



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

**Συνέργεια Μοντέλων Υγρασίας Εδάφους και Τηλεπισκοπικών
Απεικονίσεων για την Εκτίμηση της Εδαφικής Υγρασίας σε
Βαμβακοκαλλιέργειες**

Διπλωματική Εργασία

Γεώργιος Ν. Πετρόπουλος

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Καραθανάση Βασιλεία
Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Thesis:

«Collaboration of Soil Moisture Models and Remote Sensing Images for The Estimation of Soil Moisture in Cotton Fields»

Copyright © Γεώργιος Ν. Πετρόπουλος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εδαφική υγρασία αποτελεί έναν ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα επιφανειακής ενέργειας, επηρεάζοντας πληθώρα φυσικών φαινομένων. Παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη γεωργία, στην υδρολογία και αποτελεί παράγοντα «κλειδί» για τον χαρακτηρισμό του παγκόσμιου κλίματος.

Οι επιτόπιες μετρήσεις εδαφικής υγρασίας, αν και ακριβείς, είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες και κοστοβόρες, ενώ παρέχουν δεδομένα σε σημειακή κλίμακα. Συνεπώς, η επιστημονική κοινότητα στράφηκε σε τηλεπισκοπικές μεθόδους με χρήση δορυφορικών δεδομένων, για την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας.

Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MULESME (MUltitemporal Least Square Moisture Estimator), το οποίο σχεδιάστηκε για τη συστηματική χαρτογράφηση της επιφανειακής εδαφικής υγρασίας, χρησιμοποιώντας δεδομένα SAR των δορυφόρων Sentinel-1. Αν και σχεδιάστηκε για την εφαρμογή του στην Ιταλική επικράτεια (εθνική κλίμακα), δύναται να χρησιμοποιηθεί και σε περιοχές εκτός της Ιταλικής επικράτειας. Υλοποιεί έναν πολυ-χρονικό (multi-temporal) αλγόριθμο, ο οποίος χρησιμοποιεί χρονικές σειρές δεδομένων Sentinel-1 και βοηθητικά δεδομένα σαν είσοδο, όπως ο χάρτης κάλυψης γης και ο χάρτης περιεκτικότητας των φυτών σε νερό, ο οποίος κατασκευάζεται από την αξιοποίηση δεδομένων πολυφασματικών δεκτών.

Το λογισμικό εφαρμόστηκε, με κάποιες τροποποιήσεις, στην ευρύτερη περιοχή της Κομοτηνής (Ελλάδα), για την οποία υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας. Τα δεδομένα αφορούσαν 8 επίγειους σταθμούς μετρήσεων, οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε βαμβακοκαλλιέργειες. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 13 εικόνες των δορυφόρων Sentinel-1A και Sentinel-1B, για την απόκτηση εκτιμήσεων εδαφικής υγρασίας, για το σύνολο της περιόδου των επίγειων δεδομένων (από Ιούλιο έως Σεπτέμβριο 2018).

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του MULESME, η περίοδος των διαθέσιμων δεδομένων επίγειων μετρήσεων, χωρίστηκε σε τρεις υπο-περιόδους, ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης των φυτών, καθώς η φυτοκάλυψη είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του λογισμικού. Κατασκευάστηκαν διαγράμματα διασποράς και υπολογίστηκε η ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (ΜΤΣ), μεταξύ εκτιμήσεων εδαφικής υγρασίας (εκτιμήσεις MULESME) και επίγειων μετρήσεων. Χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο αριθμό εικόνων SAR προηγούμενων χρονικών στιγμών, για κάθε περίοδο ανάπτυξης των φυτών, επιτεύχθηκε ρίζα ΜΤΣ της τάξης των $0.14 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

ABSTRACT

Soil moisture is a very important factor of land surface energy, influencing plenty of natural phenomena. It plays an important role in agriculture, hydrology and is a «key» factor for the characterization of global climate.

In situ measurements of soil moisture, although are precise, they are extremely time consuming and costly, while they are providing point scale data. Therefore, scientific society turned into remote sensing methods with the use of satellite data, for estimating soil moisture.

For this project is used MULESME (MULTitemporal Least Square Moisture Estimator) software, which was designed for the systematic mapping of surface soil moisture, using Sentinel-1 SAR data. Although was designed for the application in Italian territory (national scale), it can be used in areas outside Italian territory. It implements a multi-temporal algorithm, which is use Sentinel-1 time series data and ancillary data as inputs, such as a land cover map and a plant water content map, which is made from the utilization of multispectral sensors data.

The software was applied with some modifications to the wider area of Komotini (Greece), for which were available in situ measurements data of soil moisture. The data relates to 8 stations of ground measurements which was placed in cotton crops. In total, was used 13 images of Sentinel-1A and Sentinel-1B satellites, for the acquisition of soil moisture estimates for the entire period of ground data (from July to September of 2018).

For the validation of the results of MULESME, the period of the available in situ measurements was separated in three sub-periods, in relation to the plants stage of growth, as the plant cover is one of the factors that affects the accuracy of the software results. Scatter plots was confected and Route Mean Square Error (RMSE) was computed between estimations of soil moisture (MULESME estimates) and in situ measurements. Using the appropriate number of previous times SAR images for each period of plant growth, it was accomplished an RMSE in the order of $0.14 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα Καθηγήτρια κ. Καραθανάση Βασιλεία για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την επιστημονική υποστήριξη και το αμέριστο ενδιαφέρον της καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνεργάτη του εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης, κ. Πετρόπουλο Γεώργιο, για την εξασφάλιση του κώδικα και της άδειας χρήσης του χρησιμοποιηθέντος λογισμικού, καθώς και για την υποστήριξη και το ενδιαφέρον του, προκειμένου να καταστεί δυνατή η ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στην εταιρία NEUROPUBLIC για τη διάθεση των δεδομένων επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας, της περιοχής της Κομοτηνής, καθώς και στον κ. Luca Pulvirenti για την άδεια χρήσης του λογισμικού MULESME και τη διάθεση του κώδικα του.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ ανήκει στη σύζυγο μου Παρασκευή, στη μητέρα μου Σταυρούλα και στην αδερφή μου Ελισάβετ για την ηθική υποστήριξη τους, την υπομονή τους και την αμέριστη συμπαράσταση τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω τη διπλωματική μου εργασία στη μνήμη του αγαπημένου μου πατέρα Νικόλαου, ο οποίος δεν βρίσκεται πια εν ζωή και σε αυτόν οφείλω ό,τι έχω καταφέρει μέχρι σήμερα.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1. Γενικά.....	10
1.2. Σκοπός Εργασίας.....	10
1.3. Δομή Εργασίας.....	11
2. ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΚΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ- ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	12
2.1. Παθητικοί Αισθητήρες.....	12
2.1.1. Δορυφορική Αποστολή Landsat 8.....	13
2.2. Ενεργητικοί Αισθητήρες.....	18
2.2.1. Ενεργητικοί Μικροκυματικοί Αισθητήρες.....	19
2.2.2. RADAR.....	19
2.2.3. RADAR Συνθετικού Ανοίγματος (SAR).....	25
2.2.4. Δορυφορική Αποστολή Sentinel-1.....	26
3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΛΕΠΙ-ΣΚΟΠΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	31
3.1. Εδαφική Υγρασία.....	31
3.1.1. Σπουδαιότητα Μέτρησης.....	31
3.1.2. Ορισμός Και Τρόποι Έκφρασης.....	32
3.1.3. Μορφές Εδαφικής Υγρασίας.....	32
3.1.4. Το Έδαφος.....	33
3.2. Χρήση Μικροκυματικών Αισθητήρων Για Την Εκτίμηση Της Εδαφικής Υγρασίας.....	35
3.2.1. Καταλληλότητα Μικροκυματικών Φασματικών Καναλιών κι Αισθητήρων.....	35
3.2.2. Προηγούμενες Αποστολές Παθητικών Αισθητήρων.....	36
3.2.3. Προηγούμενες Αποστολές Ενεργητικών Αισθητήρων.....	39
3.3. Πλεονεκτήματα Αισθητήρων της Αποστολής Sentinel-1.....	41
4. ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ.....	43
4.1. Γενικά.....	43
4.2. Καλλιεργούμενες ποικιλίες.....	43
4.3. Βασικά Στοιχεία-Στάδια Ανάπτυξης.....	44
4.4. Απαιτήσεις Άρδευσης-Εδαφικής Υγρασίας.....	47
5. ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ.....	50
5.1. Ημι-εμπειρικό Μοντέλο Oh.....	50
5.1.1. Ανάλυση Μοντέλου.....	51
5.1.2. Μέθοδος Απευθείας Αναστροφής.....	55
5.1.3. Αποτελέσματα-Αξιολόγηση.....	58
5.2. Θεωρητικό Μοντέλο IEM.....	60
5.2.1. Εξισώσεις Μοντέλου.....	61
5.3. Ημι-εμπειρικό Μοντέλο Dubois.....	62
5.3.1. Εξισώσεις Μοντέλου.....	62
5.4. Σύγκριση μοντέλων Oh, IEM και Dubois.....	62
5.5. Αλγόριθμος SMOSAR.....	63
5.5.1. Δεδομένα.....	64
5.5.2. Περιγραφή Αλγορίθμου.....	65
5.5.3. Αξιολόγηση Αλγορίθμου.....	67
6. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MULESME.....	69
6.1. Δεδομένα και Μέθοδοι.....	69
6.1.1. Ανάκτηση Εδαφικής Υγρασίας.....	70

6.1.2. Ανάκτηση της Περιεκτικότητας των Φυτών σε Νερό Από Οπτικά Δεδομένα και Διόρθωση της Επίδρασης της Βλάστησης.....	71
6.1.3. Εκχώρηση βαθμού αβεβαιότητας.....	74
6.2. Το Λογισμικό.....	77
6.2.1. Δευτερεύον Επεξεργαστής.....	77
6.3. Ροή εργασιών του MULESME.....	78
6.3.1. Δεδομένα εισόδου.....	79
6.3.2. Δημιουργία και Φιλτράρισμα του Χάρτη Εδαφικής Υγρασίας.....	80
6.4. Αξιολόγηση Αλγορίθμου.....	82
6.4.1. Αξιολόγηση με Προσομοιωμένα Δεδομένα.....	82
6.4.2 Αξιολόγηση με Πειραματικά Δεδομένα.....	83
7. ΕΦΑΡΜΟΓΗ MULESME-ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΧΡΗΣΗΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ.....	84
7.1. Περιοχή Μελέτης.....	84
7.2. Δεδομένα Sentinel-1.....	84
7.2.1. Προεπεξεργασία Εικόνων Sentinel-1.....	85
7.3. Βοηθητικά Δεδομένα.....	93
7.3.1. Χάρτης Κάλυψης Γης.....	93
7.3.2. Χάρτης Τοπογραφικής Κλίσης.....	96
7.3.3. Χάρτης τοπικών γωνιών πρόσπτωσης.....	98
7.3.4. Lookup Table.....	99
7.3.5. Χάρτης Περιεκτικότητας Νερού των Φυτών.....	99
7.4. Δομή Φακέλων και Εισαγωγή Αρχείων.....	102
7.4.1. Εισαγωγή Βοηθητικών Αρχείων.....	102
7.4.2. Εφαρμογή λογισμικού.....	104
7.5. Δεδομένα Εξόδου.....	105
7.5.1. Χάρτης Περιεκτικότητας Νερού των Φυτών.....	105
7.5.2. Χάρτης Εκτίμησης Εδαφικής Υγρασίας.....	106
7.5.3. Χάρτης Αβεβαιότητας Εκτίμησης Εδαφικής Υγρασίας.....	107
8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	110
8.1. 1ο Σύνολο Εφαρμογών του MULESME.....	110
8.2. 2ο Σύνολο Εφαρμογών του MULESME.....	116
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	119
10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΡΘΡΟΓΡΑΦΙΑ.....	120
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	123
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	135

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Παθητικοί Δέκτες Τηλεπισκόπησης.....	13
Εικόνα 2: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	14
Εικόνα 3: Απεικόνιση του δορυφόρου Landsat 8 πάνω από τη Γη.....	16
Εικόνα 4: Συγκριτική εικόνα χωρικής ανάλυσης εικόνων των φασματικών καναλιών του Landsat 8.	16
Εικόνα 5: Γραφική απεικόνιση των φασματικών καναλιών των αισθητήρων OLI και TIRS του Landsat 8 και Landsat 7 ETM+.....	17
Εικόνα 6: Ενεργειακοί Αισθητήρες Τηλεπισκόπησης.....	20
Εικόνα 7: Γεωμετρία λήψης συστήματος RADAR.....	22
Εικόνα 8: Γωνία πρόσπτωσης συστήματος RADAR.....	25
Εικόνα 9: Εικόνες του Sentinel 1-A στις 01/11/2017 της περιοχής της Βρετανίας και Γαλλίας με πολικότητες VH, VV και έγχρωμο σύνθετο RGB.....	27
Εικόνα 10: Γεωμετρία μετάδοσης και λήψης σήματος RADAR, δύο διακριτών στόχων.....	28
Εικόνα 11: Διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση του αζιμουθίου	29
Εικόνα 12: Σύνθεση ανοίγματος κεραίας μέσω διαδοχικών της θέσεων.....	30
Εικόνα 13: Οι τέσσερις διαφορετικές λειτουργίες απόκτησης δεδομένων του Sentinel-1.....	32
Εικόνα 14: Διαφορετικές διατάξεις εδαφικών κόκκων.....	37
Εικόνα 15: Παγκόσμιος χάρτης εδαφικής υγρασίας από τον αισθητήρα AMSR-E με δεδομένα της C-band.....	41
Εικόνα 16: Παγκόσμιος χάρτης της μέσης εδαφικής υγρασίας του Ιουνίου έως Ιουλίου 2017, από τον αισθητήρα MIRAS.....	42
Εικόνα 17: Χάρτης αλλαγών εδαφικής υγρασίας της Ζηλανδίας (4 έως 13 Μαρτίου αριστερά και 13 έως 22 Μαρτίου δεξιά), ο οποίος ανακτήθηκε από πολυχρονικά δεδομένα ERS-1.....	43
Εικόνα 18: Τεχνική ScanSAR του οργάνου ASAR στον δορυφόρο ENVISAT.....	44
Εικόνα 19: Χάρτης εδαφικής υγρασίας της Νότιας Γερμανίας από τον δορυφόρο ENVISAT.....	45
Εικόνα 20: Πρώτο γόνατο-κοτυληδόνα βαμβακιού.....	48
Εικόνα 21: Χαρτογράφηση βαμβακιού.....	49
Εικόνα 22: Χρονική αποχή γονάτων.....	49
Εικόνα 23: Λευκό άνθος πρώτης θέσης.....	50
Εικόνα 24: Χτένια βαμβακιού.....	55
Εικόνα 25: Χτένια βαμβακιού.....	55
Εικόνα 26: Κατανάλωση νερού στα διάφορα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας βαμβακιού.....	56
Εικόνα 27: Αρχιτεκτονική του αλγορίθμου SMOSAR.....	76
Εικόνα 28: Ροή εργασιών MULESME.....	91
Εικόνα 29: Περιοχή μελέτης-Σταθμοί επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας (κόκκινες κουκίδες).	96
Εικόνα 30: Αποτύπωμα εικόνων Sentinel-1 στην περιοχή μελέτης.....	97
Εικόνα 31: Παράμετροι επεξεργασίας, εντολής εφαρμογής αρχείου τροχιών.....	98
Εικόνα 32: Επιλογή θέσης και ονόματος του αρχείου που δημιουργείται έπειτα από την επεξεργασία της εικόνας.....	98
Εικόνα 33: Παράμετροι επεξεργασίας, εντολής αφαίρεσης θερμικού θορύβου.....	99
Εικόνα 34: Παράμετροι επεξεργασίας, εντολής ραδιομετρικής βαθμονόμησης.....	111
Εικόνα 35: Παράμετροι επεξεργασίας, εντολής Multi-looking.....	112
Εικόνα 36: Παράμετροι επεξεργασίας, εντολής Range Doppler Terrain Correction.....	113
Εικόνα 37: Παράθυρο διαλόγου επιλογής γεωγραφικού συστήματος αναφοράς.....	113
Εικόνα 38: Χάρτης τοπικών γωνιών πρόσπτωσης περιοχής μελέτης.....	114
Εικόνα 39: Κανάλι τιμών οπισθοσκέδασης πόλωσης VH.....	115
Εικόνα 40: Κανάλι υψομετρικών τιμών.....	115
Εικόνα 41: Παράμετροι εντολής Reprojection.....	117

Εικόνα 42: Παράμετροι χάρτη εξόδου, εντολής Reprojection.....	117
Εικόνα 43: Παράμετροι εντολής Resize Data, λογισμικού ENVI.....	118
Εικόνα 44: Τελικός χάρτης κάλυψης γης, για την εισαγωγή στο MULESME.....	118
Εικόνα 45: Παράμετροι εντολής Merge, λογισμικού QGIS.....	119
Εικόνα 46: ΨΜΕ προσαρμοσμένο στις διαστάσεις της περιοχής μελέτης.....	122
Εικόνα 47: Παράμετροι εργαλείου Topographic Modeling, λογισμικού ENVI.....	122
Εικόνα 48: Τελικός χάρτης τοπογραφικής κλίσης, για την εισαγωγή στο MULESME.....	123
Εικόνα 49: Εικόνα Landsat 8 της 27/8/2018 και η καρτέλα Open and Load του εργαλείου Cloud Masking	125
Εικόνα 50: Παράμετροι εφαρμογής αλγορίθμου Fmask του λογισμικού QGIS	126
Εικόνα 51: Μάσκα εικονοστοιχείων νεφοκάλυψης (Μωβ χρώμα)	126
Εικόνα 52: Δομή φακέλων του MULESME	127
Εικόνα 53: Αρχεία βοηθητικών δεδομένων, φακέλου AncillaryDir.....	128
Εικόνα 54: Υποφάκελοι του φακέλου OpticalDir.....	128
Εικόνα 55: Αρχεία εικόνων Sentinel-1 στον φάκελο SNAPNewDir.....	129
Εικόνα 56: Κώδικας MULESME, στην κονσόλα της IDL.....	130
Εικόνα 57: Χάρτης περιεκτικότητας νερού των φυτών, της 27/8/2018.....	131
Εικόνα 58: Χάρτης εκτίμησης εδαφικής υγρασίας, της 04/09/2018.....	132
Εικόνα 59: Χάρτης αβεβαιότητας εκτίμησης εδαφικής υγρασίας, της 04/09/2018.....	133
Εικόνα 60: Χάρτης αβεβαιότητας εκτίμησης εδαφικής υγρασίας της 04/09/2018 και εικόνα Landsat 8 της 27/8/2018.....	134
Εικόνα 61: Πληροφορίες εκτίμησης εδαφικής υγρασίας και αβεβαιότητας της, του εικονοστοιχείου στο οποίο ανήκει ο σταθμός επίγειων μετρήσεων « Κομοτηνή 2 ».....	134

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Φασματικά κανάλια των των αισθητήρων OLI και TIRS του Landsat 8 και Landsat 7 ETM+.....	17
Πίνακας 2: Επίπεδα επεξεργασίας του επιπέδου Level-1 landsat.....	19
Πίνακας 3: Κανάλια εκπομπής RADAR με αντίστοιχα εύρη συχνοτήτων και μηκών κύματος.....	25
Πίνακας 4: Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος, επεξεργασίας εικόνων 1ης περιόδου	136
Πίνακας 5: Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος, επεξεργασίας εικόνων 2ης περιόδου	137
Πίνακας 6: Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος, επεξεργασίας εικόνων 3ης περιόδου	138
Πίνακας 7: Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος, επεξεργασίας 1+1 εικόνων, για το σύνολο της περιόδου.....	141

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 1: Ευαισθησία του συντελεστή οπισθοσκέδασης σε σχέση με την παράμετρο τραχύτητας k_s και την περιεχόμενη εδαφική υγρασία M_u , με τοπική γωνία πρόσπτωσης 45°	52
Γράφημα 2: Ευαισθησία της αναλογίας όμοιων πολώσεων p σε σχέση με την παράμετρο τραχύτητας k_s και την περιεχόμενη εδαφική υγρασία M_v , με τοπική γωνία πρόσπτωσης 45°	53
Γράφημα 3: Ευαισθησία της αναλογίας διασταυρωμένων πολώσεων q σε σχέση με την παράμετρο τραχύτητας k_s και την εδαφική κλίση, με τοπική γωνία πρόσπτωσης 45°	53
Γράφημα 4: Η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας M_v σε σχέση με τον συντελεστή οπισθοσκέδασης $\sigma(vh)(dB)$	54
Γράφημα 5: Η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας M_v σε σχέση με την αναλογία όμοιων πολώσεων p	55
Γράφημα 6: Διάγραμμα ροής της ανάκτησης των s και M_v από μετρημένες τιμές συντελεστών οπισθοσκέδασης.....	57
Γράφημα 7: Σύγκριση ανάμεσα στις μετρημένες τιμές και στις τιμές που προέρχονται από εκτίμηση, της επιφανειακής παραμέτρου k_s	59
Γράφημα 8: Σύγκριση ανάμεσα στις μετρημένες τιμές και στις τιμές που προέρχονται από εκτίμηση, του rms του ύψους επιφανείας.....	60
Γράφημα 9: Σύγκριση ανάμεσα στις μετρημένες τιμές και στις τιμές που προέρχονται από εκτίμηση, της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας.....	60
Γράφημα 10: Διασπορά πόλωσης HH (άνω διάγραμμα) και πόλωσης VV (κάτω διάγραμμα) ανάμεσα σε τιμές εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας και των τιμών από το υδρολογικό μοντέλο ..	68
Γράφημα 11: Ιστόγραμμα των κανονικοποιημένων τιμών που περιλαμβάνονται στον LUT, ως προς το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης γ_{vh}	73
Γράφημα 12: Συναρτήσεις συμμετοχής σε κλάσεις S και Z.....	75
Γράφημα 13: Συντελεστής συσχέτισης και Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (RMSE) σε σχέση με τον αριθμό των εικόνων της χρονοσειράς επεξεργασίας.....	82
Γράφημα 14: Διασπορά μεταξύ εκτιμήσεων και επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας, με επεξεργασία 1+1 εικόνων.....	114
Γράφημα 15: Διασπορά μεταξύ εκτιμήσεων και επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας, με επεξεργασία 1+2 εικόνων.....	114
Γράφημα 16: Διασπορά μεταξύ εκτιμήσεων και επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας, με επεξεργασία 1+3 εικόνων.....	115
Γράφημα 17: Διασπορά μεταξύ εκτιμήσεων και επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας, με επεξεργασία 1+4 εικόνων.....	115
Γράφημα 18: Διασπορά μεταξύ εκτιμήσεων και επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας της 1ης περιόδου, με επεξεργασία 1+1 εικόνων.....	117

Γράφημα 19: Διασπορά μεταξύ εκτιμήσεων και επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας της 2ης περιόδου, με επεξεργασία 1+1 εικόνων.....	117
Γράφημα 20: Διασπορά μεταξύ εκτιμήσεων και επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας της 3ης περιόδου, με επεξεργασία 1+1 εικόνων.....	118

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά

Η εδαφική υγρασία αποτελεί μία ιδιαίτερα σημαντική συνιστώσα του υδρολογικού κύκλου. Οι πληροφορίες για αυτήν είναι πολύτιμες για κυβερνητικές υπηρεσίες και ιδιωτικές εταιρείες, τα αντικείμενα μελέτης των οποίων, αφορούν τον καιρό, το κλίμα και τον έλεγχο των πλημμυρών. Αποτελεί μια μεταβλητή «κλειδί» για τον έλεγχο της ανταλλαγής νερού και θερμικής ενέργειας μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και της ατμόσφαιρας, μέσω της εξάτμισης και της διαπνοής. Συνεπώς, η εδαφική υγρασία παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη καιρικών μοτίβων και στην δημιουργία κατακρημνισμάτων.

Για την αποτελεσματική μέτρηση και την απόκτηση αξιοποιήσιμων πληροφοριών για την εδαφική υγρασία, απαιτούνται επίγειες μετρήσεις σε ευρεία χωρική και χρονική κλίμακα. Αυτού του είδους οι μετρήσεις παρέχουν δεδομένα ακριβείας, όμως έχουν υψηλό χρηματικό κόστος και είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες. Ως εκ τούτου η επιστημονική κοινότητα στράφηκε σε τηλεπισκοπικές μεθόδους, για τη μέτρηση της.

Η ανάπτυξη τηλεπισκοπικών μεθόδων εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας, ξεκίνησαν τη δεκαετία του 1970, λίγο μετά την ανάπτυξη της δορυφορικής τεχνολογίας, με σκοπό τη συλλογή πληροφοριών, σε παγκόσμια κλίμακα. Αν και έγιναν σημαντικά βήματα, στην πάροδο των δεκαετιών, η απόκτηση αξιοποιήσιμων δεδομένων εδαφικής υγρασίας, αποτελεί μέχρι και σήμερα, αντικείμενο έρευνας.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, στην περιοχή των μικροκυμάτων, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις διηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη διαστημικών μικροκυματικών αισθητήρων, παρέχει πολλές δυνατότητες στον τομέα της εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας από το διάστημα. Εντούτοις, λόγω του ότι η μικροκυματική ακτινοβολία είναι ευαίσθητη και σε άλλους παράγοντες (εδαφική τραχύτητα και βλάστηση), απαιτείται η κατασκευή μοντέλων για την ανάκτηση της εδαφικής υγρασίας από το καταγραφόμενο σήμα των αισθητήρων. Η κατασκευή αυτών των μοντέλων, αποδεικνύεται ιδιαίτερα απαιτητική, λόγω της πολυπλοκότητας της γήινης επιφάνειας, ενώ πολλά από αυτά αποτελούνται από εμπειρικές παραμέτρους και χρησιμοποιούνται σε περιοχές με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Η αποστολή των δορυφόρων Sentinel-1 (εκτόξευση και του δεύτερου δορυφόρου του σχηματισμού τον Απρίλιο 2016), με σύγχρονους μικροκυματικούς αισθητήρες (RADAR-SAR) και χρονική διακριτική ικανότητα 6 ημερών (με αξιοποίηση των απεικονίσεων και των δύο δορυφόρων του σχηματισμού), έδωσε στους επιστήμονες νέες προοπτικές στην εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας από το διάστημα.

1.2. Σκοπός Εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας, είναι η εφαρμογή του αλγορίθμου MULESME (με κατάλληλες μετατροπές, όπου απαιτήθηκε), με χρήση των απεικονίσεων RADAR των δορυφόρων της αποστολής Sentinel-1, σε περιοχή του Ελλαδικού χώρου και στη συνέχεια η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, με βάση τα αντίστοιχα αποτελέσματα επίγειων

μετρήσεων. Οι επίγειες μετρήσεις, πραγματοποιήθηκαν σε βαμβακοκαλλιέργειες, συνεπώς η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου, επιχειρήθηκε σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητες των σταδίων ανάπτυξης των βαμβακόφυτων.

