Saatchi, S. S., Petrova, S., Salas, W., ... & Lotsch, A. (2012). *Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions. Science*
- [33] Hensley, S., Oveisgharan, S., Saatchi, S., Simard, M., Ahmed, R., & Haddad, Z. (2014). *An error model for biomass estimates derived from polarimetric radar backscatter.*
- [34] Mermoz, S., Réjou-Méchain, M., Villard, L., Le Toan, T., Rossi, V., & Gourlet-Fleury, S. (2015). *Decrease of L-band SAR backscatter with biomass of dense forests.*
- [35] Mermoz, S., T. L. Toan, L. Villard, M. Rejou-Mechain, J. Seifert-Granzin. (2014). *Biomass assessment in the Cameroon savanna using ALOS PALSAR data.*
- [36] Michelakis, D., N. Stuart, G. Lopez, V. Linares, and I. H. Woodhouse. (2014). *Local-scale mapping of biomass in tropical lowland pine savannas using ALOS PALSAR.*

- [37] Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T., Salas, W., ... & Morel, A. (2011). *Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents*.
- [38] Saatchi, S., Marlier, M., Chazdon, R. L., Clark, D. B., & Russell, A. E. (2011b). *Impact of spatial variability of tropical forest structure on radar estimation of above-ground biomass*.
- [39] Saatchi, S., Mascaro, J., Xu, L., Keller, M., Yang, Y., Dufy, P., ... & Schimel, D. (2015). *Seeing the forest beyond the trees*.
- [40] Sandberg, G., L. M. H. Ulander, J.E. S. Fransson, J. Holmgren, T. Le Toan. (2011). *L- and P-band backscatter intensity for biomass retrieval in hemiboreal forest*.
- [41] McNicol, Iain M., Casey M. Ryan, and Edward TA Mitchard. (2018) *Carbon losses from deforestation and widespread degradation offset by extensive growth in African Woodlands*.

#### Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

- [42] Sentinel-1 Team. (2013) *Sentinel-1 User Handbook*, ESA. Available from: [https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1\\_User\\_Handbook](https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook)
- [43] Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., Papathanassiou, K., P. (2013) *A Tutorial on Synthetic Aperture Radar*. IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING MAGAZINE. Available from: [http://www2.geog.ucl.ac.uk/~mdisney/teaching/PPRS/PPRS\\_7/esa\\_sar\\_tutorial.pdf](http://www2.geog.ucl.ac.uk/~mdisney/teaching/PPRS/PPRS_7/esa_sar_tutorial.pdf)
- [44] Servir Global. (2019). *SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*. Available from: [SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation > SERVIR > SERVIR | Global | Articles](#)
- [45] eoPortal Directory ALOS-2 (*Advanced Land Observing Satellite-2; SAR mission*) / Daichi-2 Available from: <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/alos-2>