1.3. Δομή Εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει εννέα κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του κεφαλαίου της εισαγωγής, με το ακόλουθο περιεχόμενο:

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται μια εισαγωγή στις τηλεπισκοπικές απεικονίσεις που χρησιμοποιήθηκαν και στα χαρακτηριστικά τους, καθώς και στους παθητικούς και ενεργητικούς αισθητήρες από τους οποίους προήλθαν.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** ορίζεται η εδαφική υγρασία ως μέγεθος και αναλύονται χαρακτηριστικά του εδάφους που την επηρεάζουν. Επιπλέον, παρατίθενται οι λόγοι που χρησιμοποιούνται οι μικροκυματικοί αισθητήρες για την εκτίμηση της από το διάστημα και αναφέρονται προηγούμενες δορυφορικές αποστολές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της, καθώς και τα πλεονεκτήματα της σύγχρονης αποστολής Sentinel-1.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** αναφέρονται γενικά στοιχεία για τις βαμβακοκαλλιέργειες, τα στάδια ανάπτυξης του φυτού και το πως αυτά επηρεάζονται από την ποσότητα εδαφικής υγρασίας.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται μοντέλα εδαφικής υγρασίας από τη διεθνή βιβλιογραφία, με έμφαση στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Στο **έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται το λογισμικό MULESME, η μεθοδολογία και τα μοντέλα που εμπλέκονται για την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας, καθώς και η αξιολόγησή του σύμφωνα με την αντίστοιχη δημοσίευση.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης και γίνεται αναλυτική αναφορά στα απαιτούμενα στάδια προ-επεξεργασίας των δεδομένων για την εισαγωγή τους στο MULESME. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα απαιτούμενα βήματα από τον εκάστοτε χρήστη του λογισμικού για την εφαρμογή του, καθώς και τα χαρακτηριστικά των δεδομένων εξόδου.

Στο **όγδοο κεφάλαιο** πραγματοποιείται η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας στην περιοχή μελέτης, σύμφωνα με τα αποτελέσματα επίγειων μετρήσεων.

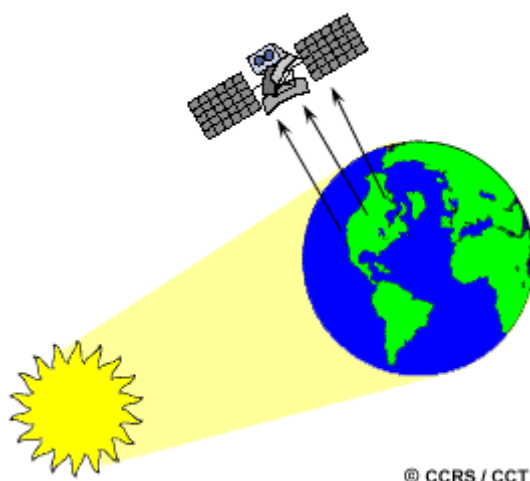
Στο **ένατο κεφάλαιο** τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις που προέκυψαν από την αξιολόγηση του όγδου κεφαλαίου.

2. ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΚΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ- ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Για την παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν Τηλεσκοπικές απεικονίσεις προερχόμενες τόσο από Παθητικούς όσο και από Ενεργητικούς Αισθητήρες. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στους προαναφερόμενους τύπους αισθητήρων και στις δορυφορικές αποστολές από τις οποίες προήλθαν οι Τηλεσκοπικές Απεικονίσεις που χρησιμοποιήθηκαν.

2.1. Παθητικοί Αισθητήρες

Οι παθητικοί αισθητήρες (passive sensors) αποτελούν συστήματα ανίχνευσης και καταγραφής της ακτινοβολίας που εκπέμπεται ή ανακλάται από το παρατηρούμενο αντικείμενο-στόχο. Τα συστήματα αυτά ανιχνεύουν το τμήμα του φάσματος που εκτείνεται από την περιοχή των πολύ μικρών μηκών κύματος της υπεριώδους ακτινοβολίας έως την περιοχή του απώτερου υπερύθρου ($0,38\mu\text{m} < \lambda < 1000\mu\text{m}$) (Καρτάλης και Φείδας, 2013).



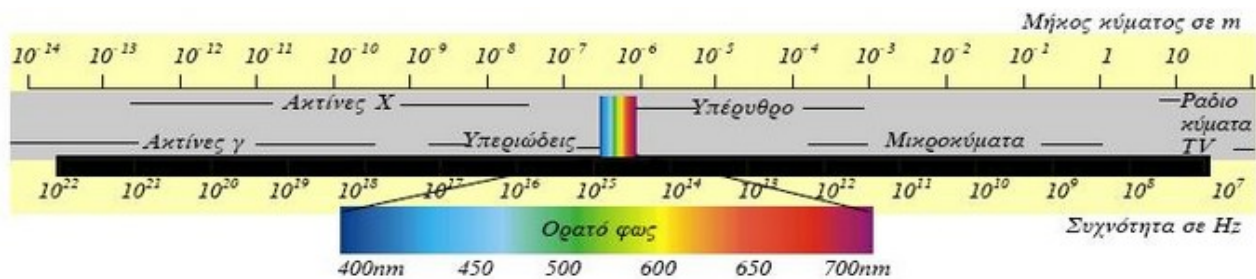
Εικόνα 1: Παθητικοί Δέκτες Τηλεπισκόπησης

Πηγή: <https://www.nrcan.gc.ca>

Η επιστήμη της Τηλεπισκόπησης αξιοποιεί την ακτινοβολία του ήλιου, η οποία αποτελεί την κύρια πηγή ενέργειας, προκειμένου να καταγράψει με τη χρήση των παθητικών αισθητήρων την ηλιακή ενέργεια η οποία είτε ανακλάται από τη γήινη επιφάνεια και τα αντικείμενα πάνω σε αυτή (ορατά μήκη κύματος), είτε απορροφάται κι έπειτα επανεκπέμπεται (θερμικά υπέρυθρα μήκη κύματος). Όπως γίνεται αντιληπτό, η καταγραφή της ανακλώμενης ενέργειας, είναι δυνατή μόνο κατά τη διάρκεια που ο ήλιος φωτίζει την περιοχή της γήινης επιφάνειας. Μόνο η ενέργεια της περιοχής του θερμικού υπερύθρου μπορεί να καταγραφεί κατά τη διάρκεια της νύχτας, εφόσον είναι επαρκής, καθώς σε αυτά τα μήκη κύματος εκπέμπεται από τη γήινη επιφάνεια ακτινοβολία.

Οι αισθητήρες που διατίθενται σήμερα, μπορούν να καταγράψουν όλο το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Εικόνα 2) κι επιλέγονται ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Δεν χρησιμοποιούνται όλοι οι διαθέσιμοι αισθητήρες στην Τηλεπισκόπηση,

καθώς σε κάποιες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα είναι είτε ολική, είτε απορροφάται μερικώς. Το αποτέλεσμα αυτή της ολικής ή μερικής απορρόφησης, είναι κατ' αντιστοιχία και η μερική ή ανύπαρκτη διάδοση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, γεγονός που κάνει μη αξιοποιήσιμη την καταγραφή της ενέργειας των συγκεκριμένων περιοχών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.



Εικόνα 2: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα
 (Τα όρια μεταξύ των ζωνών είναι κάπως αυθαίρετα)
 Πηγή: <https://www.ebooks.edu.gr>

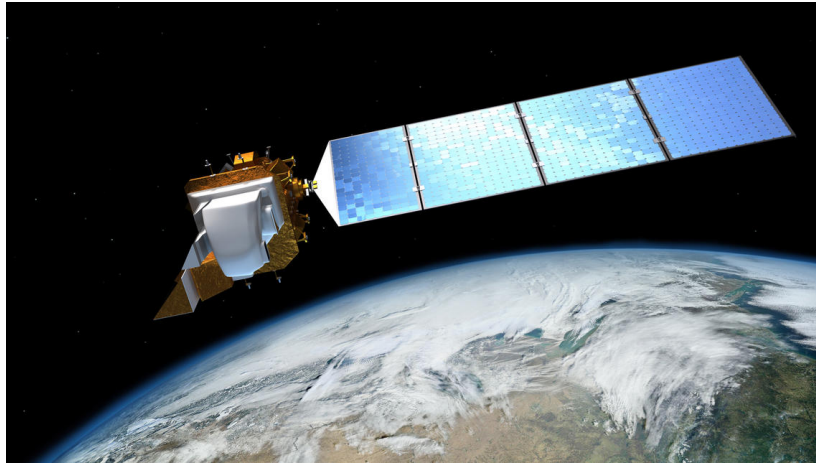
Η καταγραφή ενός τμήματος του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, παράγει μια εικόνα η οποία περιέχει πληροφορίες για την γήινη επιφάνεια, που εξαρτάται από το συγκεκριμένο τμήμα του φάσματος.

Για την πληρότητα της βιβλιογραφίας, θα πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν και παθητικοί αισθητήρες οι οποίοι καταγράφουν στην περιοχή των μικροκυμάτων, στην οποία θα αναφερθούμε αναλυτικότερα σε επόμενη ενότητα. Ένας παθητικός μικροκυματικός αισθητήρας, καταγράφει τη φυσικά εκπεμπόμενη μικροκυματική ενέργεια των σωμάτων, η οποία σχετίζεται με την υγρασία και τη θερμοκρασία τους. Είναι συνήθως Ραδιόμετρα ή Σαρωτές και χαρακτηρίζονται από χαμηλή διακριτική ικανότητα. Για την παρούσα εργασία δεν χρησιμοποιήθηκαν απεικονίσεις παθητικών αισθητήρων.

2.1.1. Δορυφορική Αποστολή Landsat 8

Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν εικόνες της δορυφορικής αποστολής Landsat 8, ο δορυφόρος της οποίας, φέρει Παθητικούς Αισθητήρες. Στη συνέχεια παρατίθενται λεπτομέρειες για την συγκεκριμένη αποστολή, από την ιστοσελίδα της NASA.

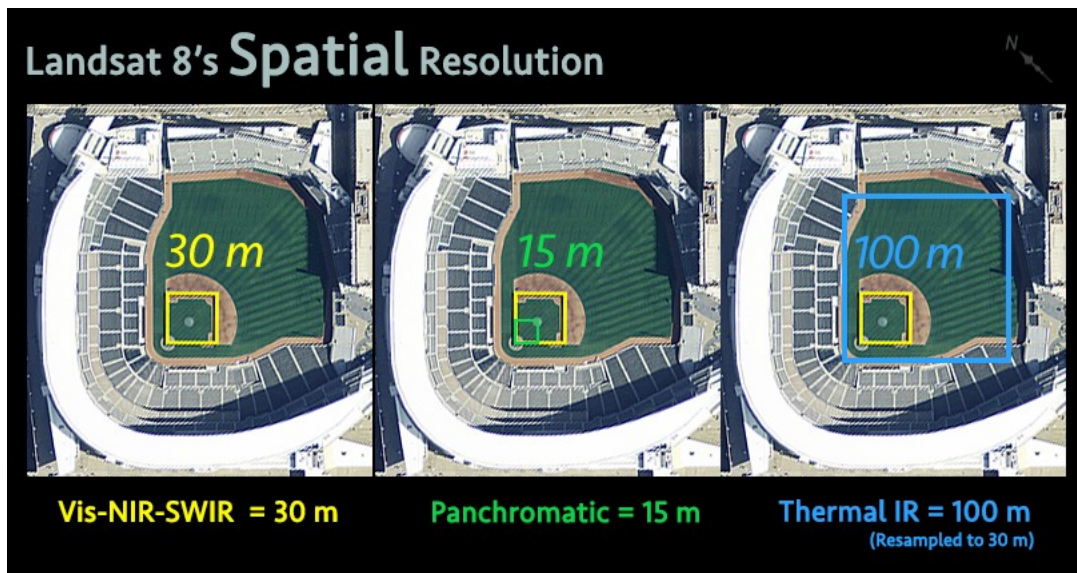
Ο δορυφόρος Landsat8 εκτοξεύθηκε στις 11 Φεβρουαρίου 2013, από την αεροπορική βάση Vandenberg στην Καλιφόρνια και αναπτύχθηκε από τη NASA, σε συνεργασία με τη γεωλογική υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS). Η NASA ανέλαβε τον σχεδιασμό, την κατασκευή, την εκτόξευση και τα εν τροχιά στάδια βαθμονόμησης του δορυφόρου, περίοδο κατά την οποία ο δορυφόρος ονομαζόταν Landsat Data Continuity Mission (LDCM). Στις 30 Μαΐου του 2013, η USGS ανέλαβε τις διαδικασίες λειτουργίας του δορυφόρου και πλέον οι διαδικασίες βαθμονόμησης, ο δορυφορικός χειρισμός, η παραγωγή και η αποθήκευση δεδομένων στο κέντρο Earth Resources Observation and Science (EROS) είναι αντικείμενο εργασίας της USGS. Μετά από τη μετάβαση αυτή, ο δορυφόρος μετονομάστηκε σε Landsat 8.



Εικόνα 3: Απεικόνιση του δορυφόρου Landsat 8 πάνω από τη Γη

Πηγή: <https://www.usgs.gov>

Ο Landsat 8 φέρει δύο όργανα καταγραφής: i) το Operational Land Imager (OLI) και ii) το Thermal Infrared Sensor (TIRS). Αυτοί οι δύο αισθητήρες παρέχουν εποχική κάλυψη της παγκόσμιας ξηράς σε χωρική ανάλυση 30 μέτρων για τα κανάλια που βρίσκονται στο ορατό, κοντινό υπέρυθρο και μακρινό επέρυθρο, 100 μέτρων για τα θερμικά κανάλια και 15 μέτρων για το παγχρωματικό.



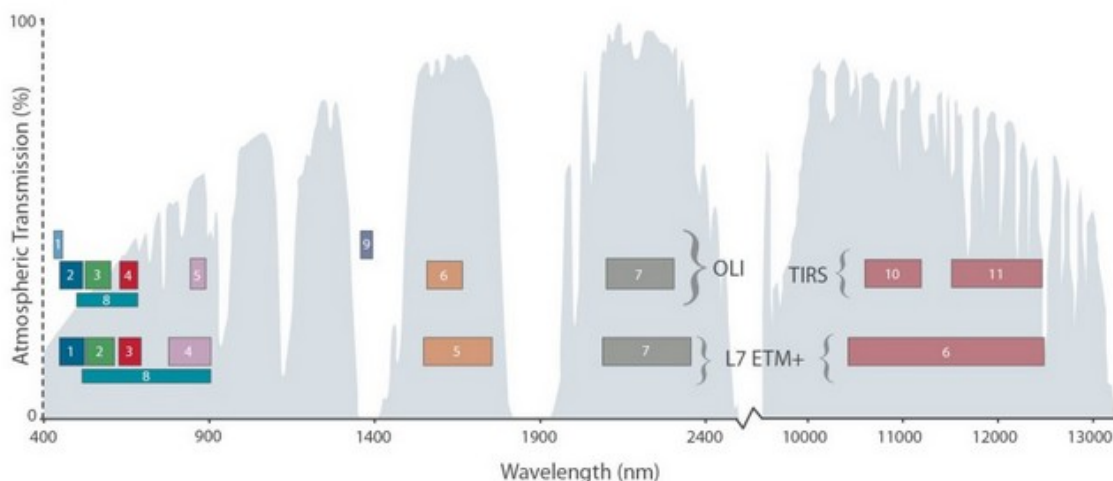
Εικόνα 4: Συγκριτική εικόνα χωρικής ανάλυσης εικόνων των φασματικών καναλιών του Landsat 8.

Πηγή: <https://landsat.gsfc.nasa.gov>

Ο αισθητήρας OLI παρέχει δύο νέες φασματικές ζώνες, μία προσαρμοσμένη ειδικά για την ανίχνευση νεφών και μία για παρατηρήσεις της παράκτιας ζώνης.

Σχετικά με τον αισθητήρα TIRS, συλλέγει δεδομένα σε 2 φασματικά κανάλια στο τμήμα του θερμικού υπέρυθρου, σε αντίθεση με τους προηγούμενους δορυφόρους Landsat 4-7 του προγράμματος, στους οποίους υπήρχε μόνο 1 φασματικό κανάλι για το συγκεκριμένο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Ο Landsat 8 αποστέλλει περίπου 400 λήψεις εικόνων ανά ημέρα στο αρχείο δεδομένων της USGS (150 παραπάνω από τον Landsat 7), αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο την πιθανότητα λήψης εικόνων χωρίς σύννεφα.



Εικόνα 5: Γραφική απεικόνιση των φασματικών καναλιών των αισθητήρων OLI και TIRS του Landsat 8 και Landsat 7 ETM+.

Πηγή: <https://landsat.gsfc.nasa.gov>

Landsat-7 ETM+ Bands (μm)			Landsat-8 OLI and TIRS Bands (μm)		
			30 m Coastal/Aerosol	0.435 - 0.451	Band 1
Band 1	30 m Blue	0.441 - 0.514	30 m Blue	0.452 - 0.512	Band 2
Band 2	30 m Green	0.519 - 0.601	30 m Green	0.533 - 0.590	Band 3
Band 3	30 m Red	0.631 - 0.692	30 m Red	0.636 - 0.673	Band 4
Band 4	30 m NIR	0.772 - 0.898	30 m NIR	0.851 - 0.879	Band 5
Band 5	30 m SWIR-1	1.547 - 1.749	30 m SWIR-1	1.566 - 1.651	Band 6
Band 6	60 m TIR	10.31 - 12.36	100 m TIR-1	10.60 - 11.19	Band 10
			100 m TIR-2	11.50 - 12.51	Band 11
Band 7	30 m SWIR-2	2.064 - 2.345	30 m SWIR-2	2.107 - 2.294	Band 7
Band 8	15 m Pan	0.515 - 0.896	15 m Pan	0.503 - 0.676	Band 8
			30 m Cirrus	1.363 - 1.384	Band 9

Πίνακας 1: Φασματικά κανάλια των των αισθητήρων OLI και TIRS του Landsat 8 και Landsat 7 ETM+.

Πηγή: <https://landsat.gsfc.nasa.gov>

Τα δεδομένα της αποστολής Landsat, διατίθενται στους χρήστες σε συλλογές (Collections). Υπάρχουν δύο συλλογές δεδομένων, Collection 1 και Collection 2. Όλες οι απεικονίσεις στο αρχείο Landsat, είναι καταχωρημένες σε μία από αυτές τις δύο συλλογές. Ο σκοπός του χωρισμού των δεδομένων σε συλλογές, είναι η υποστήριξη της γρήγορης κι εύκολης αναγνώρισης των κατάλληλων απεικονίσεων για ανάλυση χρονικών σειρών επιπέδου εικονοστοιχείου.

Collection 1

Η συλλογή δεδομένων Collection 1 είναι διαθέσιμη στο κοινό και αποτελείται από τέσσερα επίπεδα (Levels): Level-0, Level-1, Level-2 και Level-3. Το επίπεδο των διατιθέμενων δεδομένων προσδιορίζεται από την ύπαρξη σημείων ελέγχου επί του εδάφους (Ground Control Points), δεδομένα υψομέτρου τα οποία παρέχονται από ψηφιακά μοντέλα εδάφους (Digital Elevation Model) και/ή την ύπαρξη δεδομένων τα οποία συλλέχθηκαν από το διαστημόπλοιο και τον αισθητήρα (Payload Correction Data -PCD)

• Level-0

Στο επίπεδο απεικονίσεων Level-0, περιέχονται δεδομένα καταγραφής (raw data) όπως αυτά συλλέχθηκαν από τον αισθητήρα. Δεδομένου του ότι υπάρχουν κάποιες θεμελιώδεις διορθώσεις οι οποίες θα έπρεπε να έχουν εφαρμοστεί πριν να είναι αξιοποιήσιμα, τα δεδομένα αυτού του επιπέδου αυτού, δεν διανέμονται συχνά στο κοινό.

• Level-1

Στο επίπεδο Level-1, τα δεδομένα παρέχεται στους χρήστες με ραδιομετρική και γεωδαιτική ακρίβεια, συνδυάζοντας επίγεια σημεία ελέγχου (GCP), χρησιμοποιώντας παράλληλα ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους για τοπογραφική μετατόπιση.

• Level-2

Στο επίπεδο Level-2, παρέχονται δεδομένα παρατήρησης χρονοσειρών επαρκούς μήκους, συνέπειας και συνέχειας, για την καταγραφή των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και χρησιμεύουν ως εισροές στα προϊόντα Landsat Level-3.

• Level-3

Στο επίπεδο Level-3, παρέχονται δεδομένα τα οποία αντιπροσωπεύουν βιοφυσικές ιδιότητες της επιφάνειας της γης και παράγονται από έτοιμα δεδομένα ανάλυσης U.S Landsat (Analysis Ready Data).

Οι σκηνές του επιπέδου **Level-1**, εάν είναι δυνατόν, επεξεργάζονται σε επίπεδο L1TP (Level-1 and Systematic and Terrain Corrected). Σε περίπτωση ανεπαρκών δεδομένων αναφοράς, δημιουργούνται τα δεδομένα systematic and terrain corrected L1GT ή systematic L1GS, αντί των L1TP.

- ➔ Τα δεδομένα **L1TP** είναι ραδιομετρικά βαθμονομημένα κι έχει εφαρμοστεί σε αυτά ορθοαναγωγή, χρησιμοποιώντας επίγεια σημεία ελέγχου (GCP) και ψηφιακό μοντέλο εδάφους, ώστε να γίνει διόρθωση για μετατόπιση λόγω υψομέτρου.
- ➔ Τα δεδομένα **L1GS**, είναι ραδιομετρικά βαθμονομημένα και με συστηματικές γεωμετρικές διορθώσεις, οι οποίες εφαρμόζονται χρησιμοποιώντας δεδομένα επί του δορυφόρου και δεδομένα ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) για τη διόρθωση της μετατόπισης λόγω αναγλύφου.
- ➔ Τα δεδομένα **L1GS** είναι ραδιομετρικά βαθμονομημένα αλλά μόνο με συστηματικές γεωμετρικές διορθώσεις, οι οποίες εφαρμόζονται χρησιμοποιώντας δεδομένα εφημερίδων επί του δορυφόρου.

Landsat Level-1 Processing Levels	
Processing Level	Description
Standard Terrain Correction L1TP	Radiometrically calibrated and orthorectified using ground control points and digital elevation model (DEM) data to correct for relief displacement. These are the highest quality Level-1 products suitable for pixel-level time series analysis.
Systematic Terrain Correction L1GT	Radiometrically calibrated and with systematic geometric corrections applied using the spacecraft ephemeris data and DEM data to correct for relief displacement.
Systematic Correction L1GS	Radiometrically calibrated and with only systematic geometric corrections applied using the spacecraft ephemeris data.

Πίνακας 2: Επίπεδα επεξεργασίας του επιπέδου Level-1 landsat.

Πηγή: <https://www.usgs.gov>

Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των δεδομένων της συλλογής «Collection 1», του επιπέδου Level-1, όλες οι σκηνές Landsat 8 OLI/TIRS στο αρχείο USGS (United States Geological Survey), είναι καταχωρημένες σε συγκεκριμένες κατηγορίες, οι οποίες ορίστηκαν το 2016 από την USGS και ονομάζονται “Tier”. Αυτά τα δεδομένα έχουν καλά χαρακτηρισμένη ραδιομετρική ποιότητα και έχουν βαθμονομηθεί διασταυρωμένα μεταξύ των διαφορετικών αισθητήρων Landsat.

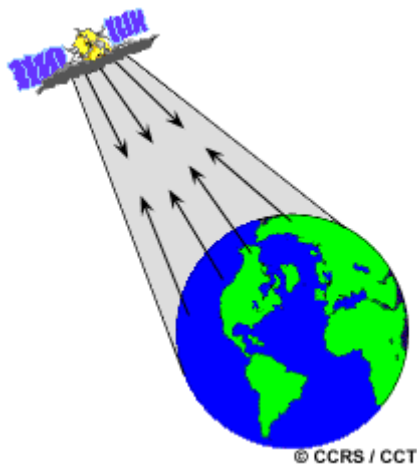
- **Tier 1 (T1):** Διαθέτουν την υψηλότερη ποιότητα δεδομένων ακρίβειας εδάφους (Precision Terrain) του επιπέδου Level-1 (L1TP), τα οποία θεωρούνται κατάλληλα γι’ ανάλυση χρονοσειρών. Η γεωαναφορά γίνεται με συνέπεια κι εντός προκαθορισμένων ανοχών (<12m μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE)).
- **Tier 2 (T2):** Περιέχουν τις σκηνές της κατηγορίας (L1TP), οι οποίες δεν πληρούν τα κριτήρια της κατηγορίας T1 και όλες τις σκηνές Systematic Terrain (L1GT) και Systematic (L1GS), στα οποία θα αναφερθούμε στη συνέχεια. Οι χρήστες που ενδιαφέρονται για τα δεδομένα Tier 2, μπορούν ν’ αξιολογήσουν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) και τις άλλες ιδιότητες για τον προσδιορισμό της σταθερότητας για χρήση σε εφαρμογές και μελέτες.
- **Real-Time (RT):** Περιέχουν νεοαποκτηθέντες σκηνές Landsat8, για τις οποίες απαιτείται μια περίοδος αξιολόγησης και βαθμονόμησης μετά την απόκτηση τους, αλλά επεξεργάζονται αμέσως με βάση προκαταρκτικούς συντελεστές βαθμονόμησης κι εκχωρούνται προσωρινά στην κατηγορία RT Tier, όντας διαθέσιμα για λήψη. Όταν διατεθούν οριστικές πληροφορίες βαθμονόμησης, οι σκηνές αυτές επεξεργάζονται κι εκχωρούνται στην κατάλληλη κατηγορία Tier 1 ή Tier 2 κι απομακρύνονται από την κατηγορία RT Tier.

Collection 2

Η συλλογή «Collection 2», μέχρι το χρόνο συγγραφής αυτής της εργασίας δεν είναι διαθέσιμη στους χρήστες, εκτός από κάποια δοκιμαστικά δεδομένα, αλλά αναμένεται να διατεθεί μέσα στο έτος 2019. Τα χαρακτηριστικά των δεδομένων που θα βελτιωθούν με την Collection 2, είναι η γεωδαιτική ακρίβεια κάνοντας χρήση των ενημερωμένων επίγειων σημείων ελέγχου (GCP) του Landsat 8 OLI και/ή του Συστήματος Παγκόσμιας Απεικόνισης (Global Reference Image) του Sentinel 2. Επιπλέον η USGS θα διανείμει κι ένα επίπεδο προϊόντων Level-2, το οποίο θα περιλαμβάνει δεδομένα επιφανειακής θερμοκρασίας και ανακλαστικότητας .

2.2. Ενεργητικοί Αισθητήρες

Οι ενεργητικοί αισθητήρες (active sensors) χρησιμοποιούν δική τους πηγή ακτινοβολίας την οποία κατευθύνουν προς το υπό έρευνα αντικείμενο, αυτή στη συνέχεια ανακλάται από τον στόχο (αντικείμενο ή περιοχή της επιφάνειας της γης), επιστρέφει και καταγράφεται από το σύστημα (Καρτάλης και Φείδας,2013).



Εικόνα 6: Ενεργητικοί Αισθητήρες Τηλεπισκόπησης
Πηγή: <https://www.nrcan.gc.ca>

Οι ενεργητικοί αισθητήρες παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της απόκτησης μετρήσεων της ανακλώμενης ενέργειας, χωρίς περιορισμό στην ώρα ή στην εποχή λήψης των μετρήσεων, καθώς όπως προαναφέρθηκε δεν απαιτείται εξωτερική πηγή ενέργειας όπως ο ήλιος για τους παθητικούς αισθητήρες.

Το σημαντικότερο από τα μειονεκτήματα των συστημάτων ενεργητικών αισθητήρων είναι ότι απαιτούν αρκετά μεγάλη ποσότητα ενέργειας προκειμένου να εκπέμψουν στα αντικείμενα-στόχους ακτινοβολία, η οποία στη συνέχεια θα οπισθοσκεδαστεί από τα προς έρευνα αντικείμενα και θα καταγραφεί από το σύστημα.

2.2.1. Ενεργητικοί Μικροκυματικοί Αισθητήρες

Τα μικροκύματα είναι η περιοχή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με μήκος κύματος από 1 εκατοστό έως 1 μέτρο με αντιστοιχία σε συχνότητες μεταξύ 0.3 και 300 GHz. Συγκριτικά με το μήκος κύματος στις περιοχές του ορατού και του υπερέθρου, τα μικροκύματα διαθέτουν μεγάλο μήκος κύματος (Εικόνα 2), γεγονός που τους προσδίδει ιδιαίτερες ιδιότητες. Ο κλάδος της επιστήμης της Τηλεπισκόπησης που αξιοποιεί τις ιδιότητες της μικροκυματικής ακτινοβολίας για την ανίχνευση και παρατήρηση αντικειμένων και χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας, ονομάζεται **Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση**.

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της μικροκυματικής ακτινοβολίας, είναι ότι διαπερνά τα σύννεφα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα σταγονίδια από τα οποία συνιστώνται τα σύννεφα, έχουν τυπική διάμετρο 0.1 χιλιοστά, δηλαδή πολύ μικρότερα από το μήκος κύματος των μικροκυμάτων. Απόσβεση της μικροκυματικής ακτινοβολίας παρατηρείται σε περίπτωση καταιγίδας και για μικρότερα μήκη κύματος (μήκη κύματος μικρότερα των 3 εκατοστών) (B. Καραθανάση, 2012).

Η παραπάνω ιδιότητα επιτρέπει την καταγραφή του επιστρεφόμενου σήματος κάτω από σχεδόν όλες τις καιρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες και σε συνδυασμό με την δυνατότητα των ενεργητικών αισθητήρων να καταγράφουν με απουσία φυσικού φωτισμού (νύχτα), οι ενεργοί μικροκυματικοί αισθητήρες διαθέτουν ιδιαίτερα αυξημένες επιχειρησιακές δυνατότητες.

Οι ενεργητικοί μικροκυματικοί αισθητήρες χωρίζονται σε:

- ανεικονιστές
- απεικονιστές

Οι ανεικονιστές μετρούν την ακτινοβολία η οποία προέρχεται από όλα τα σημεία της περιοχής που καταγράφεται, την ολοκληρώνουν σε μία μέση τιμή και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα. Στην περίπτωση αυτή, η ακτινοβολία που καταγράφεται, χαρακτηρίζει το σύνολο της περιοχής που ανιχνεύεται, χωρίς να επιμερίζεται στα διάφορα σημεία της (Καρτάλης και Φείδας 2013). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν παθητικοί αισθητήρες όπως τα μικροκυματικά ραδιόμετρα και ενεργητικοί οι οποίοι εκτελούν μετρήσεις του ύψους των στόχων, όπως τα μικροκυματικά αλτίμετρα.

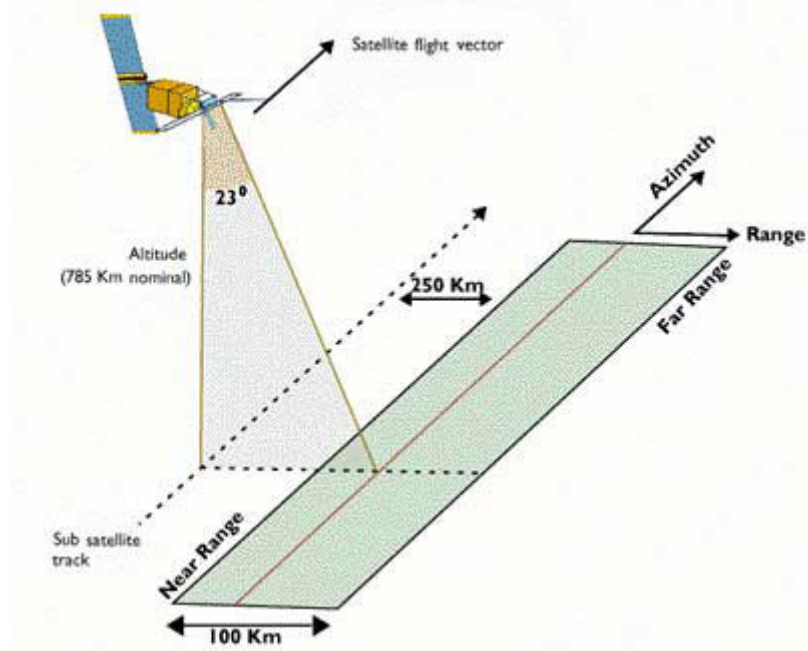
Οι απεικονιστές λειτουργούν καταγραφικά σε δύο διαστάσεις (μήκος και πλάτος), συνθέτοντας μία εικόνα της περιοχής που ανιχνεύουν με βάση την ακτινοβολία που προέρχεται από κάθε σημείο της. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τόσο παθητικοί αισθητήρες, όπως ο απεικονιστής της κάμερας τηλεόρασης, όσο και ενεργητικοί όπως τα RADAR συνθετικού ανοίγματος (SAR).

2.2.2. RADAR

I. Εισαγωγή

Οι ευρύτερα διαδεδομένοι ενεργητικοί μικροκυματικοί εικονοληπτικοί αισθητήρες, είναι τα RADAR, αρκτικόλεξο προερχόμενο από τις αγγλικές λέξεις Radio Detection and Ranging, που σημαίνουν Ράδιο-ανίχνευση και Αποστασιομέτρηση. Τα Radar είναι συστήματα

πλευρικής όρασης με διεύθυνση κάθετη στη γραμμή πτήσης. Παράγουν ηλεκτρομαγνητικό παλμό στην περιοχή της μικροκυματικής ακτινοβολίας, με συγκεκριμένες παραμέτρους, όπως η συχνότητα, η πόλωση και η γωνία πρόσπτωσης. Ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός ανακλάται ή σκεδάζεται από τον υπό μελέτη στόχο ή επιφάνεια και ο αλλοιωμένος επιστρεφόμενος παλμός (ηχώ), καταγράφεται από το σύστημα. Η αλλοίωση του παλμού σχετίζεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά-ιδιότητες του στόχου ή της επιφάνειας, γεγονός που επιτρέπει την μελέτη και αναγνώριση σωμάτων ή φαινομένων. Η θέση του υπό μελέτη στόχου ή επιφάνειας πάνω στην απεικόνιση του RADAR, καθορίζεται από την καταγραφή του χρόνου επιστροφής του παλμού από τα δορυφορικά όργανα.



Εικόνα 7: Γεωμετρία λήψης συστήματος RADAR

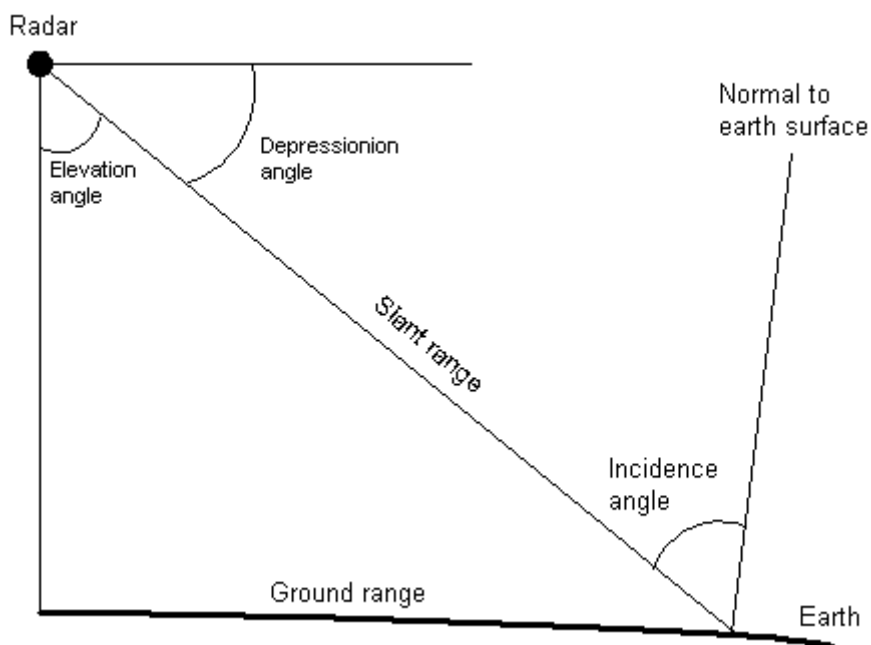
Πηγή: <https://earth.esa.int>

Σημαντικό ρόλο στην αλλοίωση του εκπεμπόμενου παλμού, διαδραματίζουν οι ηλεκτρικές ιδιότητες των σωμάτων, οι οποίες καθορίζουν τον βαθμό διείσδυσης του εκπεμπόμενου παλμού και την ανακλαστικότητα των σωμάτων αυτών. Ένα μέτρο των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των υλικών, είναι η **διηλεκτρική σταθερά** τους. Στην περιοχή του φάσματος των μικροκυμάτων, τα σώματα με ελάχιστη υγρασία έχουν τιμή διηλεκτρικής σταθεράς από 3 έως 8, ενώ το νερό έχει τιμή περίπου 80. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς είναι ανάλογη της περιεχόμενης υγρασίας των σωμάτων κι εκμεταλλευόμενοι τις ηλεκτρικές ιδιότητες των σωμάτων, με τα RADAR είναι δυνατόν να καταγραφούν οι αλλαγές της περιεχόμενης υγρασίας σε μια σκηνή.

II. Γεωμετρία λήψης

Όπως φαίνεται και στη εικόνα 7, ο κάθετος άξονας στη διεύθυνση τροχιάς του δορυφόρου, ονομάζεται **εύρος (range)** και ο παράλληλος άξονας σε αυτόν της πτήσης, ονομάζεται **αζιμούθιο (azimuth)**. Η ζώνη της εικόνας που βρίσκεται κοντά στο ναδίρ ονομάζεται **εγγύς περιοχή (near range)**, ενώ η απομακρυσμένη ζώνη της εικόνας ονομάζεται **μακρινή περιοχή (far range)**.

Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της δέσμης της μικροκυματικής ακτινοβολίας και της τοπικής κατακόρυφου στη γήινη επιφάνεια, ονομάζεται **γωνία πρόσπτωσης (incidence angle)** (εικόνα 8).



Εικόνα 8: Γωνία πρόσπτωσης συστήματος RADAR

Πηγή: <https://earth.esa.int>

III. Χαρακτηριστικά Ηλεκτρομαγνητικού Παλμού

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό για τα συστήματα radar, το οποίο επηρεάζει το σήμα οπισθοσκέδασης και καθορίζει τη διεισδυτικότητα του ηλεκτρομαγνητικού παλμού, είναι το χρησιμοποιούμενο **μήκος κύματος** της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Το είδος των στόχων ή των προς μελέτη επιφανειών, καθορίζει την επιλογή του μήκους κύματος και του καναλιού εκπομπής. Το ποσοστό της μικροκυματικής ακτινοβολίας που οπισθοσκεδάζεται, εξαρτάται άμεσα από το μήκος κύματος της και την τραχύτητα του εδάφους. Είναι δυνατόν μια επιφάνεια σε μικροκυματική ακτινοβολία μεγάλου μήκους να συμπεριφέρεται ως λεία και η ίδια επιφάνεια σε ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος να συμπεριφέρεται ως τραχεία.

Τα κανάλια που χρησιμοποιούνται από τα συστήματα των RADAR είναι γνωστά με συγκεκριμένες ονομασίες-κωδικούς, όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Κανάλι (Band)	Συχνότητα (frequency)	Μήκος Κύματος (Wavelength)
P	0.225-0.40 GHz	75.0 – 133.0 cm
L	1.00-2.00 GHz	15.0 – 30.0 cm
S	2.00- 4.00 GHz	7.5 – 15.0 cm
C	4.00- 8.00 GHz	3.8 – 7.5 cm
X	8.00-12.50 GHz	2.4 – 3.8 cm

Πίνακας 3: Κανάλια εκπομπής RADAR με αντίστοιχα εύρη συχνοτήτων και μηκών κύματος.

Πηγή: <https://landsat.gsfc.nasa.gov>

- ✓ Τα κανάλια **Ka, K, και Ku**, τα οποία δεν παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα, έχουν σχετικά μικρά μήκη κύματος (Ka: 7.5mm-1.11cm, K: 1.11-1.67cm, Ku: 1.67-2.5cm) και χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στα πρώτα αερομεταφερόμενα RADAR. Σήμερα η χρήση τους είναι σπάνια.
- ✓ Το κανάλι **X** χρησιμοποιείται σε αερομεταφερόμενα συστήματα για χαρτογράφηση περιοχών και αναγνώριση στρατιωτικών στόχων. Το μικρό μήκος κύματος του, επιτρέπει την δημιουργία τηλεσκοπικών απεικονίσεων υψηλής χωρικής ανάλυσης, γεγονός που έχει καταστήσει το κανάλι ευρέως χρησιμοποιούμενο σε δορυφορικά RADAR.
- ✓ Το κανάλι **C** είναι αυτό που χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα, τόσο σε αερομεταφερόμενα, όσο και σε δορυφορικά συστήματα. Λόγω του μεγαλύτερου μήκους κύματος συγκριτικά με τα προαναφερθέντα κανάλια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις δυσχερών καιρικών συνθηκών όπως καταιγίδες.
- ✓ Το κανάλι **S** έχει χρησιμοποιηθεί ελάχιστα, με τελευταία αξιοσημείωτη αποστολή, αυτή του ρωσικού δορυφόρου ALMAZ-1, η οποία έληξε το 1992.
- ✓ Το κανάλι **L** είναι το πρώτο που χρησιμοποιήθηκε σε δορυφορικούς αισθητήρες RADAR, για επιστημονικούς σκοπούς. Είναι το αμέσως επόμενο ευρέως χρησιμοποιούμενο κανάλι, μετά το κανάλι C.
- ✓ Το κανάλι **P** λόγω του μεγάλου μήκους κύματος συγκριτικά με τα προηγούμενα κανάλια, χρησιμοποιείται από τη NASA σε πειραματικά αερομεταφερόμενα ερευνητικά συστήματα.

Ένα ακόμα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μικροκυματικής ακτινοβολίας, το οποίο εκμεταλλεύεται η επιστήμη στα συστήματα RADAR, είναι η πόλωση. Η πόλωση αναφέρεται στον προσανατολισμό των ταλαντώσεων του ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο βρίσκεται εντός του ηλεκτρομαγνητικού. Τα RADAR είναι σχεδιασμένα κυρίως να εκπέμπουν και να λαμβάνουν είτε οριζόντια, είτε κατακόρυφα προσανατολισμένο ηλεκτρικό πεδίο ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (σε μετεωρολογικά RADAR χρησιμοποιείται κυκλική πόλωση). Το οριζόντια προσανατολισμένο ηλεκτρικό πεδίο συμβολίζεται με H από την αγγλική λέξη Horizontal και το κατακόρυφα προσανατολισμένο συμβολίζεται με V από

την αγγλική λέξη Vertical. Οι υπάρχοντες συνδυασμοί των δύο διαφορετικών προσανατολισμών, είναι οι παρακάτω, με το πρώτο γράμμα τους να αντιστοιχεί στον προσανατολισμό του εκπεμπόμενου σήματος και το δεύτερο στο επιστρεφόμενο σήμα:

- HH
- VV
- HV
- VH

Η επιλογή του προσανατολισμού της πόλωσης του εκπεμπόμενου και του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος, καθορίζει την αλληλεπίδραση του υπό μελέτη στόχου ή επιφάνειας με το εκπεμπόμενο σήμα και δημιουργεί διαφορετική αλλοίωση στο οπισθοσκεδαζόμενο σήμα. Γνωρίζοντας τις ιδιότητες των υλικών και το με ποιόν τρόπο μπορούν να αλλοιώσουν το επιστρεφόμενο σήμα ανάλογα με την πόλωση του, επιλέγοντας την πόλωση του εκπεμπόμενου και του επιστρεφόμενου σήματος, μπορούμε να συλλέξουμε επιπρόσθετες πληροφορίες για τον υπό μελέτη στόχο ή επιφάνεια.



Εικόνα 9: Εικόνες του Sentinel 1-A στις 01/11/2017 της περιοχής της Βρετανίας και Γαλλίας με πολικότητες VH, VV και έγχρωμο σύνθετο RGB.
Πηγή: <https://sentinel.esa.int>

1. Ενεργός Διατομή και Συντελεστής Οπισθοσκέδασης

Η ενεργός διατομή του RADAR, συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα σ και αντιπροσωπεύει το μέτρο της ανακλαστικότητας των στόχων-επιφανειών, στον εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό παλμό που δέχονται από το RADAR. Εξαρτάται από το μέγεθος του αντικειμένου, το σχήμα του, τη θέση του, τον προσανατολισμό του και από το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου παλμού. Η ενεργός διατομή εκφράζεται σε μονάδες επιφάνειας και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4 * \pi * R^2 \frac{S_r}{S_t} \quad (1)$$

R: Η κεκλιμένη απόσταση δέκτη-στόχου

S_r : Η πυκνότητα της σκεδαζόμενης ισχύος που επιστέφει στον δέκτη (W/m^2)

S_t : Η πυκνότητα της προσπίπτουσας ισχύος στον στόχο (W/m^2)

Η ενεργός διατομή του RADAR, μπορεί να υπολογιστεί από το γινόμενο του συντελεστή οπισθοσκέδασης σ_0 επί τη φωτιζόμενη από το RADAR επιφάνεια. Ως συντελεστή

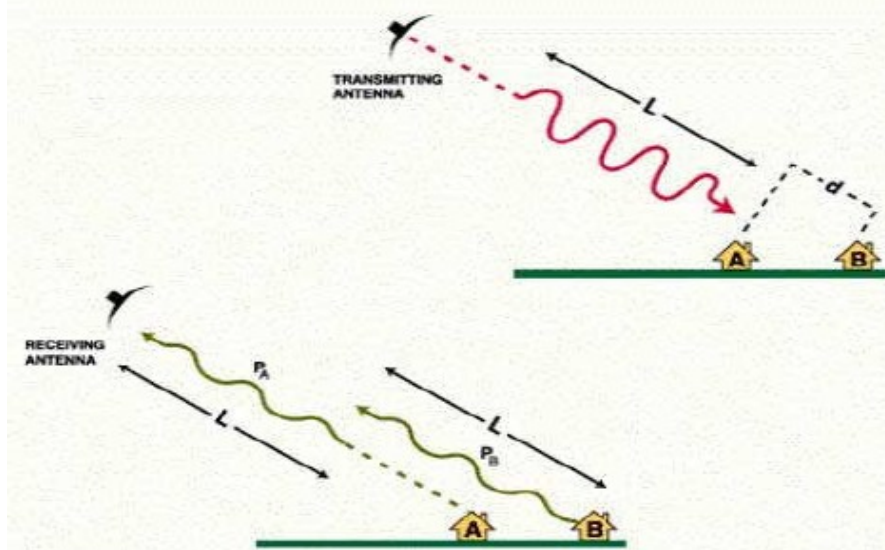
οπισθοσκέδασης, ορίζουμε την ποσότητα της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας του σήματος επιστροφής στην κεραία του RADAR. Είναι αδιάστατο μέγεθος κι επειδή συνήθως λαμβάνει μεγάλες τιμές, εκφράζεται σε dBs, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_o = 10 \log(\sigma_o) \quad (2)$$

II. Διακριτική Ικανότητα

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του συστήματος RADAR, είναι ότι διαθέτει διαφορετική διακριτική ικανότητα κατά τη διεύθυνση range και διαφορετική διακριτική ικανότητα κατά τη διεύθυνση azimuth.

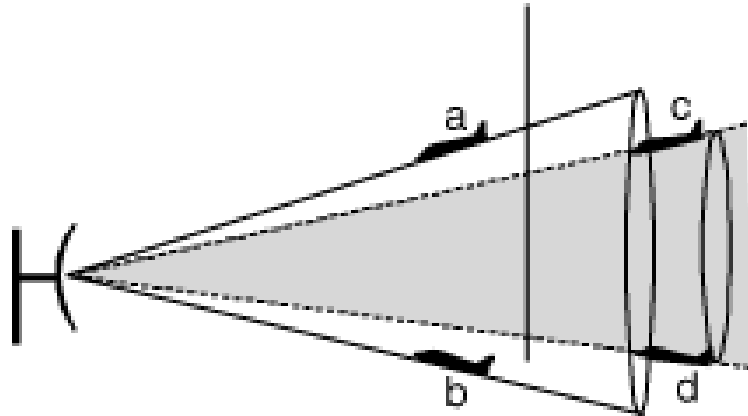
Η διακριτική ικανότητα στην κάθετη διεύθυνση στη γραμμή πτήσης (range), είναι η ελάχιστη απόσταση την οποία πρέπει να έχουν δύο γειτονικοί σημειακοί στόχοι στη διεύθυνση των πλευρικών αποστάσεων ώστε να γίνονται διακριτοί, δηλαδή να προσδιορίζονται από τη διαδοχική χρονικά καταγραφή της ηχούς μιας παλμοσειράς. Η πλευρική απόσταση d των δύο γειτονικών στόχων, πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μισό μήκος L του παλμού, δηλαδή $d > L/2$ (B. Καραθανάση, 2012). Γίνεται αντιληπτό ότι με τη μείωση του μήκους του παλμού βελτιώνεται η διακριτική ικανότητα, η μείωση όμως αυτή δεν είναι απεριόριστη, λόγω τεχνολογικών φραγμών οι οποίοι δεν μπορούν να ξεπεραστούν με τη σημερινή τεχνολογία.



Εικόνα 10: Γεωμετρία μετάδοσης και λήψης σήματος RADAR, δύο διακριτών στόχων.
Πηγή: <https://earth.esa.int>

Η διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση του αζιμουθίου (azimuth), καθορίζεται από το γωνιακό πλάτος της μικροκυματικής δέσμης και την κεκλιμένη πλευρική απόσταση (slant range distance). Καθώς η μετάδοση της μικροκυματικής δέσμης γίνεται σε μεγαλύτερες αποστάσεις δέκτη-στόχου, η ανάλυση μεγαλώνει και δυσχεραίνει την τελική απεικόνιση, συνεπώς η διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση των αζιμουθίων, εξαρτάται και από την κεκλιμένη πλευρική απόσταση δέκτη-στόχου. Παρατηρώντας την εικόνα 9, διαπιστώνουμε

ότι για δεδομένο γωνιακό πλάτος δέσμης, οι στόχοι a και b που βρίσκονται σε μικρότερη απόσταση, μπορούν να διακριθούν, ενώ οι στόχοι c και d που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση, τείνουν να ενώνονται και να φαίνονται σαν ένας στόχος.



Εικόνα 11: Διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση του αζιμουθίου .
 Πηγή: <https://enacademic.com>

Το πλάτος της μικροκυματικής δέσμης, είναι αντιστρόφως ανάλογος του φυσικού μήκους ή ανοίγματος (aperture), όπως συνηθίζεται να ονομάζεται, της κεραίας του συστήματος RADAR. Όσο μικραίνει το άνοιγμα της κεραίας, τόσο μεγαλώνει το γωνιακό πλάτος της δέσμης, γεγονός που μικραίνει την ανάλυση της εικόνας RADAR.

2.2.3. RADAR Συνθετικού Ανοίγματος (SAR)

Τα RADAR, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- ➔ RADAR πραγματικού ανοίγματος (Real Aperture Radar-RAR)
- ➔ RADAR συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar-SAR)

Η διαφορά των δύο παραπάνω τύπων RADAR, έγκειται στη διακριτική τους ικανότητα κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η ανάλυση των εικόνων RADAR κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου, είναι ανάλογη του ανοίγματος της κεραίας.

$$\text{Διακριτική Ικανότητα} = \frac{R\lambda}{D} \quad (3)$$

λ : μήκος κύματος του εκπεμπόμενου παλμού

R : κεκλιμένη πλευρική απόσταση δέκτη-στόχου

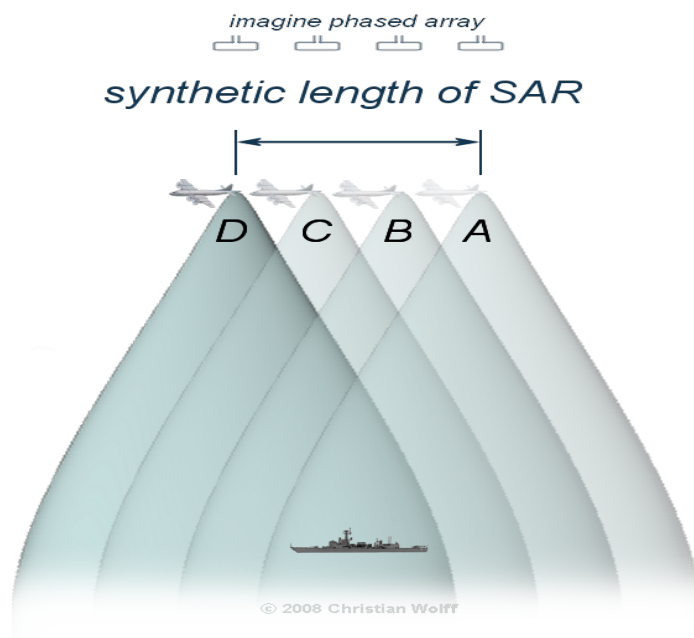
D : μήκος της κεραίας του δέκτη

Σύμφωνα με την εξίσωση (3), για την επίτευξη μικρής διακριτικής ικανότητας (υψηλή ανάλυση), απαιτείται μεγάλο άνοιγμα κεραίας και μικρό μήκος κύματος παλμού, ώστε η διακριτική ικανότητα να είναι ικανοποιητική, ανεξάρτητα από την κεκλιμένη πλευρική απόσταση δέκτη-στόχου.

Ένας δορυφόρος χαμηλής τροχιάς περιστρέφεται σε απόσταση περίπου 800 χιλιομέτρων από τη γήινη επιφάνεια. Για ένα μήκος κύματος παλμού της τάξης των 7 εκατοστών (C band), σύμφωνα με την εξίσωση (3), προκειμένου να επιτευχθεί διακριτική ικανότητα των 500 μέτρων, θα έπρεπε να έχουμε άνοιγμα κεραίας 112 μέτρα. Η κατασκευή τέτοιου ανοίγματος κεραίας είναι πρακτικά αδύνατη είτε ο φορέας του δέκτη είναι δορυφόρος, είτε είναι αεροσκάφος. Πρακτικά η κεραία η οποία φέρεται από δορυφόρους, δεν μπορεί να ξεπεράσει σε μήκος τα 15 μέτρα.

Τα SAR πετυχαίνουν υψηλή ανάλυση κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου, συνθέτοντας ένα πλασματικό μήκος κεραίας (άνοιγμα), το οποίο είναι ανεξάρτητο από το φυσικό μήκος της κεραίας του δέκτη, εκμεταλλευόμενα την κίνηση του φορέα του δέκτη. Ένας θεωρούμενος στόχος στη γήινη επιφάνεια, δέχεται και ανακλά ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς, οι οποίοι προέρχονται από διαδοχικές θέσεις της κεραίας του δέκτη, κατά τη διεύθυνση πτήσης, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την καταγραφή πολλαπλών επιστρεφόμενων σημάτων για τον ίδιο στόχο. Τα πολλαπλά σήματα επιστροφής, συνδυάζονται λαμβάνοντας υπόψιν την μετατόπιση της συχνότητας του σήματος, λόγω του φαινομένου Doppler και δημιουργείται η κεραία συνθετικού ανοίγματος.

Η χρήση της κεραίας συνθετικού ανοίγματος, καθιστά τα συστήματα SAR πολυπλοκότερα και ακριβότερα ως προς την κατασκευή τους, συγκριτικά με τα συστήματα RAR, όμως το όφελος είναι τηλεσκοπικές απεικονίσεις υψηλής ανάλυσης κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου.



Εικόνα 12: Σύνθεση ανοίγματος κεραίας μέσω διαδοχικών της θέσεων.

Πηγή: <http://www.radartutorial.eu>

2.2.4. Δορυφορική Αποστολή Sentinel-1

Η δορυφορική αποστολή Sentinel-1 είναι το Ευρωπαϊκό Παρατηρητήριο Ραντάρ για την κοινή πρωτοβουλία Copernicus της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και της Διαστημικής

Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European Space Agency). Στη συνέχεια παρατίθενται πληροφορίες για τη συγκεκριμένη αποστολή από την ιστοσελίδα της ESA.

Ο πρώτος σε σειρά, Sentinel-1, διαθέτει ένα προηγμένο σύστημα RADAR προκειμένου να παρέχει τηλεσκοπικές απεικονίσεις ημέρας και νύχτας, της γήινης επιφάνειας, κάτω από όλες τις καιρικές συνθήκες.

Πρόκειται για σχηματισμό δύο δορυφόρων Sentinel-1A και Sentinel 1-B σε τροχιά με απόσταση 180°, καλύπτοντας ολόκληρη τη Γη σε έξι ημέρες. Ο δορυφόρος Sentinel-1A εκτοξεύτηκε στις 3 Απριλίου του 2014, ενώ ο Sentinel-1B στις 26 Απριλίου 2016. Κάθε δορυφόρος ζυγίζει 2300 κιλά κι έχει σχεδιαστεί για χρόνο ζωής, τουλάχιστον 7 χρόνων σε τροχιά. Κάθε δορυφόρος διαθέτει κεραία RADAR μήκους 12 μέτρων και ηλιακά πάνελ μήκους 10 μέτρων.

Η μετάδοση των δεδομένων γίνεται σε έναν αριθμό επίγειων σταθμών σε όλο τον κόσμο, με σκοπό την ταχεία διάδοση τους. Ο Sentinel-1 φέρει επίσης ένα λέιζερ προκειμένου να μεταδίδει δεδομένα στον γεωστατικό ευρωπαϊκό σύστημα αναμετάδοσης δεδομένων για συνεχή παροχή δεδομένων.

Διαθέτει RADAR συνθετικού ανοίγματος (SAR) το οποίο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς στο κανάλι C του μικροκυματικού φάσματος (ενότητα 2.2.2), με συχνότητα 5.405 GHz. Περιλαμβάνει μία ενεργή κεραία δεξιάς-όρασης, διάταξης φάσης, παρέχοντας γρήγορη σάρωση σε αζιμούθιο και υψόμετρο. Η δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων είναι 1410Gb και 520 Mbit/s.

Το όργανο C-SAR υποστηρίζει λειτουργία σε διπλή πόλωση (HH+HV, VV +VH), η οποία εφαρμόζεται μέσα από μία αλυσίδα μετάδοσης (μπορεί να αλλάξει σε H ή V) και δύο παράλληλα λαμβανόμενες αλυσίδες για H και V πολώσεις. Τα δεδομένα διπλής πόλωσης είναι χρήσιμα για εφαρμογές ταξινόμησης της κάλυψης γης και θαλάσσιου πάγου.

Ο Sentinel-1 λειτουργεί με αποκλειστικά τέσσερις τρόπους απόκτησης δεδομένων:

- Stripmap (SM)
- Interferometric Wide swath (IW)
- Extra-Wide swath (EW)
- Wave mode (WV)
- **Stripmap Mode** (Λειτουργία χάρτη με λωρίδες)

Η λειτουργία απεικόνισης Stripmap (SM) παρέχεται σε συνέχεια των αποστολών ERS και Envisat. Η συγκεκριμένη λειτουργία παρέχει κάλυψη με ανάλυση 5 επί 5 μέτρα, πάνω σε μία στενή λωρίδα πλάτους 80 χιλιομέτρων. Μπορεί να επιλέγεται κάθε μία από τις έξι λωρίδες απεικόνισης, αλλάζοντας την γωνία πρόσπτωσης της δέσμης και το υψόμετρο του εύρους της δέσμης.

- **Interferometric Wide Swath Mode** (Λειτουργία Ευρείας Συμβολομετρικής Λωρίδας)

Η λειτουργία Interferometric Wide Swath Mode (IW) επιτρέπει τον συνδυασμό λωρίδων μεγάλου πλάτους (250 χιλιομέτρα) με κεντρική γεωμετρική ανάλυση (5 επί 20 μέτρα). Η

Λειτουργία IW απεικονίζει τρεις υπο-λωρίδες χρησιμοποιώντας Παρατήρηση Εδάφους (Terrain Observation) με προοδευτική σάρωση SAR (TOPSAR) και εύρος τοπικών γωνιών πρόπτωσης ανάμεσα σε 29.1° και 46° . Με την τεχνική TOPSAR, επιπροσθέτως της καθοδήγησης της δέσμης σε εύρος αντίστοιχο του SCANSAR (ενότητα 3.2.3), η δέσμη καθοδηγείται επίσης και ηλεκτρονικά από πίσω προς τα εμπρός στην κατεύθυνση του αζιμουθίου για κάθε ριπή ενέργειας, αποφεύγοντας το scalloping (φαινόμενο κατά το οποίο μειώνεται η ευαισθησία του RADAR, δημιουργώντας “βαθουλώματα” στην εικόνα, για συγκεκριμένους συνδυασμούς απόστασης και ταχύτητας) κι έχοντας σαν αποτέλεσμα εικόνες καλύτερης ποιότητας. Η συμβολομετρία εξασφαλίζεται με επαρκή επικάλυψη του φάσματος Doppler (στον τομέα του αζιμουθίου) και του φάσματος του αριθμού κύματος (στον τομέα του υψομέτρου). Η τεχνική TOPSAR εξασφαλίζει ομοιογενή ποιότητα εικόνας σε όλη την λωρίδα. Η λειτουργία IW είναι η προεπιλεγμένη λειτουργία καταγραφής στην ξηρά.

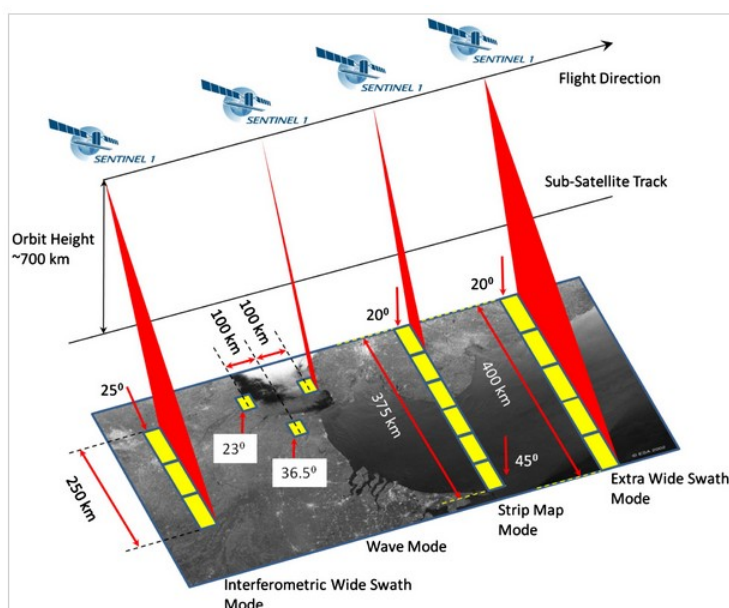
- **Extra Wide Mode Swath** (Λειτουργία Επιπλέον Ευρείας Λωρίδας)

Η λειτουργία απεικόνισης Extra Wide Mode Swath προορίζεται για επιχειρησιακές υπηρεσίες θαλάσσιων, πολικών και ζωνών με πάγο όπου απαιτούνται ευρεία κάλυψη και μικροί χρόνοι επανάληψης των λήψεων. Η λειτουργία EW λειτουργεί παρόμοια με την λειτουργία IW αξιοποιώντας την τεχνική TOPSAR με χρήση πέντε υπο-λωρίδων αντί για τρεις, έχοντας σαν αποτέλεσμα χαμηλότερη ανάλυση (20 επί 40 μέτρα). Η λειτουργία EW μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για συμβολομετρία όπως και με τη λειτουργία IW.

- **Wave Mode** (Λειτουργία Κύματος)

Η λειτουργία Wave Mode, σε συνδυασμό παγκόσμια μοντέλα ωκεάνειων κυμάτων, μπορεί να βοηθήσει στον προσδιορισμό της κατεύθυνσης, του μήκους και του ύψους των κυμάτων στους ανοιχτούς ωκεανούς.

Οι αποκτήσεις της λειτουργίας Wave Mode, αποτελούνται από απεικονίσεις Stripmap 20 επί 20 χιλιομέτρων.



Εικόνα 13: Οι τέσσερις διαφορετικές λειτουργίες απόκτησης δεδομένων του Sentinel-1.

<https://sentinel.esa.int>

Η κύρια επιχειρησιακή λειτουργία του Sentinel-1 είναι η Interferometric Wide Swath Mode (IW), η οποία ικανοποιεί τις περισσότερες τρέχουσες απαιτήσεις υπηρεσιών. Με την επιλογή της συγκεκριμένης λειτουργίας ως κύριας, αποφεύγονται επιπλοκές, διατηρούνται υψηλές επιδόσεις επανάληψης των λήψεων, απλοποιείται ο προγραμματισμός της αποστολής, μειώνεται το λειτουργικό κόστος και δημιουργείται ένα σταθερό μακροπρόθεσμο αρχείο.

Η αποστολή προσφέρει υπηρεσίες σε πολλές εφαρμογές, όπως οι παρακάτω:

- ➔ παρακολούθηση της Αρκτικής και της έκτασης και χαρτογράφησης του θαλάσσιου πάγου
- ➔ επιτήρηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος,
- ➔ παρακολούθηση πετρελαιοκηλίδων
- ➔ εντοπισμός πλοίων για την θαλάσσια ασφάλεια
- ➔ παρακολούθηση εδαφικής επιφάνειας για παραμορφώσεις
- ➔ χαρτογράφηση δασών
- ➔ παρακολούθηση και χαρτογράφηση των υδάτινων όγκων και της διαχείρισης τους, με σκοπό την υποστήριξη βοήθειας σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης

Τα δεδομένα Sentinel-1 είναι συστηματικά διαθέσιμα και δωρεάν σε όλους τους χρήστες. Τα δεδομένα είναι δυνατόν να παραδοθούν στους χρήστες, μέσα σε μία ώρα από την παραλαβή τους, σε περιπτώσεις όπου απαιτείται άμεση ανταπόκριση για Σχεδόν Πραγματικό Χρόνο (Near Real-Time (NRT)), σε τρεις ώρες για περιοχές NRT προτεραιότητας και σε 24 ώρες για συστηματικά αρχειοθετημένα δεδομένα.

Κάθε λειτουργία απόκτησης δεδομένων, μπορεί να παράγει προϊόντα SAR επιπέδου Level-0, Level-1 SLC, Level-1 GRD και Level-2 OCN. Σχετικά με την πόλωση, τα προϊόντα δεδομένων είναι διαθέσιμα σε μονή πόλωση (VV ή VH) για την λειτουργία Wave και σε διπλή πόλωση (VV και VH ή HH και HV) ή μονή πόλωση (VV ή VH) για τις λειτουργίες SM, IW και EW.

- **Level-0**

Τα προϊόντα SAR αυτού του επιπέδου, αποτελούνται από ασυμπιεστα ανεπεξέργαστα πρωτογενή δεδομένα. Προκειμένου να καταστούν αξιοποιήσιμα, θα πρέπει να αποσυμπιεστούν και να υλοποιηθεί η επεξεργασία SAR.

- **Level-1**

Τα προϊόντα αυτού του επιπέδου είναι γενικά διαθέσιμα και προορίζονται για τους περισσότερους χρήστες. Παράγονται στις μορφές Single Look Complex (SLC) και Ground Range Detected (GRD).

Τα προϊόντα Level-1 SLC, αποτελούνται από συγκεντρωμένα δεδομένα SAR, τα οποία έχουν γεωαναφερθεί χρησιμοποιώντας δεδομένα τροχιάς και θέσης από τον δορυφόρο. Περιλαμβάνουν μία ενιαία εμφάνιση (single look) σε κάθε διάσταση, χρησιμοποιώντας το

πλήρες εύρος εκπομπής σήματος και αποτελούνται από σύνθετα δείγματα τα οποία διατηρούν την πληροφορία φάσης

Τα προϊόντα Level-1 GRD, αποτελούνται από συγκεντρωμένα δεδομένα SAR, τα οποία έχουν ανιχνευθεί, έχει εφαρμοστεί σε αυτά η τεχνική multi-look (τεχνική η οποία εφαρμόζεται στις εικόνες SAR για την βελτίωση της ποιότητας τους) κι έχουν προβληθεί στη γήινη επιφάνεια, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο ελλειψοειδούς της γης. Τα προϊόντα που προκύπτουν έχουν περίπου τετραγωνικά εικονοστοιχεία χωρικής ανάλυσης, με μειωμένο το φαινόμενο της κηλίδωσης (θόρυβος ο οποίος οφείλεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος), έχοντας σαν κόστος τη μειωμένη χωρική ανάλυση.

- **Level-2**

Το επίπεδο Level-2 OCN, περιλαμβάνει προϊόντα με φασματικά στοιχεία για τον ωκεάνιο κυματισμό (Ocean Swell spectra (OSW)), στοιχεία για τα πεδία των ωκεάνιων ανέμων (Ocean Wind Fields (OWI)) και στοιχεία για τις επιφανειακές ακτινικές ταχύτητες (Ocean Radial Velocities (RVL)).

3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1. Εδαφική Υγρασία

3.1.1. Σπουδαιότητα Μέτρησης

Η εδαφική υγρασία αποτελεί έναν ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα επιφανειακής ενέργειας κι επηρεάζει πληθώρα φυσικών φαινομένων. Παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη μετεωρολογία, στη γεωργία και στην υδρολογία. Η εδαφική υγρασία μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως ένας σημαντικός παράγοντας φυσικών καταστροφών, όπως οι πλημμύρες.

Επιπροσθέτως, η εδαφική υγρασία επηρεάζει ποικίλους οικολογικούς παράγοντες, όπως ο αερισμός, οι δραστηριότητες των μικροοργανισμών, η θερμοκρασία και η πρόσληψη των θρεπτικών συστατικών, ενώ αποτελεί κι έναν από τους κυριότερους παράγοντες ανάπτυξης των φυτών.

Η εδαφική υγρασία είναι ένας παράγοντας «κλειδί» για τον χαρακτηρισμό του παγκόσμιου κλίματος:

- Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται και ο ρυθμός εξάτμισης της υγρασίας του εδάφους. Η αυξημένη εξάτμιση της υγρασίας βοηθά με τη σειρά της στην ψύξη του εδάφους. Συνεπώς η παρακολούθηση της εδαφικής υγρασίας είναι σημαντική για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας.
- Υπάρχει μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και της εδαφικής υγρασίας. Η υγρασία που υπάρχει στην ατμόσφαιρα, οφείλεται στην εξάτμιση της εδαφικής υγρασίας. Τα συστήματα χαμηλής πίεσης, συμπυκνώνουν την υγρασία της ατμόσφαιρας και δημιουργούν βροχοπτώσεις. Αντιθέτως, εάν το έδαφος είναι πολύ ξηρό, τότε θα υπάρχει μειωμένη υγρασία στην ατμόσφαιρα και είναι λιγότερο πιθανό να υπάρξουν βροχοπτώσεις.
- Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες τα επίπεδα της εδαφικής υγρασίας, έχουν μεγάλη επιρροή στην ικανότητα της γης να αποθηκεύει τον άνθρακα (J. Green,2019). Αυτό συμβαίνει καθώς όταν το έδαφος είναι ξηρό, τα φυτά σταματούν τη φωτοσύνθεση. Η διακοπή της φωτοσύνθεσης έχει σαν αποτέλεσμα τη διακοπή της διαπνοής, γεγονός που προκαλεί αύξηση των θερμοκρασιών. Οι αυξημένες θερμοκρασίες, με τη σειρά τους, αυξάνουν την διαδικασία της αναπνοής των φυτών, δηλαδή την απώλεια άνθρακα από το έδαφος και τη βλάστηση.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας, αποτελεί επιτακτική ανάγκη για την επιστημονική κοινότητα. Δυστυχώς, οι ακριβείς εκτιμήσεις της επιφανειακής υγρασίας του εδάφους, είναι συχνά δύσκολες, ειδικά σε μεγαλύτερη χωρική κλίμακα. Ο λόγος είναι ότι η εδαφική υγρασία, είναι μια μεταβλητή η οποία απαιτεί για τη μέτρηση της, χρονικό και χωρικό προσδιορισμό.

Υπάρχουν δύο ειδών μέθοδοι για την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας, με επιτόπιες μετρήσεις και με Τηλεπισκοπικές μεθόδους. Τα πιο ακριβή αποτελέσματα, δίνονται από τις

επιτόπιες μετρήσεις. Όμως, ο απαιτούμενος χρονικός και χωρικός προσδιορισμός της μεταβλητής, δυσχεραίνει τις επιτόπιες μετρήσεις, απαιτώντας σταθμούς συνεχούς παρακολούθησης για την απόκτηση αξιοποιήσιμων δεδομένων. Συνεπώς, οι επιτόπιες μετρήσεις, έχουν το μειονέκτημα του υψηλού κόστους, των χρονοβόρων διαδικασιών και των σημειακών αποτελεσμάτων. Συνήθως χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση και την αξιολόγηση των Τηλεσκοπικών προϊόντων.

Η εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας, καθώς και η χρονική και χωρική παρακολούθησή της σε ευρεία κλίμακα από το διάστημα, αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο εναλλακτικό τρόπο μέτρησής της. Λόγω της πολυπλοκότητας όμως αυτού του είδους της εκτίμησης, είναι ακόμα αντικείμενο έρευνας και αποτελεί ένα από τα κορυφαία θέματα που απασχολούν την επιστημονική κοινότητα της Τηλεπισκόπησης, παγκοσμίως.

3.1.2. Ορισμός Και Τρόποι Έκφρασης

Ως εδαφική υγρασία, ορίζεται η ποσότητα νερού η οποία είναι διαθέσιμη στο έδαφος και είναι δεσμευμένη από τριχοειδείς δυνάμεις των πόρων στην ανωτέρα ζώνη του εδαφικού στρώματος από όπου είναι δυνατόν να αφαιρεθεί μόνο με το μηχανισμό της εξατμισοδιαπνοής (Μ. Μιμίκου, 1989).

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι έκφρασής της, με τον πιο κοινό να είναι αυτός κατά όγκο, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του νερού που περιέχεται σε ένα εδαφικό δείγμα, προς τον όγκο του δείγματος.

Οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα, είναι κυβικά εκατοστά νερού ανά κυβικά εκατοστά εδαφικού δείγματος (cm^3 νερού/ cm^3 εδάφους) ή κυβικά μέτρα νερού ανά κυβικό μέτρο εδαφικού δείγματος (m^3 νερού/ m^3 εδάφους). Συνήθως, η εδαφική υγρασία εκφράζεται και σε ποσοστό % του περιεχόμενου νερού σε εδαφικό δείγμα.

3.1.3. Μορφές Εδαφικής Υγρασίας

Η εδαφική υγρασία είναι η συγκράτηση νερού υπό διάφορες μορφές, όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

- 1) **Διηθητικό ή ελεύθερο νερό** είναι αυτό το οποίο καταλαμβάνει τους μεγάλους πόρους και τους κενούς χώρους και κινείται προς τα κάτω με την επίδραση της βαρύτητας. Αυτού του είδους το νερό είναι βλαβερό για την ανάπτυξη των φυτών, όταν δεν στραγγίζεται επαρκώς από το έδαφος, καθώς όταν παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα, γεμίζει τους πόρους και αφαιρεί τον εδαφικό αέρα.
- 2) **Το τριχοειδές νερό** είναι αυτό που αποθηκεύεται στο έδαφος κι αποτελεί την κύρια πηγή υγρασίας. Αυτού του είδους το νερό, χρησιμοποιείται από τα φυτά για την ανάπτυξη τους.
- 3) **Το υγροσκοπικό νερό** βρίσκεται γύρω από τους εδαφικούς κόκκους, σε μορφή πολύ λεπτών στρωμάτων, ενώ μπορεί να κινείται μόνο με τη μορφή υδρατμών.

- 4) Το προσροφημένο νερό βρίσκεται στους ενδοκρυσταλλικούς χώρους των ορυκτών της αργίλου και δεν κινείται ούτε προσλαμβάνεται από τα φυτά.

3.1.4. Το Έδαφος

Το έδαφος αποτελεί ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο σύστημα το οποίο αποτελεί ένα μέσο διακίνησης και ταυτόχρονα μια αποθήκη νερού. Είναι ένα σύνολο ορυκτών κόκκων, οι οποίοι μπορούν να διαχωριστούν με απλές μεθόδους, όπως η ανακίνηση μέσα σε νερό.

Τα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους, είναι:

- Η υφή
- Η δομή

Υφή του εδάφους είναι η ποσοστιαία αναλογία των ορυκτών σωματιδίων (άμμος, άργιλος και ιλύς), τα οποία συνθέτουν το έδαφος.

Η δομή του εδάφους είναι ο τρόπος διάταξης των ορυκτών σωματιδίων. Η εδαφική υφή είναι αμετάβλητη, αντίθετα με την δομή του εδάφους, η οποία μπορεί να αλλάζει, επηρεάζοντας την διακίνηση του νερού. Στα κοκκώδη ή μη συνεκτικά εδάφη, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των τεμαχιδίων, είναι πολύ μικρές. Αντιθέτως, στα λεπτόκοκκα συνεκτικά εδάφη, οι δυνάμεις είναι ισχυρές.

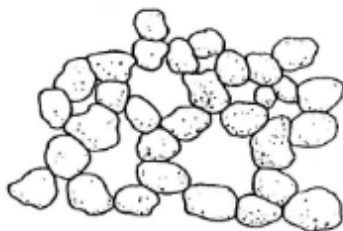
Σφαιροειδούς σχήματος κόκκοι σε:



Εικόνα 1. Πυκνή διάταξη



Εικόνα 2. Χαλαρή διάταξη



Εικόνα 3: Κυψελώδη διάταξη

Εικόνα 14: Διαφορετικές διατάξεις εδαφικών κόκκων.

Πηγή: Κούκης και Σαμπατάκης, 2002

Ένα αξιοσημείωτο μέγεθος, που χαρακτηρίζει το έδαφος, είναι το πορώδες εδάφους και ορίζεται ως το εκατοστιαίο ποσοστό του όγκου του εδάφους σε φυσική κατάσταση, που

καταλαμβάνεται από την υγρή και αέρια φάση. Ένα μέτρο πορώδους του εδάφους, είναι η φαινομενική πυκνότητα αυτού. Όσο μικρότερη η φαινομενική πυκνότητα, τόσο μεγαλύτερο το πορώδες.

Οι κενοί χώροι που αφήνονται μεταξύ των στερεών συστατικών του εδάφους, ονομάζονται πόροι. Όταν όλοι οι πόροι είναι γεμάτοι με νερό, τότε το έδαφος χαρακτηρίζεται κορεσμένο, ενώ σε αντίθετη περίπτωση ονομάζεται ακόρεστο και οι πόροι καταλαμβάνονται από νερό κι αέρα.

Η μέγιστη εδαφική υγρασία που μπορεί να συγκρατηθεί από το έδαφος, ονομάζεται αποθηκευτική ικανότητα του εδάφους κι εξαρτάται από το είδος του εδάφους και το πάχος του εδαφικού στρώματος.

Για την έκφραση των δυνάμεων οι οποίες συγκρατούν το νερό στο έδαφος, χρησιμοποιείται ο όρος «τάση» ή «μυζητική δύναμη» και ουσιαστικά είναι το μέτρο το οποίο δείχνει το κατά πόσο ισχυρά συγκρατείται το νερό στο έδαφος.

Ταξινόμηση Εδαφικής Υγρασίας

Η εδαφική υγρασία μπορεί να ταξινομηθεί ανάλογα με την ποσότητα του νερού που συγκρατείται από το έδαφος, με διαφορετική «τάση» ή «μυζητική δύναμη».

- **Νερό κορεσμού** είναι το νερό που βρίσκεται στο έδαφος με μηδενική «τάση» και γεμίζει όλους τους μεγάλους και μικρούς εδαφικούς πόρους, από τους οποίους έχει αφαιρέσει τον εδαφικό αέρα.
- **Υδατοϊκανότητα ή αγροϊκανότητα** του εδάφους, είναι η μεγαλύτερη ποσότητα νερού που μπορεί να συγκρατήσει το έδαφος, μετά από τη διαβροχή του και όταν η ελεύθερη στράγγιση του είναι μηδενική.
- **Ισοδύναμη υγρασία** είναι η ποσότητα νερού που συγκρατείται από δείγμα εδάφους πάχους 1 εκατοστού, το οποίο προηγουμένως έχει κορεστεί με νερό κι έπειτα υποβάλλεται κατάλληλα σε φυγόκεντρο δύναμη πολλαπλάσια της βαρύτητας, για 30 λεπτά της ώρας.
- **Σημείο μόνιμης μάρωσης** είναι το ποσό του νερού το οποίο συγκρατείται από το έδαφος ισχυρά, σε σημείο όπου τα φυτά δεν μπορούν να προσλάβουν την ποσότητα νερού για την εξισορρόπηση της εξατμισοδιαπνοής, με αποτέλεσμα να μαραίνονται μόνιμα.
- **Διαθέσιμη υγρασία** είναι η ποσότητα νερού που μπορούν τα φυτά να χρησιμοποιήσουν για τις ανάγκες τους. Αποτελεί τη διαφορά μεταξύ της υδατοϊκανότητας και του σημείου μόνιμης μάρωσης. Εξαρτάται από τη μηχανική σύσταση του εδάφους, τη δομή, το πορώδες και την οργανική ουσία του.

3.2. Χρήση Μικροκυματικών Αισθητήρων Για Την Εκτίμηση Της Εδαφικής Υγρασίας

Η δυνατότητα των μικροκυματικών αισθητήρων να μετρούν την εδαφική υγρασία, έχει αναγνωρισθεί νωρίς (Eagleman and Ulaby, 1975). Η γήινη επιφάνεια θεωρείται ως μια μίξη σωματιδίων εδάφους, νερού κι αέρα και γι' αυτό η εδαφική υγρασία μπορεί να εκτιμηθεί μόνο όταν η αντίθεση ανάμεσα σε αυτά σωματίδια είναι αρκετά μεγάλη.

Η θεωρητική βάση για τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας σε μικροκυματικές συχνότητες, στηρίζεται στη μεγάλη αντίθεση των διηλεκτρικών ιδιοτήτων μεταξύ των υγρού νερού και των υλικών του ξηρού εδάφους (Εδάφιο 2.2.2). Όταν προστίθεται νερό στο έδαφος, η διηλεκτρική σταθερά αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό και συνεπώς τόσο οι παθητικοί όσο και οι ενεργητικοί μικροκυματικοί αισθητήρες, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στην εδαφική υγρασία.

Η κάθε τεχνική ανάκτησης της εδαφικής υγρασίας, είτε με χρήση παθητικών είτε με χρήση ενεργητικών αισθητήρων, προσφέρει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα στην περιοχή των μικροκυμάτων, εκτός του ότι είναι ευαίσθητο στις διηλεκτρικές ιδιότητες των σωμάτων-επιφανειών (γεγονός που μας επιτρέπει να αναζητήσουμε τρόπους ανάκτησης εδαφικής υγρασίας από αισθητήρες τέτοιου τύπου), είναι επίσης ευαίσθητο στην εδαφική τραχύτητα και στη βλάστηση.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα στη διεθνή βιβλιογραφία, για τον υπολογισμό της επίδρασης της βλάστησης και της τραχύτητας του εδάφους στο σήμα επιστροφής που καταγράφουν οι αισθητήρες. Δεδομένου όμως ότι η ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων είναι μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία, με αμφιλεγόμενα πολλές φορές αποτελέσματα, το είδος και η ποιότητα των πρωτογενών δεδομένων, αναλόγως του τύπου του αισθητήρα, έχουν ιδιαίτερη σημασία, για τις χρησιμοποιούμενες εφαρμογές.

Επί του παρόντος, θεωρείται ότι με τις τεχνικές ανάκτησης της εδαφικής υγρασίας με χρήση παθητικών αισθητήρων, η επίδραση της εδαφικής υγρασίας στο σήμα επιστροφής, κυριαρχεί έναντι στην επίδραση της τραχύτητας του εδάφους, ενώ για τις τεχνικές ενεργητικών αισθητήρων, όπως τα RADAR, ισχύει το αντίθετο (K. Spical et al., 2002).

Από την άλλη μεριά, η χρήση τεχνικών ανάκτησης εδαφικής υγρασίας με ενεργητικούς αισθητήρες όπως το RADAR συνθετικού ανοίγματος, παρέχει το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης χωρικής διακριτικής ικανότητας, γεγονός που καθιστά τα προϊόντα αυτών των αισθητήρων, περισσότερο αξιοποιήσιμα για την κατασκευή εφαρμογών.

3.2.1. Καταλληλότητα Μικροκυματικών Φασματικών Καναλιών κι Αισθητήρων

Η ευαισθησία των χαμηλών μικροκυματικών συχνοτήτων στην εδαφική υγρασία είναι ένα γνωστό φαινόμενο στην επιστημονική κοινότητα, το οποίο έχει διερευνηθεί από πολλούς επιστήμονες. Γι αυτό, οι ερευνητικές δραστηριότητες οι οποίες διεξήχθησαν στο παρελθόν, έδειξαν ότι οι αισθητήρες που λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (P και L κανάλια) είναι ικανοί να μετρήσουν την εδαφική υγρασία. Δυστυχώς δεν υπάρχουν πλέον ενεργοί δορυφορικοί αισθητήρες που να λειτουργούν στα κανάλια P και

L, ενώ οι διαθέσιμοι αισθητήρες λειτουργούν σε ένα μόνο κανάλι (S. Paloscia et al., 2005). Το μειονέκτημα των αισθητήρων που λειτουργούν σε αυτά τα κανάλια, είναι ότι χρειάζονται μεγάλες κεραίες προκειμένου να πετύχουν χρήσιμη χωρική ανάλυση κι έτσι περιορίζεται η δυνατότητα τοποθέτησης τους σε δορυφορικές αποστολές.

Δεδομένου ότι σήμερα οι περισσότεροι αισθητήρες RADAR σε δορυφορικά συστήματα, λειτουργούν στο κανάλι C (π.χ Sentinel-1A και Sentinel-1B, RADARSAT-2, RADARSAT Constellation), η επιστημονική κοινότητα έχει στραφεί στην διερεύνηση της ευαισθησίας στην εδαφική υγρασία, του σήματος RADAR στο κανάλι C.

Το κανάλι C δεν είναι το ιδανικό για την ανάκτηση της εδαφικής υγρασίας, διότι εκτός από την εδαφική υγρασία, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στην τραχύτητα του εδάφους και στην παρουσία βλάστησης. Αυτό το συμπέρασμα όμως, ισχύει μόνο όταν εξεταστεί το πρότυπο του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος χωρικά. Αντιθέτως, όταν αναλυθούν χρονικά πρότυπα, η επίδραση της εδαφικής υγρασίας στο οπισθοσκεδαζόμενο σήμα, γίνεται εμφανής. Έρευνα με την χρήση του μετρητή σκέδασης του δορυφόρου ERS, έχει δείξει ότι στη C-band και σε τοπική κλίμακα, οι χρονικές επιδράσεις της εδαφικής υγρασίας, κυριαρχούν έναντι των επιδράσεων της βλάστησης και της τραχύτητας του εδάφους, οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως σταθερές (K. Spical et al., 2002).

Η θεωρία της εξέτασης χρονικών προτύπων, βασίζεται στο ότι η βλάστηση και η επιφανειακή τραχύτητα, μεταβάλλονται με πολύ μικρότερο βαθμό συγκριτικά με την εδαφική υγρασία, γεγονός που μας επιτρέπει την ανίχνευση της, παρά τις αδυναμίες των παρατηρήσεων της C-band, σε αυτόν τον τομέα. Όμως τα συστήματα SAR δεν είχαν κατασκευαστεί για να παρέχουν επαναλαμβανόμενη και συνεχή κάλυψη της γήινης επιφάνειας (μέχρι την αποστολή Sentinel-1), καθώς απαιτούν μεγάλη κατανάλωση ενέργειας η οποία περιορίζει την ώρα λειτουργίας ανά τροχιά. Οπότε δεν υπήρχε ο κατάλληλος αριθμός εικόνων που να καλύπτουν την ίδια περιοχή, για την εξέταση χρονικών προτύπων.

Γίνεται πλέον περισσότερο κατανοητό, ότι η εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας από δορυφορικά δεδομένα, είναι μια επιστημονική πρόκληση. Η επιλογή των αισθητήρων και των φασματικών καναλιών λειτουργίας τους, καθορίζει το είδος και την ποιότητα των πρωτογενών δεδομένων. Στη συνέχεια παρατίθενται κάποιες αντιπροσωπευτικές διαστημικές αποστολές, με στόχο εκτός των άλλων και την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η διαχρονική προσπάθεια της επιστημονικής κοινότητας να βρει τη «χρυσή τομή» ανάμεσα στην ακρίβεια και στην λειτουργικότητα, στον τομέα της εδαφικής υγρασίας.

3.2.2. Προηγούμενες Αποστολές Παθητικών Αισθητήρων

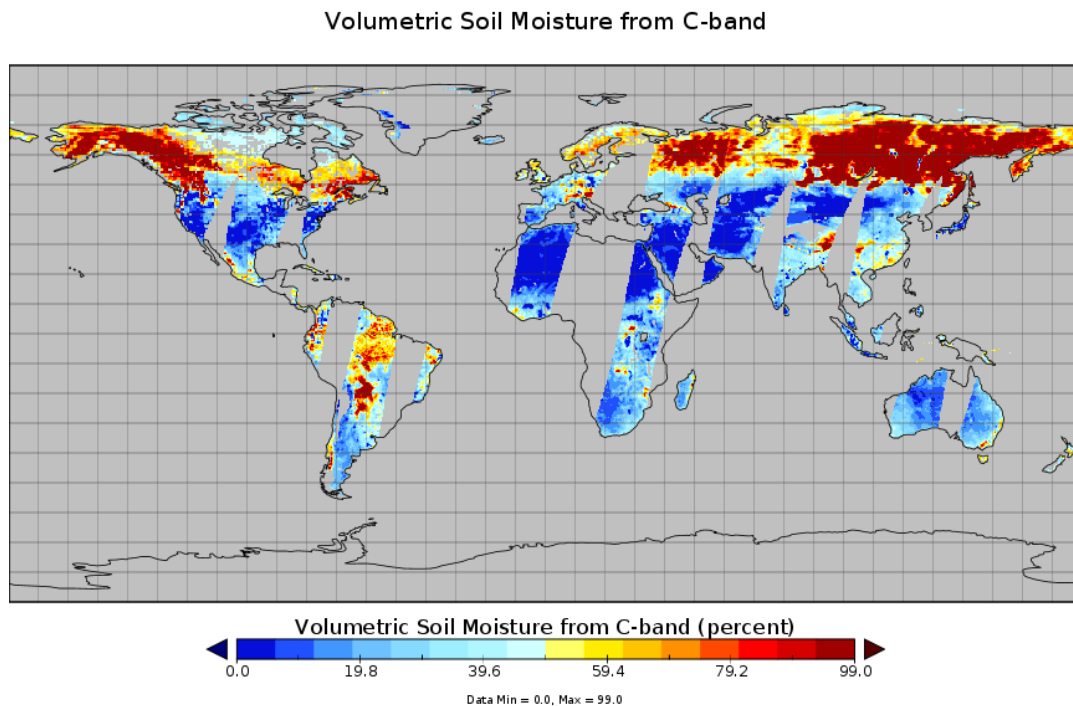
Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E)

Τα μικροκυματικά ραδιόμετρα ανήκουν στην κατηγορία των παθητικών αισθητήρων και είναι όργανα που μετρούν την ποσότητα της έντασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανακλούν οι επιφάνειες ή τα σώματα στην περιοχή των μικροκυμάτων. Τα μικροκυματικά ραδιόμετρα, ως μικροκυματικοί αισθητήρες, χρησιμοποιήθηκαν στο

παρελθόν για τη χαρτογράφηση της εδαφικής υγρασίας. Ένας τέτοιος αισθητήρας, είναι το Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E), ο οποίος τοποθετήθηκε στον δορυφόρο Aqua Satellite της NASA, που εκτοξεύτηκε τον Μάιο του 2002 και η λειτουργία του τερματίστηκε τον Δεκέμβριο του 2011.

Το AMSR-E μετρά τη μικροκυματική ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται από τη γήινη επιφάνεια, σε κατακόρυφη κι οριζόντια πόλωση, εκφραζόμενη σε θερμοκρασία φωτεινότητας. Παρέχει παγκόσμιες παρατηρήσεις σε έξι διαφορετικές συχνότητες:

- 6.9 GHz (C-band)
- 10.7 GHz (X-band)
- 36.5 GHz (Ka-band)



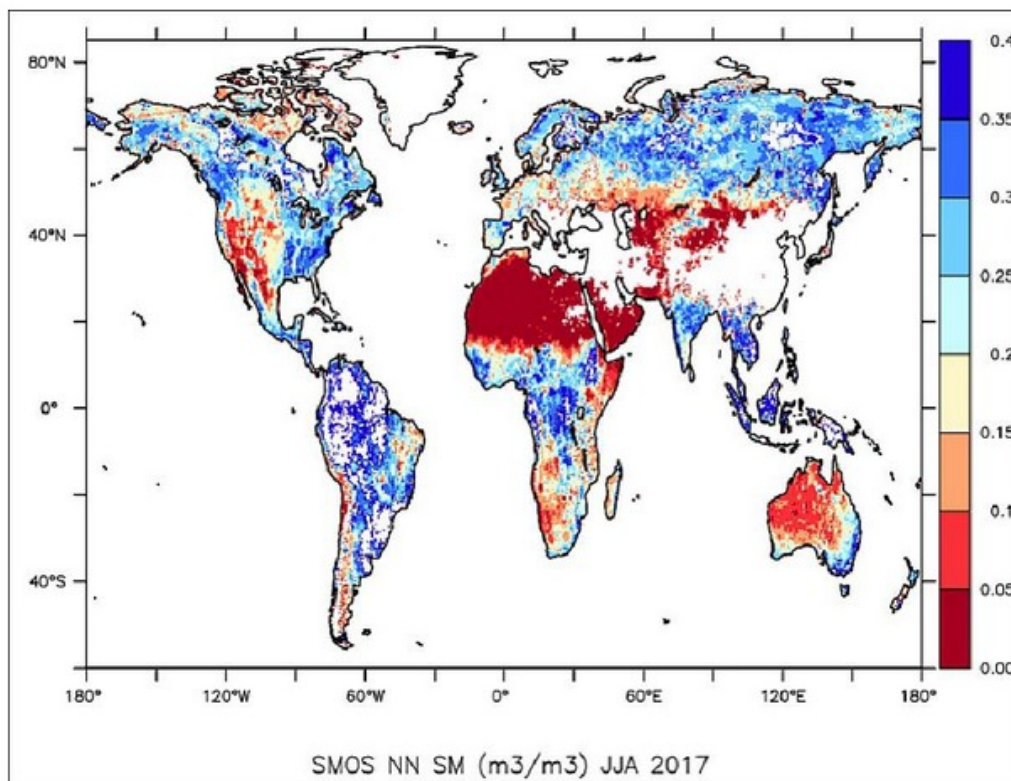
Εικόνα 15: Παγκόσμιος χάρτης εδαφικής υγρασίας από τον αισθητήρα AMSR-E με δεδομένα της C-band.
Πηγή: <https://disc.gsfc.nasa.gov>

Η χωρική κλίμακα των μετρήσεων του εδαφικού ίχνους, είναι 56 χιλιόμετρα για τη C-band, 38 χιλιόμετρα για τη X-band και 12 χιλιόμετρα για τη Ka-band. Το AMSR-E σαρώνει την επιφάνεια σε ανοδική και καθοδική λειτουργία.

Οι θερμοκρασίες φωτεινότητας μετατρέπονται σε τιμές εδαφικής υγρασίας, μέσω του μοντέλου Land Parameter Retrieval Model (LPRM, Owe et al. 2008). Το μοντέλο LPRM βασίζεται σε ένα μικροκυματικό μοντέλο μεταφοράς ακτινοβολίας, το οποίο συνδέει επιφανειακές γεωφυσικές μεταβλητές (υγρασία εδάφους, περιεκτικότητα της βλάστησης σε νερό και θερμοκρασία εδάφους) με τις παρατηρούμενες θερμοκρασίες φωτεινότητας.

Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis (MIRAS)

Ένας άλλος παθητικός αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν, είναι ο Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis (MIRAS), ο οποίος ανιχνεύει την μικροκυματική ακτινοβολία στο κανάλι L (1.4 GHz, 21cm). Τοποθετήθηκε στον δορυφόρο της αποστολής SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity Mission), ο οποίος εκτοξεύτηκε τον Νοέμβριο του 2009 και η λειτουργία του τερματίστηκε το 2017. Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους της αποστολής, ήταν η διεξαγωγή παγκόσμιων παρατηρήσεων της εδαφικής υγρασίας. Ως παθητικός αισθητήρας διαθέτει χαμηλή χωρική διακριτική ικανότητα (25 -50 χιλιόμετρα).



Εικόνα 16: Παγκόσμιος χάρτης της μέσης εδαφικής υγρασίας του Ιουνίου έως Ιουλίου 2017, από τον αισθητήρα MIRAS

<https://directory.eoportal.org>

Ο MIRAS αποτελείται από μια κεντρική δομή και τρεις βραχίονες. Διαθέτει 69 στοιχεία κεραίας τα οποία είναι εξίσου κατανεμημένα στους τρεις βραχίονες και την κεντρική δομή. Κάθε στοιχείο είναι ένας πομποδέκτης που μετρά την εισερχόμενη μικροκυματική ακτινοβολία από τη γήινη επιφάνεια, στο κανάλι L. Το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα μεταδίδεται σε μια κεντρική μονάδα συσχέτισης, η οποία εκτελεί συμβολομετρική αντιπαραβολή των σημάτων.

Ο παραπάνω χάρτης δημιουργήθηκε σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, με χρήση Νευρωνικών δικτύων (Neural Network). Τα Νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων σε μικρό χρονικό διάστημα. Σε αυτή την περίπτωση τα δεδομένα οπισθοσκέδασης επεξεργάστηκαν με χρήση νευρωνικών δικτύων, για την απόκτηση εκτιμήσεων εδαφικής υγρασίας, σε χρονική τάξη μεγέθους δευτερολέπτων.

3.2.3. Προηγούμενες Αποστολές Ενεργητικών Αισθητήρων

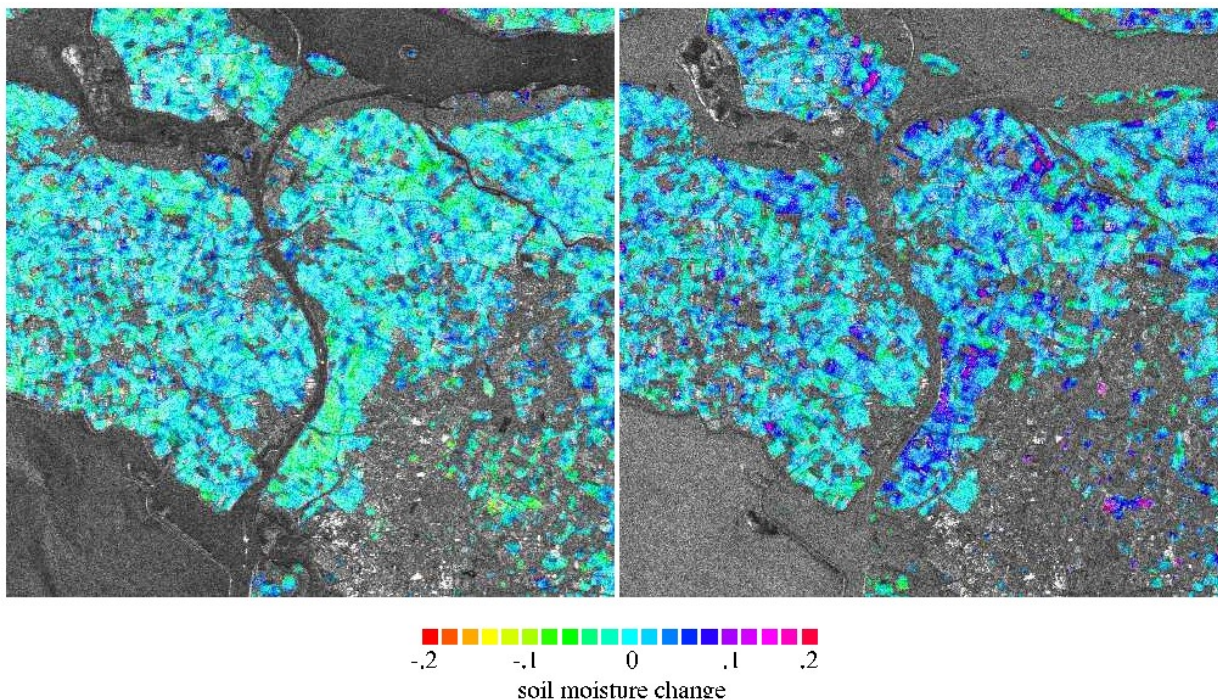
Μετρητής Σκέδασης

Η Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία εκτόξευσε το 1991 τον δορυφόρο ERS-1 και το 1995 τον δορυφόρο ERS-2, σε κοινή τροχιά. Η αποστολή ERS-1 τερματίστηκε τον Μάρτιο 2000 και του ERS-2 τον Σεπτέμβριο του 2011. Οι δορυφόροι εκτός των άλλων αισθητήρων, διέθεταν και μετρητή σκέδασης, ο οποίος συνέλεγε δεδομένα στην C-band (5.3 GHz).

Ο μετρητής σκέδασης ήταν σε λειτουργία για την παρακολούθηση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου, πάνω από τους ωκεανούς. Ήταν διαμορφωμένος ως ένα RADAR πραγματικού ανοίγματος, παρέχοντας τρεις απεικονίσεις RADAR της γήινης επιφάνειας, με χωρική ανάλυση 50 χιλιομέτρων και πλάτος λωρίδας 500 χιλιομέτρων (Lecomte, 1998). Οι τρεις διαφορετικές εικόνες της γήινης επιφάνειας, προέκυπταν από τρεις διαφορετικές κεραίες, οι οποίες μετέδιδαν διαδοχικά παλμούς της τάξης των μικρο-δευτερολέπτων (micro-second) χρονικά, προς την επιφάνεια της γης, από διαφορετικές οπτικές κατευθύνσεις. Οι κατευθύνσεις όρασης των κεραιών, ήταν κάθετες στην εδαφική τροχιά του δορυφόρου ERS. Μετά από την επιστροφή της ηχούς, γινόταν ανίχνευση των αλλοιωμένων παλμών. Τα δεδομένα καταγραφής στη συνέχεια βαθμονομούνταν (calibration), ώστε να δημιουργηθούν εικόνες του συντελεστή οπισθοσκέδασης σ_0 .

RADAR Συνθετικού Ανοίγματος

Οι δορυφόροι ERS-1 και ERS-2 διέθεταν επίσης τον πρώτο δορυφορικό αισθητήρα RADAR συνθετικού ανοίγματος (SAR). Το όργανο SAR και στους 2 δορυφόρους, χρησιμοποιούσε τη C-band (5.6 c.m/5.3 GHz) με πόλωση VV, ενώ η χωρική ανάλυση του ήταν 25 μέτρα και η χρονική διακριτική ικανότητα 35 ημέρες. Οι δορυφόροι λειτουργούσαν με σταθερή γωνία πρόσπτωσης 23°.



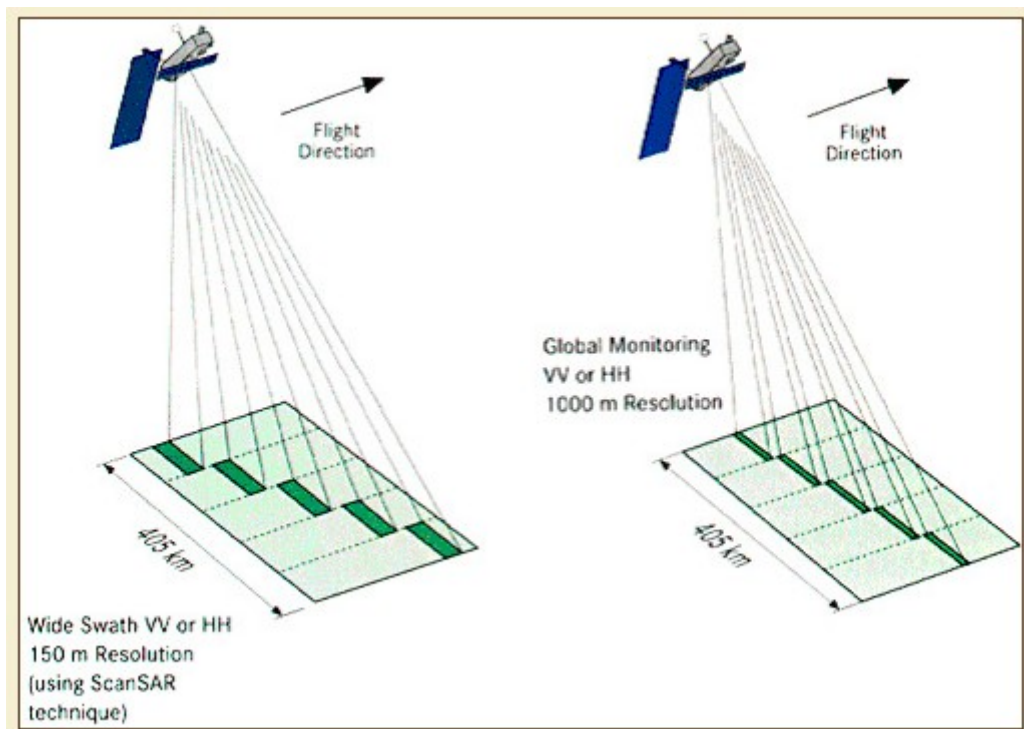
Εικόνα 17: Χάρτης αλλαγών εδαφικής υγρασίας της Ζηλανδίας (4 έως 13 Μαρτίου αριστερά και 13 έως 22 Μαρτίου δεξιά), ο οποίος ανακτήθηκε από πολυχρονικά δεδομένα ERS-1.

Πηγή: <https://earth.esa.int>

Οι χάρτες εδαφικής υγρασίας των οργάνων SAR αυτών των δορυφόρων, παρέχουν ικανοποιητική χωρική ανάλυση, όμως εφόσον δεν βρίσκονται πλέον σε λειτουργία, τα δεδομένα τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για ερευνητικούς σκοπούς, λαμβάνοντας υπόψιν ότι διαθέτουν μεγάλη χρονοσειρά δεδομένων (14 έτη).

Advanced SAR (ASAR)-Δορυφόρος ENVISAT

Μια προσπάθεια εκμετάλλευσης της χωρικής ανάλυσης των συστημάτων SAR με ταυτόχρονη επαρκή κάλυψη για την εξέταση χρονικών προτύπων, αποτελεί η λειτουργία Scan SAR. Όπως προαναφέρθηκε, τα συστήματα SAR παρέχουν αυξημένη χωρική ανάλυση με μειονέκτημα όμως την χαμηλή χρονική διακριτική ικανότητα, λόγω των αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων. Με τη λειτουργία ScanSAR, δίνεται η δυνατότητα απεικόνισης ευρείων λωρίδων εδάφους, χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό σύστημα διεύθυνσης δέσμης και κατανομή του χρόνου λειτουργίας του αισθητήρα, μεταξύ των γειτονικών υπο-λωρίδων. Η τεχνική αυτή οδηγεί σε μείωση της χωρικής διακριτικής ικανότητας κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου (azimuth) και σε ταυτόχρονη όμως αύξηση του εύρους των γωνιών πρόσπτωσης για κάθε επεξεργασμένη σκηνή ScanSAR.

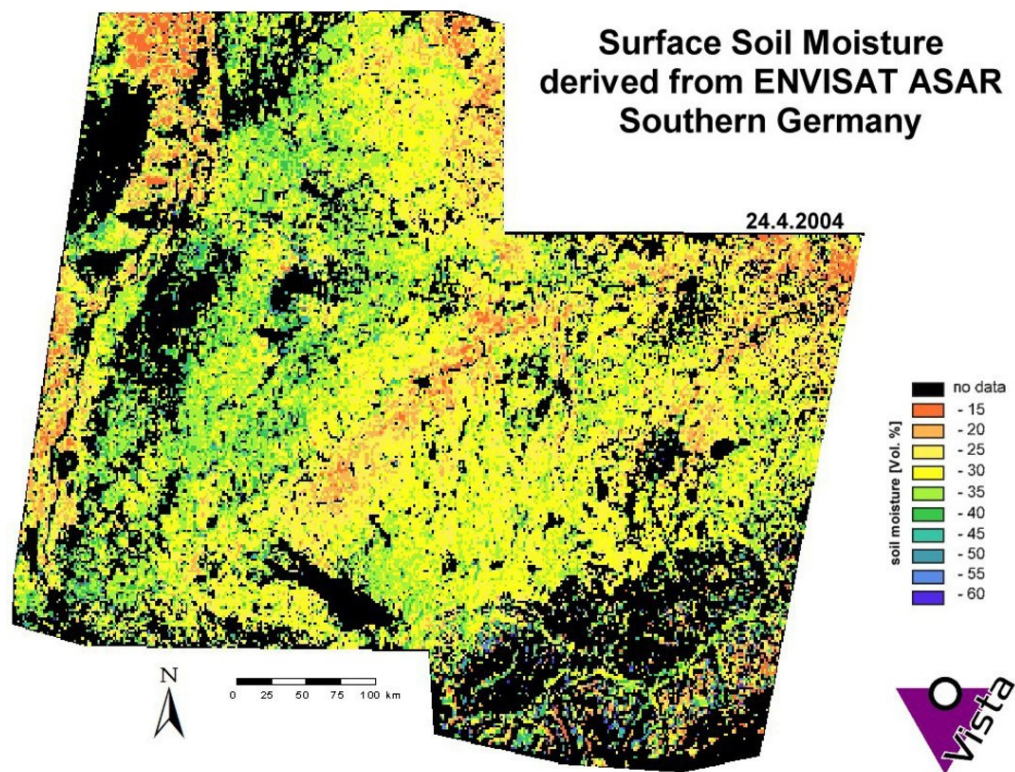


Εικόνα 18: Τεχνική ScanSAR του οργάνου ASAR στον δορυφόρο ENVISAT.

Πηγή: <https://earth.esa.int>

Μέχρι τότε υπήρχαν σε λειτουργία αρκετοί δορυφορικοί αισθητήρες RADAR οι οποίοι είχαν τη δυνατότητα μέσω της χρήσης της τεχνικής ScanSAR, να καλύπτουν ευρείες λωρίδες εδάφους (200 με 500 χιλιόμετρα), όμως ο ASAR ήταν ο πρώτος δορυφορικός αισθητήρας , με δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας. Αυτή η λειτουργία ονομαζόταν παγκόσμια παρακολούθηση (global monitoring mode), με δυνατότητα κάλυψης εδαφικής λωρίδας 400 χιλιομέτρων (Carsten Pathe et al. ,2009). Ο ASAR ήταν τοποθετημένος στον δορυφόρο ENVISAT, η χωρική του ανάλυση ήταν 1 χιλιόμετρο και η χρονική διακριτική του ικανότητα

35 ημέρες. Ο ENVISAT εκτοξεύτηκε το 2002 και η λειτουργία του τερματίστηκε έπειτα από απρόσμενη απώλεια επικοινωνίας, τον Απρίλιο του 2012.



Εικόνα 19: Χάρτης εδαφικής υγρασίας της Νότιας Γερμανίας από τον δορυφόρο ENVISAT.
Πηγή: <https://earth.esa.int>

3.3. Πλεονεκτήματα Αισθητήρων της Αποστολής Sentinel-1

Έχοντας ολοκληρώσει μια σύντομη αναδρομή στις προσπάθειες της επιστημονικής κοινότητας να δημιουργήσουν αποτελεσματικούς αισθητήρες για εφαρμογές εκτίμησης εδαφικής υγρασίας, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η δορυφορική αποστολή Sentinel-1, αποτελεί την νεότερη και πληρέστερη μέχρι στιγμής προσπάθεια. Θα λέγαμε ότι αυτή η αποστολή, φέρνει την επιστημονική κοινότητα πιο κοντά στη «χρυσή τομή» των αισθητήρων για την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας και αυτός είναι ο λόγος που τα δεδομένα της αποστολής Sentinel-1, επιλέχθηκαν γι' αυτήν την εργασία.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα χαρακτηριστικά της αποστολής Sentinel-1, τα οποία αναλύθηκαν στην ενότητα 2.2.4, διαπιστώνουμε τη σημαντικότητα των τεχνολογικών χαρακτηριστικών της αποστολής, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα εφαρμογής σύγχρονων προσεγγίσεων ανάκτησης εδαφικής υγρασίας, από δεδομένα SAR.

Όπως προαναφέρθηκε, το φασματικό κανάλι C δεν είναι το ιδανικό για την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας, όμως με επαρκή χρονοσειρά δεδομένων είναι δυνατόν να γίνει ανάλυση χρονικών προτύπων και να αναγνωριστεί η συμβολή της εδαφικής τραχύτητας

και της βλάστησης στις τιμές οπισθοσκέδασης. Η δορυφορική αποστολή Sentinel-1, με τον αστερισμό των δορυφόρων Sentinel-1A και Sentinel-1B, διαθέτει χρονική διακριτική ικανότητα (revisit time) 6 ημερών, η οποία επιτρέπει την ανάλυση χρονοσειρών για τη δημιουργία ακριβέστερων μοντέλων εδαφικής υγρασίας αλλά και εφαρμογών με αυξημένες επιχειρησιακές δυνατότητες, όντας σε πλήρη λειτουργία μέχρι και σήμερα.

Αναφορικά με τη χωρική ανάλυση, οι αισθητήρες των δορυφόρων Sentinel-1, καλύπτουν την ίδια ευρεία περιοχή με αυτή του αισθητήρα RADAR του δορυφόρου ENVISAT, με τη διαφορά ότι οι Sentinel-1 πετυχαίνουν καλύτερη ανάλυση. Με την τεχνική ScanSAR του ENVISAT, μειωνόταν η χωρική διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση του αζιμουθίου, όμως με την τεχνική TOPSAR, της λειτουργίας IW των Sentinel-1, η μείωση της ανάλυσης γίνεται μέσω της εικονικής συρρίκνωσης του αποτυπώματος της κεραίας σε ένα επιτόπιο στόχο, αντί του να κοπεί σε λωρίδες το μοτίβο της κεραίας. Οι αισθητήρες των δορυφόρων δίνουν τη δυνατότητα προϊόντων με διαφορετική χωρική ανάλυση, η οποία μπορεί να φτάσει και κάτω των 5 μέτρων, ενώ μπορεί να καλυφθούν εδαφικές λωρίδες άνω των 400 χιλιομέτρων, δίνοντας τη δυνατότητα δημιουργίας προϊόντων παγκόσμιας κάλυψης και υψηλής ανάλυσης.

4. ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ

Για την παρούσα εργασία, εφαρμόστηκαν μοντέλα ανάκτησης εδαφικής υγρασίας από τηλεσκοπικά δεδομένα σε καλλιέργειες βαμβακιού. Δεδομένου του ότι η βλάστηση αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα του RADAR, κρίνεται σκόπιμο να περιγραφούν τα βασικά χαρακτηριστικά του φυτού και τα στάδια ανάπτυξης του.

4.1. Γενικά

Το βαμβάκι (*Gossypium*) είναι ένα πολυετές δικοτυλήδονο φυτό που ανήκει στην οικογένεια των Μαλαχωδών. Καλλιεργείται από τους προϊστορικούς χρόνους και ιστορικά δεδομένα έδειξαν πως η καλλιέργεια του βαμβακιού άρχισε στην Ινδία και στην Αμερική, ανεξάρτητα μεταξύ τους. Στην Ινδία εμφανίστηκε πριν από 5000 χρόνια και στην Αμερική χιλιάδες χρόνια πριν από την ανακάλυψη της. Στην Ελλάδα, η πρώτη καλλιέργεια βαμβακιού πραγματοποιήθηκε στην Ηλεία τον 2ο αιώνα π.Χ και σύμφωνα με ιστορικές μελέτες, το έφεραν οι στρατιώτες του Μ. Αλέξανδρου από τις Ινδίες.

Το βαμβάκι είναι από τις σημαντικότερες καλλιέργειες στον κόσμο, ενώ επηρεάζει την οικονομική ανάπτυξη και ευημερία πολλών χωρών. Η παγκόσμια καλλιεργούμενη έκταση ανέρχεται τα τελευταία χρόνια σε 370-400 εκατομμύρια στρέμματα. Σήμερα η χώρα μας βρίσκεται ανάμεσα στις 12 μεγαλύτερες βαμβακοπαραγωγικές χώρες του κόσμου, με συνολική καλλιεργήσιμη έκταση 3.630 χιλιάδες στρέμματα (Α. Μπαλαμπάνης, 2017) και με το σύνολο των αρδευόμενων εκτάσεων της χώρας ν' ανέρχεται στα 10.749 χιλιάδες στρέμματα (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2018). Αυτοί οι αριθμοί αποτελούν έκπληξη καθώς η Ελλάδα γεωγραφικά βρίσκεται σε οριακή περιοχή για την καλλιέργεια βαμβακιού. (Συνήθως το φυτό προσαρμόζεται σε περιοχές μεταξύ 37ου Βόρειου Παράλληλου και 32ου Νότιου Παράλληλου).

4.2. Καλλιεργούμενες ποικιλίες

Τα είδη που καλλιεργούνται σήμερα είναι τα παρακάτω τέσσερα:

- **Πώδες βαμβάκι:** Συναντάται ως αυτοφυές στο Πακιστάν, στη Ινδία και σε ορισμένες περιοχές της Αφρικής. Παλαιότερα η καλλιέργεια του ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένη, όμως αντικαταστάθηκε κυρίως με το είδος του χνουδωτού, το οποίο θεωρείται καλύτερης ποιότητας. Στην Ελλάδα καλλιεργούνταν μέχρι το 1950 στη Λιβαδειά.
- **Δενδροειδές βαμβάκι:** Βρίσκεται αυτοφυές στο Πακιστάν, τη Σρι Λάνγκα και την Ινδία, όπου θεωρείται ιερό φυτό και βρίσκεται έξω από πολλούς ναούς. Οι ίνες του είναι πολύ κοντές και μειωμένης ποιότητας, γι αυτό η καλλιέργεια του είναι πολύ περιορισμένη.
- **Βαρβαδεινό βαμβάκι:** Δενδροειδή φυτά, με ύψος που μπορεί να φτάσει και τα έξι μέτρα. Το είδος αυτό κατάγεται από τη Λατινική Αμερική και σήμερα καλλιεργείται στη Αίγυπτο, το Σουδάν, σε πρώην Σοβιετικές χώρες, στις Η.Π.Α, στη Βραζιλία και

στο Περού. Οι ίνες του είναι καλής ποιότητας και οι μακρύτερες απ' όλα τα είδη και φτάνουν μέχρι και 50 χιλιοστά.

- **Αδρότριχο Χνουδωτό βαμβάκι:** Είναι αυτό που καλλιεργείται συχνότερα και δίνει πάνω από το 90% της παγκόσμιας παραγωγής, ενώ είναι το μοναδικό είδος που καλλιεργείται στην Ελλάδα. Το συγκεκριμένο είδος είναι πολυετές αλλά στην χώρα μας καλλιεργείται ως μονοετές, καθώς αδυνατεί να επιβιώσει στις θερμοκρασίες του χειμώνα. Οι βλαστοί του διακλαδώνονται φτάνοντας σε ύψος το 1.5 μέτρο.

4.3. Βασικά Στοιχεία-Στάδια Ανάπτυξης

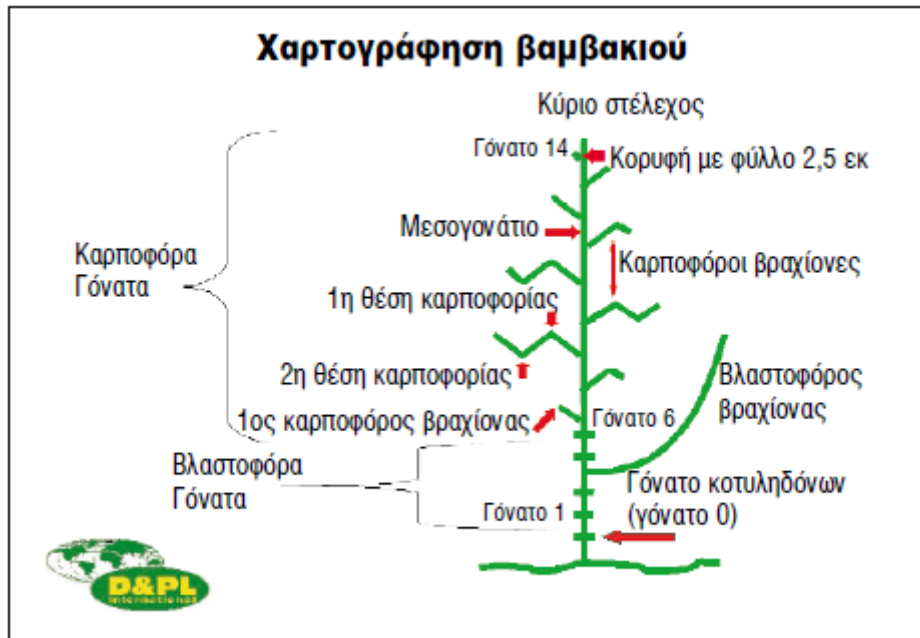
Η ηλικία των φυτών του βαμβακιού, προσδιορίζεται από τον αριθμό των γονάτων του. Το πρώτο γόνατο ονομάζεται κοτυληδόνα και αποτελεί σημαντικό μέρος του εμβρύου, το οποίο περιλαμβάνεται στον σπόρο των φυτών. Ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα, καθώς έχει δύο οφθαλμούς, ο ένας απέναντι από τον άλλο. Στις μετρήσεις λαμβάνεται ως «γόνατο 0» και δεν καταμετράται.



Εικόνα 20: Πρώτο γόνατο-κοτυληδόνα βαμβακιού.
Πηγή: Δ. Μπαξεβάνος, 2000

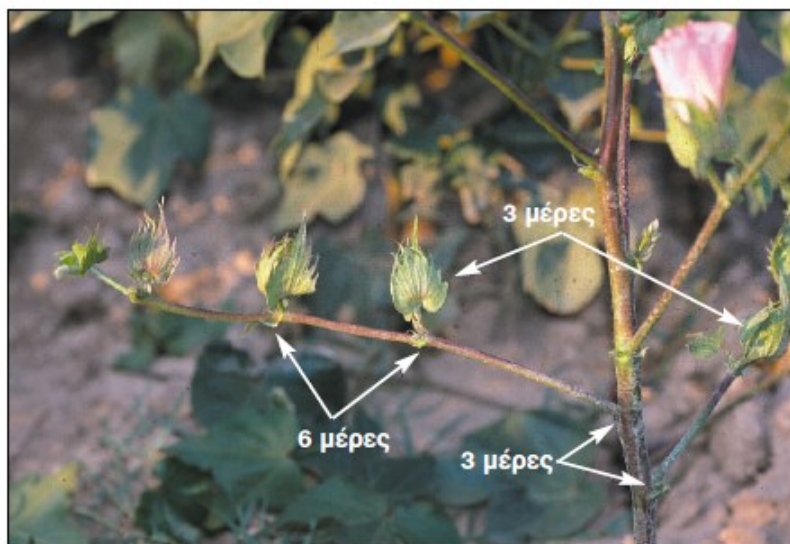
Τα πρώτα γόνατα μετά τις κοτυληδόνες, ονομάζονται βλαστοφόρα γόνατα γιατί παράγουν τους βλαστοφόρους βραχίονες, που ο καθένας θα μπορούσε να αποτελεί ξεχωριστό φυτό. Μετά τα βλαστοφόρα γόνατα, υπάρχουν τα καρποφόρα γόνατα, τα οποία αναπτύσσουν καρποφόρους βραχίονες. Το πρώτο καρποφόρο στον καρποφόρο βραχίονα, ονομάζεται «καρποφόρο θέσης 1», το δεύτερο «καρποφόρο θέσης 2» κ.ο.κ. . Ως κορυφαίο γόνατο, προσδιορίζεται αυτό που έχει προσκολλημένο ένα φύλλο διαμέτρου τουλάχιστον 2.5 εκατοστών.

Το διάστημα ανάμεσα σε δύο γόνατα, ονομάζεται μεσογονάτιο διάστημα. Μετρώντας το μήκος του, είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε τον ρυθμό ανάπτυξης του φυτού.



Εικόνα 21: Χαρτογράφηση βαμβακιού.
 Πηγή: Δ. Μπαξεβάνος, 2000

Η χρονική απόσταση μεταξύ των γονάτων του στελέχους του φυτού, είναι περίπου τρεις μέρες. Τα γόνατα των καρποφόρων βραχιόνων, απέχουν χρονικά μεταξύ τους, περίπου έξι ημέρες. Συνεπώς, μετρώντας τον αριθμό των γονάτων του κύριου στελέχους καθώς και τον αριθμό των γονάτων των καρποφόρων βραχιόνων, είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε την ηλικία του φυτού και των καρποφόρων.



Εικόνα 22: Χρονική αποχή γονάτων.
 Πηγή: Δ. Μπαξεβάνος, 2000

Στο φυτό υπάρχει πάντα, μόνο ένα λευκό άνθος πρώτης θέσης, με δεδομένο ότι αναπτύσσεται ένα καρποφόρο πρώτης θέσης στο κύριο στέλεχος, κάθε τρεις ημέρες. Συνεπώς, στην ηλικία του λευκού άνθους, υπάρχει μόνο ένα (Δ. Μπαξεβάνος, 2000).



Εικόνα 23: Λευκό άνθος πρώτης θέσης.
Πηγή: Δ. Μπαξεβάνος, 2000

Οι οφθαλμοί οι οποίοι εξελίσσονται μετέπειτα σε άνθη, στην αρχή εμφανίζονται σαν μικρές πράσινες πυραμοειδείς κατασκευές, οι οποίες ονομάζονται χτένια.



Εικόνα 24: Χτένια βαμβακιού.
Πηγή: ΤΕΙ Ιονίων Νήσων e-Class

Ο καρπός του βαμβακιού είναι κάψα και έχει 8-10 σπέρια που περιβάλλονται από λευκές ίνες. Στη βοτανική, κάψα είναι ένα είδος αποξηραμένου καρπού που παράγεται από πολλά είδη ανθοφόρων φυτών, όπως το βαμβάκι.



Εικόνα 25: Χτένια βαμβακιού.

Πηγή: <https://www.yraithros.gr>

Η ανάπτυξη του φυτού, μπορεί να διακριθεί σε πέντε βασικά στάδια ανάπτυξης:

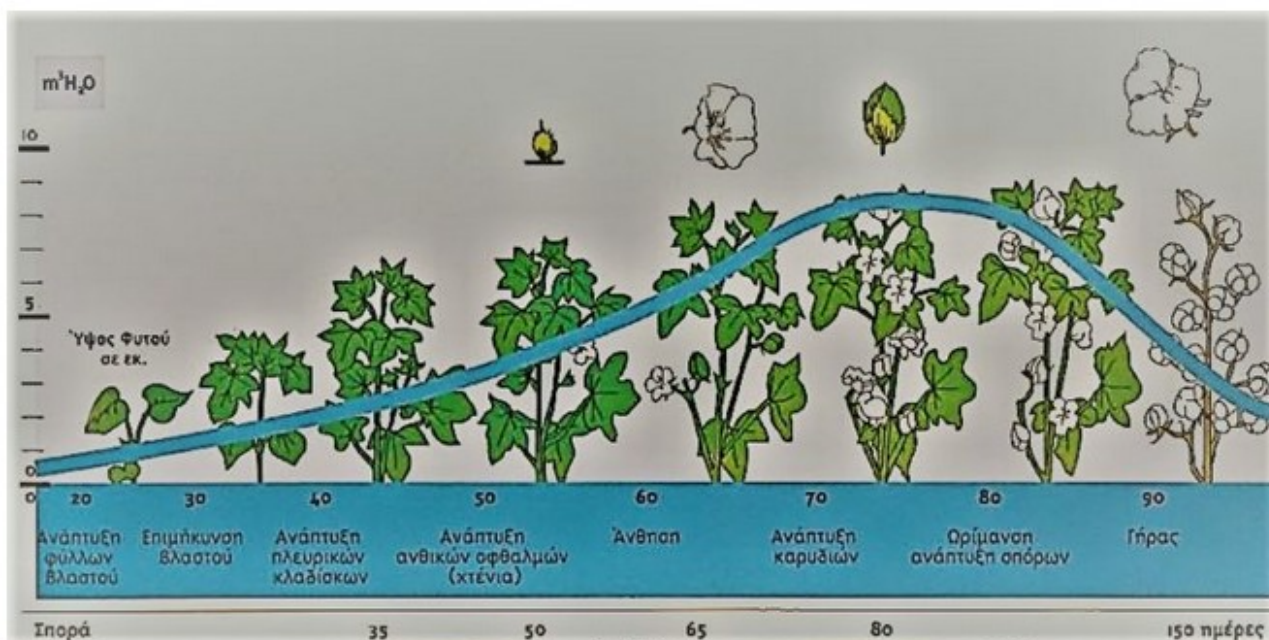
- 1) φύτευμα-εμφάνιση κοτυληδών
- 2) πρώτη ανάπτυξη-διαμόρφωση της φυτοστοιβάδας
- 3) σχηματισμός ανθοφόρων οφθαλμών-έναρξη άνθησης
- 4) άνθηση-έναρξη καρποφορίας
- 5) ανάπτυξη και ωρίμανση καρπών

Το βαμβάκι ως φυτό συνεχούς ανάπτυξης, συνεχίζει τη βλαστική αύξηση ενώ ταυτόχρονα εμφανίζονται άνθη και καρποί, οπότε μεταξύ των τριών τελευταίων σταδίων, παρουσιάζονται αλληλοκαλύψεις.

4.4. Απαιτήσεις Άρδευσης-Εδαφικής Υγρασίας

Το βαμβακόφυτο έχει αρκετά υψηλό συντελεστή διαπνοής. Για να καλλιεργηθεί χωρίς άρδευση πρέπει η ετήσια βροχόπτωση να είναι τουλάχιστον 350 mm, από τα οποία τα 175-200 mm να πέφτουν κατά την περίοδο της καρποφορίας (Γαλανοπούλου-Σενδούκα, 2002).

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα, το φυτό έχει μειωμένες ανάγκες νερού μέχρι τον σχηματισμό των χτενιών, ενώ οι ανάγκες για νερό αυξάνονται κατά την άνθηση μέχρι και την ωρίμανση, η οποία συνήθως είναι τους μήνες Ιούλιο με Αύγουστο.



Εικόνα 26: Κατανάλωση νερού στα διάφορα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας βαμβακιού.

Πηγή: <https://www.agrorama.gr>

Η έλλειψη εδαφικής υγρασίας είναι επίσης από τους σπουδαιότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη του φυτού. Σε έδαφος που η υγρασία βρίσκεται στο σημείο ή κάτω από το σημείο μαράνσεως, ο σπόρος δεν μπορεί να φυτρώσει και τα νεαρά φυτά δεν μπορούν να μεγαλώσουν. Αν μάλιστα οι συνθήκες ξηρασίας πάρουν παράταση για μεγάλη περίοδο, τα φυτά πεθαίνουν. Για να φυτρώσει ο σπόρος πρέπει να απορροφήσει αρκετό νερό, σε μερικές ποικιλίες μάλιστα μέχρι και το τριπλάσιο του βάρους του. Όταν η εδαφική υγρασία είναι πολύ περιορισμένη, ο σπόρος μπορεί να μείνει αμετάβλητος στον αγρό για μεγάλο χρονικό διάστημα, μέχρι και 45 ημερών (Γαλανοπούλου-Σενδούκα, 2002). Επιπλέον, η περιορισμένη υγρασία καθυστερεί την ανάπτυξη, ενώ η συνεχιζόμενη έλλειψη υγρασίας, μπορεί να μειώσει την απόδοση και την ποσότητα της καλλιέργειας.

Η περίσσεια υγρασίας μπορεί να δημιουργήσει, ειδικότερα στην αρχή και το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου προβλήματα στην καλλιέργεια. Σε πλημμυρισμένο έδαφος ο βαμβακόσπορος κατά το στάδιο φυτρώματος και τα νεαρά φυτά γρήγορα νεκρώνονται από ασφυξία. Υπερβολική εδαφική υγρασία σε πιο προχωρημένα στάδια αναπτύξεως, έχει σαν αποτέλεσμα να κλείνει τον καλό αερισμό και τείνει να εμποδίσει το φυτό από το να αναπτύξει βαθύ ριζικό σύστημα με συνέπεια αργότερα να γίνεται πιο ευαίσθητο στην ξηρασία. Η υπερβολική εδαφική υγρασία κατά τη βλαστική ανάπτυξη του φυτού, ειδικότερα όταν συνδυάζεται με χαμηλές θερμοκρασίες, οψιμίζει την παραγωγή (Γαλανοπούλου-Σενδούκα, 2002). Υπερβολική υγρασία κατά την περίοδο ωρίμανσης των κατώτερων καρυδίων, περιορίζει συχνά την απόδοση, καθώς συντελεί στην σήψη των καρυδίων (Γαλανοπούλου-Σενδούκα, 1995).

Η καλλιέργεια βαμβακιού, αποτελεί σημαντικό κομμάτι της εγχώριας οικονομίας. Για την μέγιστη απόδοση των φυτών, είδαμε ότι απαιτούνται συγκεκριμένες ανάγκες εδαφικής υγρασίας στα διάφορα στάδια ανάπτυξης του φυτού. Για τον λόγο αυτό, η μελέτη για την

ανάπτυξη μοντέλων εκτίμησης εδαφικής υγρασίας από δορυφορικά δεδομένα και η δημιουργία αντίστοιχων προϊόντων, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική.

5. ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Τόσο οι τεχνικές ανάκτησης της εδαφικής υγρασίας με χρήση παθητικών μικροκυματικών αισθητήρων, όσο και αυτές με ενεργητικούς, πρέπει να λαμβάνουν υπόψιν τις επιπτώσεις της βλάστησης και της τραχύτητας της επιφάνειας του εδάφους, στο μικροκυματικό σήμα. Στην πραγματικότητα, το να ληφθούν υπόψιν οι παράγοντες αυτοί, έχει αποδειχτεί μια επιστημονική πρόκληση, η οποία βρίσκεται ακόμα υπό διερεύνηση.

Οι ερευνητές έχουν αναπτύξει θεωρητικά, ημι-εμπειρικά κι εμπειρικά μοντέλα για την ανάκτηση της εδαφικής υγρασίας από Τηλεσκοπικά δεδομένα RADAR. Οι θεωρητικές προσεγγίσεις μοντελοποιούν τη συμπεριφορά οπισθοσκέδασης των επιστρεφόμενων παλμών, βασιζόμενα στην γωνία πρόσπτωσης, στη συχνότητα, στην τραχύτητα του εδάφους και στην διηλεκτρική σταθερά. Αυτού του είδους τα μοντέλα απαιτούν πολλές παραμέτρους εισόδου, οι οποίες δεν είναι πάντα διαθέσιμες. Οι προσεγγίσεις που αξιοποιούν την πολωσιμετρική πληροφορία για την ανάλυση του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος και τη διόρθωση λόγω βλάστησης και τραχύτητας του εδάφους, απαιτούν πλήρως πολωσιμετρικά δεδομένα SAR (δεδομένα με όλους τους δυνατούς προσανατολισμούς πόλωσης: HH, VV, HV και VH), τα οποία μπορούν να παρέχουν μόνο λίγοι αισθητήρες. Για αυτόν το λόγο χρησιμοποιούνται ευρέως τα μοντέλα εμπειρικών και ημι-εμπειρικών προσεγγίσεων, ειδικά για περιοχές με βλάστηση, τα οποία απαιτούν ελάχιστες παραμέτρους εισόδου (S. Esch et al., 2018).

Όπως έχει αναφερθεί, οι μετρήσεις RADAR σε γυμνό έδαφος είναι ευαίσθητες εκτός από την εδαφική υγρασία και στην εδαφική τραχύτητα. Τα θεωρητικά μοντέλα σκέδασης και οι μετρήσεις RADAR, δείχνουν ότι οι συντελεστές οπισθοσκέδασης είναι περισσότερο ευαίσθητοι στην εδαφική τραχύτητα, από ότι στην εδαφική υγρασία, γεγονός που επιβάλλει την κατασκευή μοντέλων για την ανάκτηση της εδαφικής υγρασίας. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα για την αναστροφή των μετρήσεων της οπισθοσκέδασης του συστήματος RADAR, προκειμένου να εκτιμηθεί η επιφανειακή εδαφική υγρασία.

5.1. Ημι-εμπειρικό Μοντέλο Oh

Ένα από τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα μοντέλα για την ανάκτηση της εδαφικής υγρασίας, χρησιμοποιώντας δεδομένα RADAR, είναι το μοντέλο Oh, όπως έχει επικρατήσει να αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία. Είναι ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο πολωσιμετρικής οπισθοσκέδασης για γυμνό έδαφος, το οποίο προτάθηκε από τον Yisak Oh. Ως ημι-εμπειρικό μοντέλο, έχει το μειονέκτημα της έλλειψης γενικότητας, καθώς αυτού του είδους τα μοντέλα, όπως θα διαπιστωθεί στη συνέχεια, βαθμονομούνται σε συγκεκριμένες συνθήκες.

Υπάρχουν διάφορες εκδόσεις του συγκεκριμένου μοντέλου, όμως θα επικεντρωθούμε σε αυτή που προτάθηκε το 2004, η οποία είναι και αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας στην περιοχή μελέτης μας και για τον λόγο αυτό θα αναλυθεί εκτενέστερα από τα υπόλοιπα μοντέλα.

5.1.1. Ανάλυση Μοντέλου

Η προσέγγιση αναφορικά με την περιεχόμενη υγρασία στο συγκεκριμένο μοντέλο, είναι η ίδια με αυτή που προτάθηκε από τους Y. Oh et al. το 2002 και στην οποία η περιεχόμενη εδαφική υγρασία χρησιμοποιείται ως παράμετρος εισόδου αντί της πολύπλοκης διηλεκτρικής σταθεράς. Ο λόγος είναι ότι η οπισθοσκέδαση εξαρτάται ελάχιστα από το είδος του εδάφους, συγκριτικά με την εδαφική τραχύτητα και την εδαφική υγρασία. Για ένα τυπικό αγροτικό έδαφος όπως τυρφώδες-πηλώδες και αμμοπηλώδες, η ανακλαστικότητα Fresnel (ανάκλαση και μετάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας έπειτα από την πρόσπτωση της σε επιφάνειες διαφορετικών υλικών) εμφανίζει περίπου γραμμική εξάρτηση με την ογκομετρική περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία M_v και για εύρος περιεκτικότητας εδαφικής υγρασίας $0.03 < M_v < 0.35$ (Y. Du et al., 2002). Συνεπώς η ογκομετρική περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία M_v , μπορεί να ανακτηθεί απευθείας από το μοντέλο, χωρίς την απαίτηση επιπλέον υπολογισμών για τη μετατροπή της διηλεκτρικής σταθεράς σε τιμή για την M_v . Στο μοντέλο που προτάθηκε από τον Y. Oh το 2004, με την περιεχόμενη υγρασία M_v ως παράμετρο εισόδου, γίνεται η απευθείας αναστροφή του μοντέλου για την ανάκτηση της, γεγονός που απλοποιεί τους υπολογισμούς και αποτελεί τον λόγο που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη έκδοση του μοντέλου.

Οι παράμετροι εισόδου του, είναι η τοπική γωνία πρόσπτωσης θ , η ογκομετρική περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία M_v (όπως προαναφέρθηκε) και το γινόμενο των παραμέτρων s και l με τον κυματικό αριθμό k , δηλαδή ks και kl (γνωστά ως παράμετροι τραχύτητας του εδάφους) όπου s είναι το rms (root mean square) του ύψους και l η συσχέτιση του μήκους. Η συσχέτιση μήκους l , είναι ένα μέτρο των διακυμάνσεων του ύψους της επιφάνειας μεταξύ γειτονικών σημείων και υπολογίζεται μέσω της συνάρτησης συσχέτισης (correlation function) για το μήκος, που αποτελεί αντικείμενο της Στατιστικής Μηχανικής. Αυτού του είδους οι συναρτήσεις, χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της συσχέτισης μεταβλητών σε διάφορες θέσεις, σε μικροσκοπικό επίπεδο όπως η επιφανειακή τραχύτητα.

Το k είναι ο αριθμός του κύματος (wavenumber) και δίνεται από τη σχέση $k=2\pi f/c$.

Η περιεχόμενη εδαφική υγρασία M_v των πρώτων 3 εκατοστών του εδαφικού στρώματος, είναι αυτή που χρησιμοποιείται σε όλες τις συχνότητες, καθώς έχει δείχτει ότι η εδαφική επίστρωση των πρώτων 2-3 εκατοστών, επιδεικνύει τη μεγαλύτερη επιρροή στην απόκριση της οπισθοσκέδασης του RADAR, ακόμα και αν το κύμα διεισδύει περισσότερο στο έδαφος, όπως με την χρήση της L- band σε ξηρό έδαφος. Το ημι-εμπειρικό μοντέλο για επιφάνειες γυμνού εδάφους, δίνεται από τους τύπους (Y. Oh et al, 2002):

$$\sigma_{vh}^o = 0.11 M_v^{0.7} \cos(\theta)^{2.2} [1 - \exp(-0.32 (ks)^{1.8})] \quad (4)$$

$$p = \frac{\sigma_{hh}^o}{\sigma_{vv}^o} = 1 - \left(\frac{\theta}{90^\circ}\right)^{0.35 M_v^{-0.65}} * e^{-0.4 (ks)^{1.4}} \quad (5)$$

$$q = \frac{\sigma_{vh}^o}{\sigma_{vv}^o} = 0.1 - \left(\frac{s}{l} + \sin(1.3\theta) \right)^{1.2} * \{1 - \exp[-0.9(ks)^{0.8}]\} \quad (6)$$

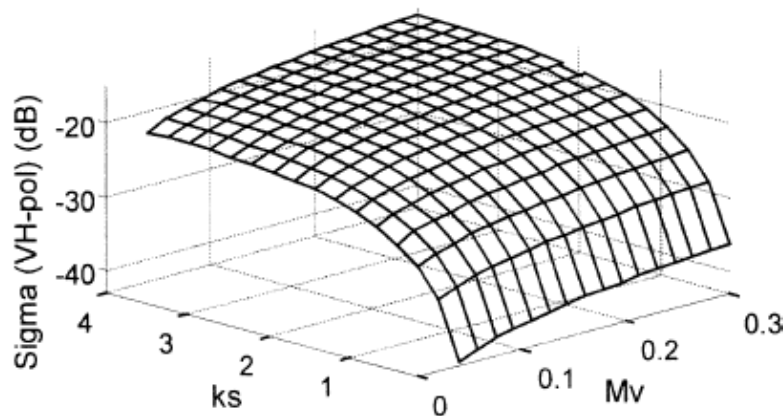
Οι πολωσιμετρικοί συντελεστές οπισθοσκέδασης σ_{vv}^o και σ_{hh}^o , μπορούν να υπολογιστούν από τον πολωσιμετρικό συντελεστή οπισθοσκέδασης σ_{vh}^o με την αναλογία όμοιων πολώσεων ρ και την αναλογία διασταυρωμένων πολώσεων q .

$$\sigma_{vv}^o = \frac{\sigma_{vh}^o}{q} \quad (7)$$

$$\sigma_{hh}^o = \frac{\sigma_{vh}^o}{q} * \rho \quad (8)$$

Το μοντέλο συμφωνεί με πειραματικές παρατηρήσεις σε ένα ευρύ διάστημα συνθηκών επιφάνειας εδάφους: $0.04 < M_v < 0.291 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $0.13 < ks < 6.98$ με εύρος γωνιών πρόσπτωσης $10^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$.

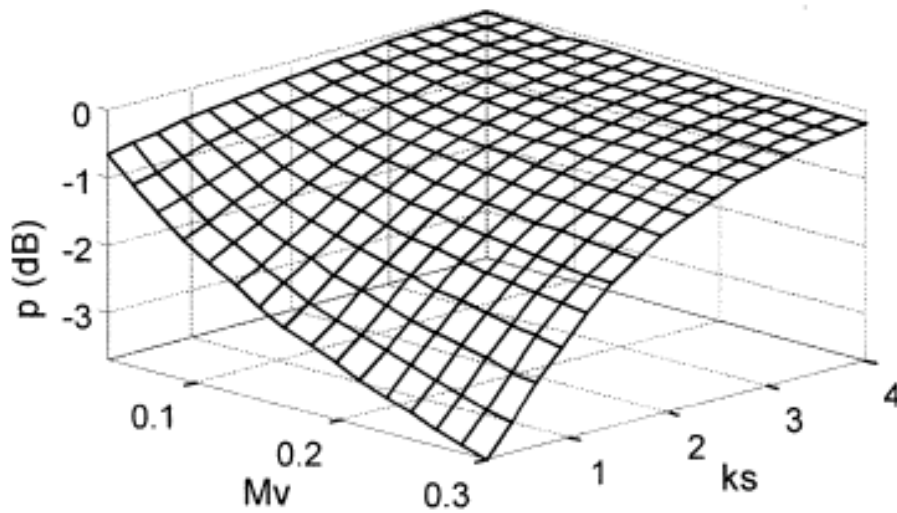
Κάθε μία από τις εξισώσεις (4) έως (6), περιέχει δύο παραμέτρους εδάφους. Ο πολωσιμετρικός συντελεστής οπισθοσκέδασης σ_{vh}^o και η αναλογία όμοιων πολώσεων ρ , εξαρτώνται από τους όρους M_v και ks . Η αναλογία διασταυρωμένης πόλωσης q , εξαρτάται από τον λόγο s/l και τον όρο $k*s$. Το παρακάτω γράφημα επιφάνειας, απεικονίζει την ευαισθησία του συντελεστή οπισθοσκέδασης σ_{vh}^o σε σχέση με την παράμετρο τραχύτητας ks και την περιεχόμενη εδαφική υγρασία M_v , με τοπική γωνία πρόσπτωσης 45° .



Γράφημα 1: Ευαισθησία του συντελεστή οπισθοσκέδασης σε σχέση με την παράμετρο τραχύτητας ks και την περιεχόμενη εδαφική υγρασία M_v , με τοπική γωνία πρόσπτωσης 45° .

Πηγή: Y. Oh, 2004

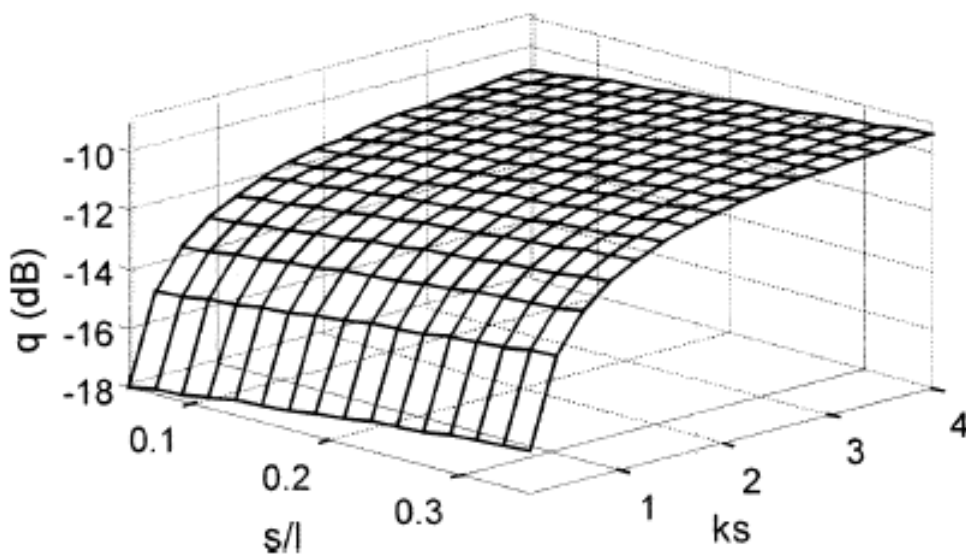
Στις 45° γωνία πρόσπτωσης, το δυναμικό εύρος του σ_{vh}^o είναι περίπου επιπλέον 6dB για $0.04 < M_v < 0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ και περίπου επιπλέον 20 dB για $0.15 < ks < 4.0$. Το γράφημα 2, δείχνει ότι η αναλογία όμοιων πολώσεων ρ , αυξάνεται προς τα 0 dB ($\sigma_{hh}^o \approx \sigma_{vv}^o$) για ιδιαίτερα στεγνά εδάφη ($M_v < 0.4 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) και για ιδιαίτερα τραχιά εδάφη ($ks > 4$). Το μοντέλο γεωμετρικής οπτικής των F.T. Ulaby et al., 2002, προβλέπει ότι ($\sigma_{hh}^o = \sigma_{vv}^o$) και $\rho = 0$ dB, για ιδιαίτερα τραχιές επιφάνειες.



Γράφημα 2: Ευαισθησία της αναλογίας όμοιων πολώσεων p σε σχέση με την παράμετρο τραχύτητας k_s και την περιεχόμενη εδαφική υγρασία M_v , με τοπική γωνία πρόσπτωσης 45° .

Πηγή: *Y. Oh, 2004*

Το γράφημα 3 δείχνει ότι η ευαισθησία της αναλογίας διασταυρωμένων πολώσεων q είναι ιδιαίτερα υψηλή στην παράμετρο τραχύτητας k_s (δυναμικό εύρος περίπου 7 dB) και πολύ χαμηλή στην επιφανειακή κλίση του εδάφους σε **μικροσκοπική κλίμακα (κλίση της εδαφικής τραχύτητας) s/l** (δυναμικό εύρος περίπου 1 dB).



Γράφημα 3: Ευαισθησία της αναλογίας διασταυρωμένων πολώσεων q σε σχέση με την παράμετρο τραχύτητας k_s και την εδαφική κλίση, με τοπική γωνία πρόσπτωσης 45° .

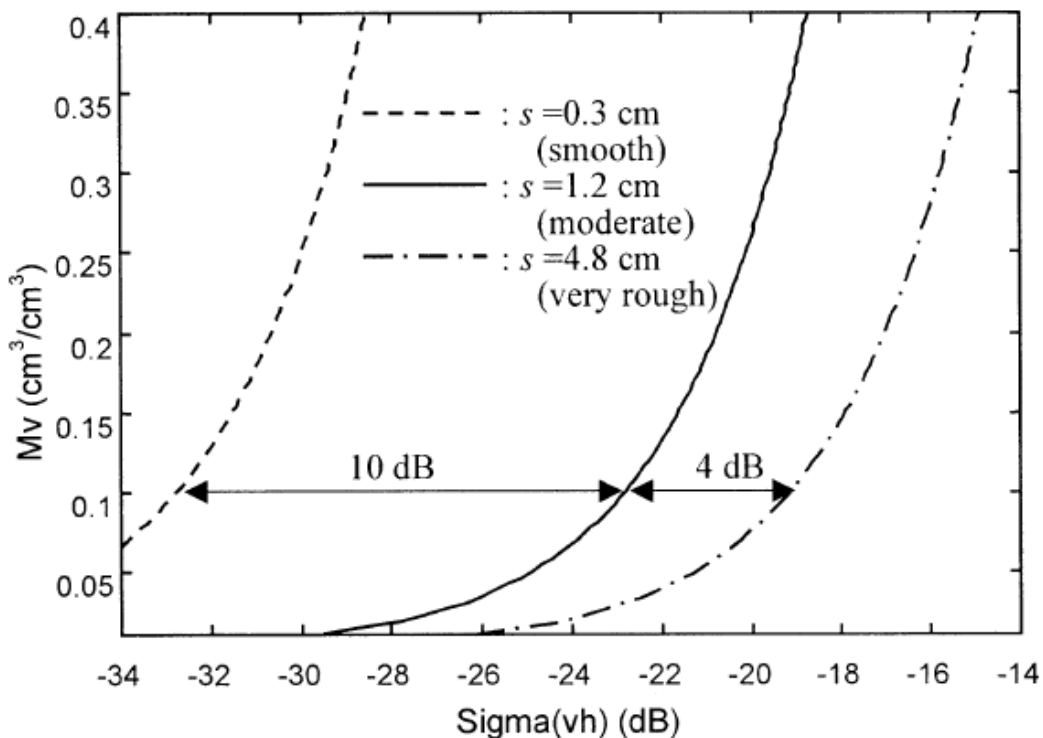
Πηγή: *Y. Oh, 2004*

Η ανάκτηση του συσχετισμού του μήκους, μπορεί να μην είναι ακριβής, λόγω της μη ευαισθησίας της αναλογίας q στην παράμετρο τραχύτητας s/l και της δυσκολίας μέτρησης του μήκους συσχέτισης στο πεδίο (Y. Oh et al., 1998). Για αυτόν τον λόγο, η αναλογία διασταυρωμένης πόλωσης q μοντελοποιήθηκε εμπειρικά αγνοώντας την συσχέτιση του μήκους, προκειμένου να εφαρμοστεί η τεχνική της αναστροφής. Η διαδικασία προσαρμογής δεδομένων ελαχίστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος, βασισμένη σε εμπειρική βάση δεδομένων ($0.04 < M_v < 0.291 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $0.13 < ks < 6.98$ και $10^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$), οδήγησε στην παρακάτω έκφραση (αντί της σχέσης (5)) με rms 1.47 dB.

$$q = \frac{\sigma_{vh}^o}{\sigma_{vv}^o} = 0.095(0.13 + \sin(1.5\theta))^{1.4} \{1 - \exp[-1.3(ks)^{0.9}]\} \quad (9)$$

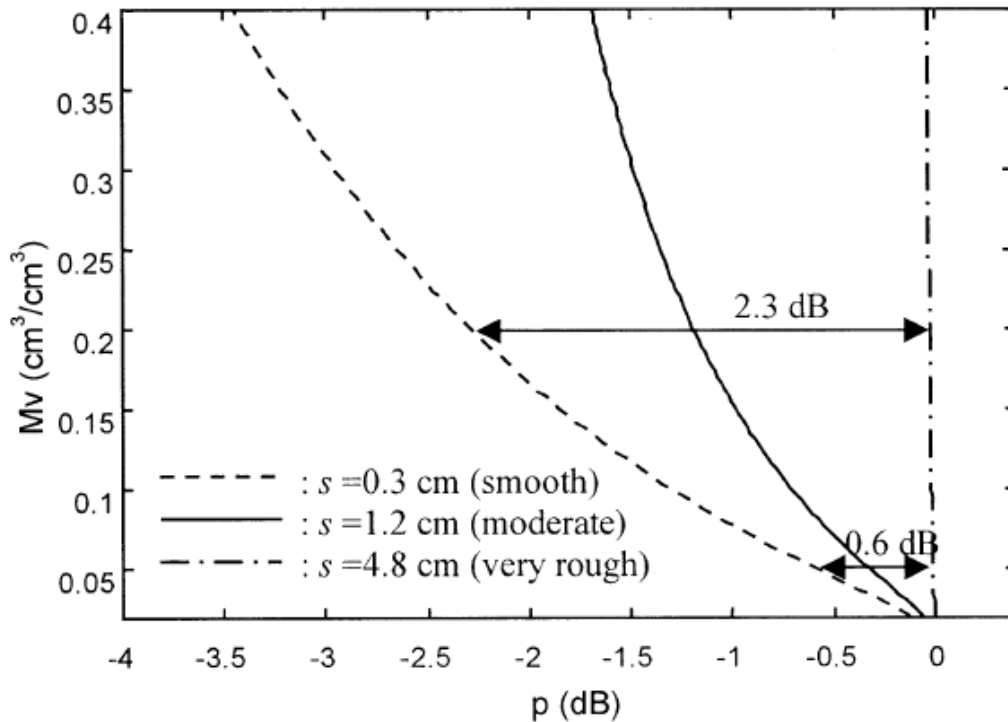
Η ανάλυση δεδομένων έδειξε ότι η ευαισθησία της μετρημένης τιμής του q στην γωνία πρόσπτωσης θ , είναι αρκετά υψηλή για τη μοντελοποίηση, ενώ στην εδαφική υγρασία είναι πολύ αδύναμη (Y. Oh et al., 1992) και για αυτό οι σχέσεις (6) και (9) δεν έχουν καμία εξάρτηση από την εδαφική υγρασία.

Τα γραφήματα 4 και 5, δείχνουν τη σχέση ανάμεσα στην περιεχόμενη υγρασία M_v και στις μετρήσεις της πολωσιμετρικής οπισθοσκέδασης σ_{vh}^o και της αναλογία όμοιων πολώσεων ρ , για τρεις διαφορετικές τιμές του s (0.3, 1.2 και 5.0 cm) στα 5.3 GHz και στις 40° . Ο ρυθμός αύξησης του M_v σε σχέση με το σ_{vh}^o , είναι το ίδιο ανεξάρτητος όπως και σε σχέση με το s , όπως φαίνεται στην σχέση (3) και στο γράφημα 4.



Γράφημα 4: Η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας M_v σε σχέση με τον συντελεστή οπισθοσκέδασης σ_{vh} (dB).

Πηγή: Y. Oh, 2004



Γράφημα 5: Η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας M_v σε σχέση με την αναλογία όμοιων πολώσεων ρ .

Πηγή: Y. Oh, 2004

Το γράφημα 4 μας πληροφορεί επιπλέον ότι η ευαισθησία του σ_{vh}^o σε σχέση με το s , μειώνεται καθώς αυξάνεται το rms του ύψους για δεδομένη περιεχόμενη εδαφική υγρασία. Για παράδειγμα, το σ_{vh}^o αυξάνεται κατά 10 dB όταν το s αυξάνεται (κατά 4 φορές) από 0.3-1.2 cm και αυξάνεται μόνο κατά 4 dB όταν το s αυξάνεται κατά ένα παράγοντα 4 φορές, από 1.2 cm σε 4.8 cm.

Στο γράφημα 5, φαίνεται ξεκάθαρα ότι η ευαισθησία της M_v στο ρ , μειώνεται απότομα όταν όσο αυξάνεται το s . Για παράδειγμα, το ρ αλλάζει μόνο κατά 0.04 dB για μια τραχιά επιφάνεια με $s=4.8$ cm και για όλο το εύρος της M_v ($0.04 < M_v < 0.4 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). Επίσης, φαίνεται ότι το δυναμικό εύρος για μια σχετικά υγρή επιφάνεια ($M_v=0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) είναι 2.3 dB, ενώ για μια ξηρή επιφάνεια είναι μόλις 0.6 dB. Οπότε, σύμφωνα με το γράφημα 5, η αναλογία όμοιων πολώσεων ρ , δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάκτηση της περιεχόμενης υγρασίας M_v σε πολύ τραχείες ή πολύ στεγνές επιφάνειες.

5.1.2. Μέθοδος Απευθείας Αναστροφής

Έχοντας εξετάσει τις πειραματικές παρατηρήσεις RADAR για επιφάνειες γυμνού εδάφους μέσα από το ημι-εμπειρικό μοντέλο οπισθοσκέδασης, είμαστε σε θέση να αντιστρέψουμε απευθείας το μοντέλο, για την ανάκτηση του rms του ύψους s και της περιεχόμενης υγρασίας M_v , από τις παρατηρήσεις των συντελεστών οπισθοσκέδασης σ_{vh}^o , σ_{hh}^o και σ_{vv}^o . Από τον συνδυασμό των σχέσεων (4) και (5), μπορεί να δημιουργηθεί ένα

διάγραμμα αναστροφής ή ένας lookup table (LUT), για συγκεκριμένη συχνότητα και τοπική γωνία πρόσπτωσης, ώστε να γίνει η ανάκτηση των s και M_v , από τις μετρημένες τιμές των

σ_{vh}^o και p . Από τις μετρημένες τιμές των σ_{vh}^o , σ_{hh}^o και σ_{vv}^o για δεδομένο έδαφος, συχνότητα και τοπική γωνία πρόσπτωσης, μπορούμε να υπολογίσουμε το rms του ύψους s και την περιεχόμενη υγρασία M_v , από διαγράμματα αναστροφής χρησιμοποιώντας την αναλογία όμοιων πολώσεων $p = \sigma_{hh}^o / \sigma_{vv}^o$ και σ_{vh}^o . Οι εκτιμήσεις των s και M_v , μπορούν να βρεθούν από τις μετρημένες τιμές των σ_{vh}^o και p , λύνοντας την (4) ως προς ks :

$$ks(\theta, M_v, \sigma_{vhm}^o) = \left[-3.125 \ln \left(1 - \frac{\sigma_{vhm}^o}{0.11 M_v^{0.7} (cos(\theta))^{2.2}} \right) \right]^{-0.556} \quad (10)$$

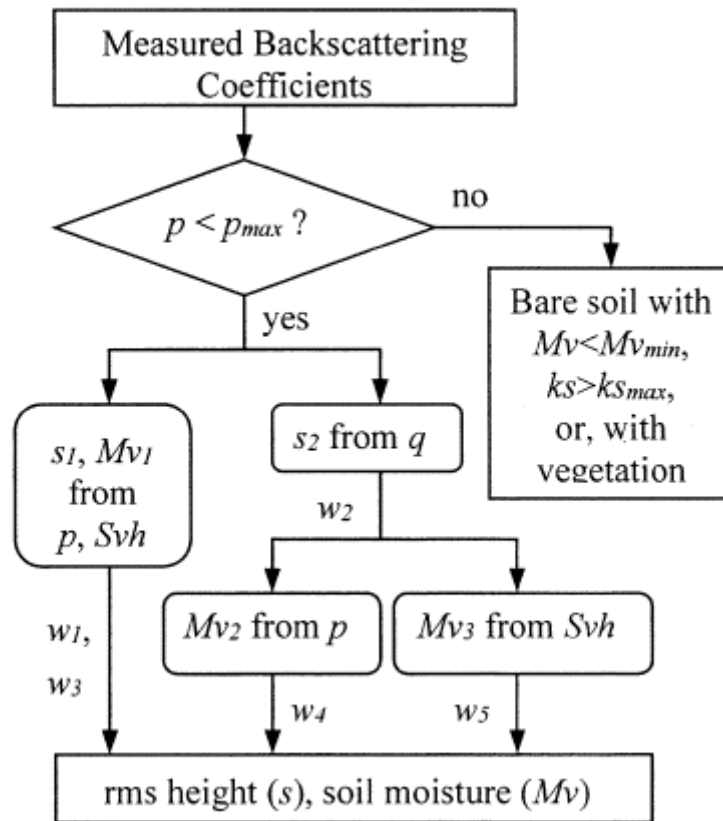
Ο όρος σ_{vhm}^o αποτελεί τη μετρημένη τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης με πόλωση vh και ο όρος M_v , την εκτίμηση της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας, η οποία πρέπει να προσδιοριστεί. Η (4) μπορεί να γραφεί και με την παρακάτω μορφή:

$$1 - \left(\frac{\theta}{90^\circ} \right)^{0.35 M_v^{-0.65}} * e^{-0.4 [ks(\theta, M_v, \sigma_{vhm}^o)]^{1.4}} - p_m = 0 \quad (11)$$

Στην παραπάνω σχέση ο όρος p_m αντιπροσωπεύει τη μετρημένη τιμή της αναλογίας όμοιων πολώσεων και η τιμή του όρου $ks(\theta, M_v, \sigma_{vhm}^o)$, δίνεται από την (10). Χρησιμοποιώντας μια αριθμητική μέθοδο εύρεσης ριζών, μπορεί να λυθεί η (11), δίνοντας τιμή για την M_v . Έχοντας μια τιμή για την M_v , μέσω της (9), μπορούμε να βρούμε την τιμή της ks , οπότε και την τιμή του rms του ύψους s , για συγκεκριμένη συχνότητα ($\kappa = 2\pi f/c$).

Η αναλογία διασταυρωμένων πολώσεων q , αξιοποιώντας τη σχέση (9), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βελτίωση της ακρίβειας της τεχνικής αναστροφής. Έχοντας μια τιμή για τον q , χρησιμοποιώντας την (9), μπορούμε να προσδιορίσουμε το ks και η περιεχόμενη υγρασία M_v , μπορεί πλέον να προσδιοριστεί από την (4), για μετρημένο σ_{vh}^o ή από την (5) για μετρημένο p .

Το διάγραμμα 6, δείχνει τον αλγόριθμο αναστροφής, για την ανάκτηση του s και M_v , από μετρήσεις συντελεστών οπισθοσκέδασης. Η τιμή της αναλογίας όμοιων πολώσεων p , πλησιάζει τα 0 dB ($(\sigma_{hh}^o = \sigma_{vv}^o)$) σε συνθήκες πολύ στεγνού ή ιδιαίτερα τραχιού εδάφους, όπως φαίνεται στα γράφηματα 2 και 5. Επιπλέον, η επιρροή της αραιάς βλάστησης, μπορεί να δώσει στον p τιμές μεγαλύτερες από 0 dB ($(\sigma_{hh}^o > \sigma_{vv}^o)$), καθώς ο σ_{hh}^o μπορεί να έχει μεγαλύτερη τιμή από τον σ_{vv}^o για μικροκυματική οπισθοσκέδαση από θόλο βλάστησης. Για τον λόγο αυτό, μόνο οι μετρήσεις των συντελεστών οπισθοσκέδασης σ_{vh}^o , σ_{hh}^o και σ_{vv}^o που ικανοποιούν τη συνθήκη $p < p_{max}$, επιλέγονται για την αναστροφή. Η μέγιστη τιμή της p_{max} , υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την μέγιστη τιμή του s (5.5 cm) και την ελάχιστη της M_v ($0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). Για παράδειγμα ο p_{max} είναι 0 dB για $f = 5.3 \text{ GHz}$ και $\theta = 10^\circ$, και -0.4 dB για $f = 1.25 \text{ GHz}$ και $\theta = 70^\circ$.



Γράφημα 6: Διάγραμμα ροής της ανάκτησης των s και M_v από μετρημένες τιμές συντελεστών οπισθοσκέδασης.
Πηγή: Υ. Oh, 2004

Εάν για τις μετρημένες τιμές των σ_{vh}^o , σ_{hh}^o και σ_{vv}^o ισχύει η συνθήκη $p < p_{max}$, οι πρωταρχικές τιμές των s (s_1) και M_v (M_{v1}), μπορούν να υπολογιστούν από τις σχέσεις (10) και (11). Μια δεύτερη εκτίμηση του s (s_2) μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (9) και υποκαθιστώντας την τιμή s_2 στις (4) και (5), λαμβάνουμε τις M_{v2} και M_{v3} . Έπειτα μπορεί να υπολογιστεί ο μέσος όρος των πολλαπλών εκτιμήσεων του rms του ύψους και της ογκομετρικής περιεχόμενης υγρασίας:

$$s = \frac{(w_1 s_1 + w_2 s_2)}{(w_1 + s_1)} \quad (12)$$

$$M_v = \frac{(w_{31} M_{v1} + w_4 M_{v2} + w_5 M_{v3})}{(w_{31} + w_4 + w_5)} \quad (13)$$

Συγκρίνοντας τους συντελεστές συσχέτισης ανάμεσα στις μετρημένες τιμές επί του πεδίου της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας και στις τιμές που προέρχονται από εκτίμηση, για διάφορους συνδυασμούς βαρών, προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες τιμές των βαρών, εμπειρικά. Οι τιμές των βαρών w_1 , w_2 , w_3 , w_4 και w_5 που δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα αναστροφής, είναι 1, 1/4, 1, 1 και 1, αντίστοιχα (Υ. Oh, 2004).

5.1.3. Αποτελέσματα-Αξιολόγηση

Για την αξιολόγηση της μεθόδου αναστροφής του μοντέλου (επιπλέον των σειρών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των εμπειρικών σχέσεων (4) και (5)), χρησιμοποιήθηκαν δύο επιπλέον σειρές πολωσιμετρικών δεδομένων, οι οποίες δεν χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία κατασκευής του μοντέλου.

- **1η Σειρά Δεδομένων:** Κατά τη διάρκεια της καμπάνιας PACRIM-2 το 2000, χρησιμοποιήθηκε το αερομεταφερόμενο JPL SAR, προκειμένου να συλλέξει πολωσιμετρικές μετρήσεις οπισθοσκέδασης διαφόρων εδαφών κοντά στο Gongju της Κορέας. Συλλέχθηκαν δεδομένα εδαφικής τραχύτητας και υγρασίας για επτά διαφορετικά πεδία γυμνών εδαφών. Το εύρος του rms του ύψους της επιφάνειας αυτών των πεδίων, κυμαινόταν από 0.72-3.0 cm και το εύρος της ογκομετρικής περιεχόμενης υγρασίας από 0.045-0.35 cm³/cm³. Οι τοπικές γωνίες πρόσπτωσης ποίκιλλαν από 42° έως 58°.
- **2η Σειρά Δεδομένων:** Οι συντελεστές οπισθοσκέδασης επιφανειών γυμνού εδάφους, μετρήθηκαν από συστήματα μέτρησης πολωσιμετρικής οπισθοσκέδασης με συχνότητα 2.1 GHz και τοπικές γωνίες πρόσπτωσης 20°,30°,40°,50° και 60° στο Πανεπιστήμιο Hongik, στη Σεούλ της Κορέας, το 1999. Οι μετρημένες παράμετροι επιφανείας ήταν $s=0.52$ cm, $l=4.07$ cm και $M_v=0.03$ cm³/cm³.

•

Βρέθηκε ότι το 25% των μετρήσεων της βάσης δεδομένων, δεν ικανοποιεί τη συνθήκη $p < p_{\max}$ και πολλές από αυτές τις μετρήσεις έχουν τιμή p μεγαλύτερη από 0 dB. Ο πρώτος λόγος που μπορεί να συμβαίνει αυτό, είναι ότι πάνω από το γυμνό έδαφος μπορεί να υπάρχει θόλος βλάστησης, ο οποίος προκαλεί μεγαλύτερες τιμές του σ_{hh}^o από αυτές του σ_{vv}^o και συνεπώς $p \geq 0$ dB. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι οι μετρήσεις αυτές μπορεί να αντιστοιχούν σε ιδιαίτερα τραχιές επιφάνειες, στις οποίες σύμφωνα με το μοντέλο γεωμετρικής οπτικής (F.T. Ulaby et al., 2002) ($\sigma_{hh}^o = \sigma_{vv}^o$) και $p=0$ dB. Αναλογιζόμενοι την ακρίβεια μέτρησης των ± 5 dB, η παράμετρος εδαφικής τραχύτητας k_s , θα πρέπει να είναι κάτω από 3.5 cm, για την καλύτερη απόδοση του μοντέλου αναστροφής. Ο τρίτος λόγος είναι ότι όπως φάνηκε και από το διάγραμμα 2, η μέτρηση της αναλογίας p που προήλθε από μια ιδιαίτερα στεγνή επιφάνεια, πλησιάζει τα 0 db. Οπότε σύμφωνα με την ακρίβεια των ± 5 dB, η αναλογία p θα πρέπει να είναι μικρότερη από -0.5 db. Όταν η ελάχιστη τιμή του k_s ($=0.1$) τοποθετείται στην (4), εξάγεται η συνθήκη $M_v > [-6,286/\ln(\theta/90)]^{-1.538}$. Για παράδειγμα $M_v > 0.068$ cm³/cm³ για $\theta=30^\circ$ και $M_v > 0.026$ cm³/cm³ για $\theta=50^\circ$. Ο τέταρτος λόγος είναι ότι η αναλογία p είναι 0 db στις 0°. Αν η μέγιστη τιμή του M_v ($=0,3$) και η ελάχιστη του k_s ($=0.1$) τοποθετηθούν στην (4), η γωνία πρόσπτωσης θα πρέπει να είναι πάνω από 6° ώστε $p \leq -0.5$ dB.

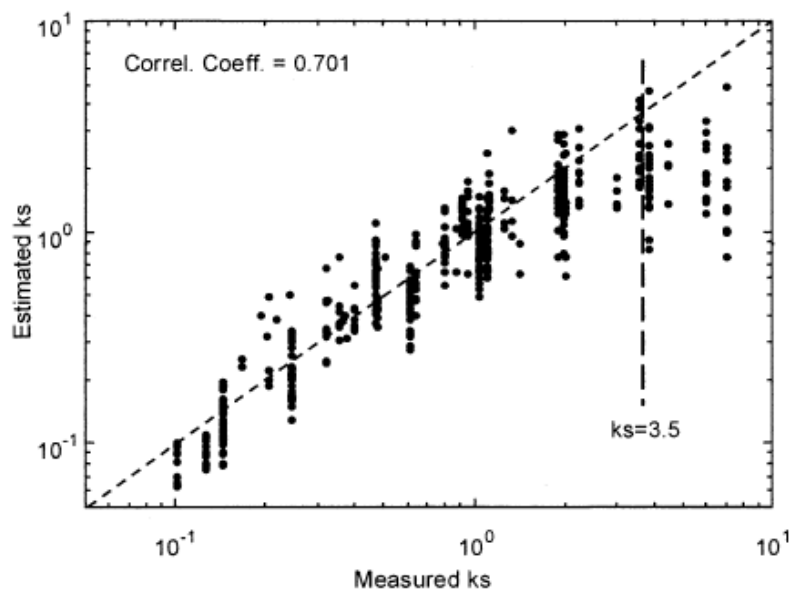
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι από τον συνολικό αριθμό 171 δεδομένων τα οποία δεν ικανοποίησαν τη συνθήκη $p < p_{\max}$, τα 57 ήταν από πολύ τραχιές επιφάνειες και ($k_s > 0.35$) και τα 56 από πολύ στεγνές επιφάνειες ($M_v > [-6,286/\ln(\theta/90)]^{-1.538}$). Οι λόγοι που τα υπόλοιπα δεδομένα δεν ικανοποίησαν τη συνθήκη, μπορεί να είναι η επιρροή αραιής

βλάστησης, λάθη στις μετρήσεις οπισθοσκέδασης, λάθη στις επίγειες μετρήσεις των οργάνων και σε λάθη του μοντέλου.

Το γράφημα 7 δείχνει τη σύγκριση μεταξύ των τιμών του ks που προέρχονται από εκτίμηση και μεταξύ αυτών που προέρχονται από επί τόπου μετρήσεις, για 482 δεδομένα σημείων που ικανοποιούν τη συνθήκη $\rho < \rho_{\max}$. Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των μετρημένων τιμών και των τιμών που προέρχονται από εκτίμηση, είναι 0.701. Η συμφωνία μεταξύ μετρημένων και τιμών που προέρχονται από εκτίμηση είναι αρκετά καλή για $ks < 3.5$. Οι μετρημένες τιμές διαφέρουν από αυτές που προέρχονται από εκτίμηση, όταν $ks > 0.35$, όπως φαίνεται και στο γράφημα 6, εξαιτίας του ότι οι τιμές του συντελεστή οπισθοσκέδασης δεν έχουν ιδιαίτερες διαφορές για $ks > 3.5$, όπως φαίνεται και στο γράφημα 1. Το εύρος του rms του ύψους s για φυσικές επιφάνειες, είναι $0.4\text{ cm} \leq s \leq 4.0\text{ cm}$, όπου $s = 4\text{ cm}$ αναφέρεται σε οργωμένες επιφάνειες. Συνεπώς, όλες οι φυσικές επιφάνειες βρίσκονται σε στο εύρος $ks < 3.5$ για $f < 4.2\text{ GHz}$.

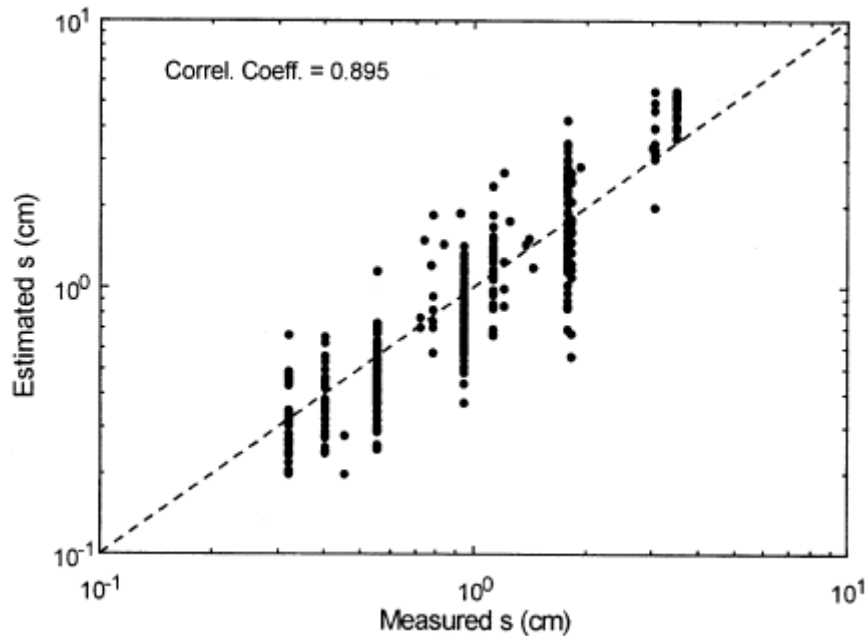
Το γράφημα 7 δείχνει μια σύγκριση ανάμεσα στις τιμές του rms του ύψους που εκτιμήθηκαν από την αναστροφή του μοντέλου και αυτών που προήλθαν από επί τόπου μετρήσεις, για 414 δεδομένα σημείων που ικανοποιούν τη σχέση $ks < 0.35$. Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των μετρημένων τιμών και αυτών που εκτιμήθηκαν, είναι 0.0895.

Το γράφημα 8, δείχνει τα αποτελέσματα της ογκομετρικής περιεχόμενης υγρασίας M_v , για δεδομένα με $ks < 3.5$. Οι λόγοι των διαφορών που διαπιστώνονται, μεταξύ μετρημένων τιμών και αυτών που προέρχονται από εκτίμηση, είναι οι ατέλειες του ημι-εμπειρικού μοντέλου οπισθοσκέδασης που χρησιμοποιήθηκε στην τεχνική αναστροφής, οι μη ακριβείς μετρήσεις οπισθοσκέδασης λόγω λαθών της βαθμονόμησης του συστήματος RADAR και μη ακριβείς επί τόπου μετρήσεις της επιφανειακής τραχύτητας και εδαφικής υγρασίας.

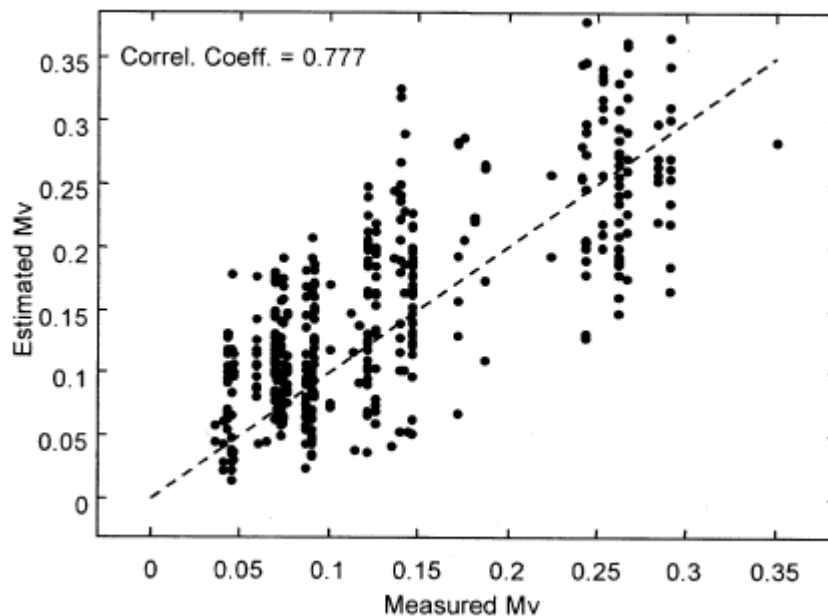


Γράφημα 7: Σύγκριση ανάμεσα στις μετρημένες τιμές και στις τιμές που προέρχονται από εκτίμηση, της επιφανειακής παραμέτρου ks .

Πηγή: *Y. Oh, 2004*



Γράφημα 8: Σύγκριση ανάμεσα στις μετρημένες τιμές και στις τιμές που προέρχονται από εκτίμηση, του rms του ύψους επιφανείας.
 Πηγή: Y. Oh, 2004



Γράφημα 9: Σύγκριση ανάμεσα στις μετρημένες τιμές και στις τιμές που προέρχονται από εκτίμηση, της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας.
 Πηγή: Y. Oh, 2004

5.2. Θεωρητικό Μοντέλο IEM

Το μοντέλο IEM (Theoretical Integral Equation), προτάθηκε από τους Fung et al. το 1992. Όπως όλα τα θεωρητικά μοντέλα, έχει ισχυρό υπόβαθρο από την επιστήμη της Φυσικής και απαιτεί πολλές παραμέτρους εισόδου. Υπολογίζει τον συντελεστή οπισθοσκέδασης, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του συστήματος RADAR, καθώς και τα χαρακτηριστικά

του εδάφους. Είναι ένα από τα πιο δημοφιλή μοντέλα για την εφαρμογή διαδικασιών αναστροφής, προκειμένου να γίνει εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας και των παραμέτρων τραχύτητας. Έχει κατασκευαστεί για εφαρμογή σε γυμνά εδάφη, όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε εδάφη με αραιή βλάστηση (Fung, 1994; Fung & Pan, 1986; Fung et al., 1992).

5.2.1. Εξισώσεις Μοντέλου

Το συγκεκριμένο μοντέλο, συσχετίζει την τιμή της οπισθοσκέδασης του συστήματος RADAR, με την περιεχόμενη εδαφική υγρασία και την εδαφική τραχύτητα, οι οποίες αποτελούν τις άγνωστες μεταβλητές.

Το μοντέλο IEM, είναι εφαρμόσιμο σε ένα μεγάλο εύρος τιμών εδαφικής τραχύτητας. Εκφράζεται από την παρακάτω σχέση (οι δείκτες p και q αντιστοιχούν στην πόλωση μετάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού παλμού και στην πόλωση λήψης του, αντίστοιχα):

$$\sigma_{pq}^0 = \frac{k^2}{2} \exp(-2k_z^2) \sigma^2 \sum_{n=1}^{\infty} \sigma^{2n} |I_{pq}^n|^2 \frac{W^n(-2K_x, 0)}{n!} \quad (14)$$

Όπου :

$$I_{pq}^n = (2k_z)^n f_{pq} \exp(-k_z^2 \sigma^2) + \frac{\kappa_z^n [f_{pq}(-k_x, 0) + f_{pq}(k_x, 0)]}{2} \quad (15)$$

$$f_{vv} = \frac{2R_1}{\cos(\theta)} \quad (16)$$

$$f_{HH} = \frac{2R_2}{\cos(\theta)} \quad (17)$$

$$W^n(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi} \iint p^n(x, y) \exp(jk_x x + jk_y y) dx dy \quad (18)$$

$$f_{vv}(-k_x, 0) + f_{vv}(k_x, 0) = \frac{2 \sin(\theta)^2 (1+R_1)^2}{\cos(\theta)} \left[\left(1 - \frac{1}{\epsilon_r}\right) + \frac{\mu_r \epsilon_r - \sin(\theta)^2 - \epsilon_r \cos(\theta)^2}{\epsilon_r^2 \cos(\theta)^2} \right] \quad (19)$$

$$f_{HH}(-k_x, 0) + f_{HH}(k_x, 0) = \frac{2 \sin(\theta)^2 (1+R_2)^2}{\cos(\theta)} \left[\left(1 - \frac{1}{\mu_r}\right) + \frac{\mu_r \epsilon_r - \sin(\theta)^2 - \mu_r \cos(\theta)^2}{\mu_r^2 \cos(\theta)^2} \right] \quad (20)$$

Η μεταβλητή k , αντιστοιχεί στον αριθμό του κύματος RADAR, k_z είναι ίσο με το $k \cos(\theta)$, θ είναι η γωνία πρόσπτωσης, σ είναι η τυπική απόκλιση του ύψους του εδάφους, ϵ_r είναι η σχετική ορατότητα (διηλεκτρική σταθερά) του εδάφους, μ_r είναι η σχετική διαπερατότητα και R_1 και R_2 είναι ο οριζόντιος και κάθετος συντελεστής πόλωσης της αντανάκλασης Fresnel.

$W^n(k_x, k_y)$ είναι ο μετασχηματισμός Fourier για τη νιοστή της συνάρτησης επιφανειακής συσχέτισης. Η συνάρτηση επιφανειακής συσχέτισης $\rho(x, y)$ με εκθετική κατανομή, δίνεται

από τη σχέση $p(x,y)=\exp\left[-\frac{(|x|+|y|)}{L}\right]$, ενώ η ίδια συνάρτηση με κατανομή Gauss, δίνεται από τη σχέση $p(x,y)=\left[-\frac{(x^2+y^2)}{L^2}\right]$. Το L στις προηγούμενες σχέσεις, είναι το μήκος συσχέτισης (S.Khabazan et. al., 2013).

5.3. Ημι-εμπειρικό Μοντέλο Dubois

Το μοντέλο προτάθηκε από τους Dubois et al., το 1995. Είναι ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο, το οποίο συσχετίζει τους συντελεστές οπισθοσκέδασης σ_{HH} και σ_{VV} , με τις παραμέτρους του συστήματος RADAR (μήκος κύματος, γωνία πρόσπτωσης, συχνότητα), την επιφανειακή τραχύτητα και την διηλεκτρική σταθερά. Η επιτυχία του συγκεκριμένου μοντέλου, έχει επιβεβαιωθεί από πολλούς ερευνητές.

5.3.1. Εξισώσεις Μοντέλου

Το μοντέλο Dubois, αποτελείται από δύο σχέσεις, μια για κάθε έναν από τους συντελεστές οπισθοσκέδασης σ_{HH} και σ_{VV} :

$$\sigma_{HH}^o = 10^{-2.75} \left(\frac{\cos(\theta)}{\sin(\theta)} \right)^{1.5} 10^{0.028\varepsilon_r \tan(\theta)} (\kappa \cdot h_{rms} \sin(\theta))^{1.4} \lambda^{0.7} \quad (21)$$

$$\sigma_{VV}^o = 10^{-2.35} \left(\frac{\cos(\theta)}{\sin(\theta)} \right)^3 10^{0.046\varepsilon_r \tan(\theta)} (\kappa \cdot h_{rms} \sin(\theta))^{1.1} \lambda^{0.7} \quad (22)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, η μεταβλητή θ αντιστοιχεί στη γωνία πρόσπτωσης, το ε_r στη διηλεκτρική σταθερά, το h_{rms} στην τυπική απόκλιση του ύψους της επιφανείας και το λ ($\lambda=2\pi/\kappa$) στο μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού παλμού, σε cm.

Το μοντέλο έχει βέλτιστα αποτελέσματα σε γυμνά εδάφη με $kh_{rms} \leq 2.5$, $mv \leq 35\%$ και $\theta \geq 30^\circ$ (Dubois et al. 1995).

5.4. Σύγκριση μοντέλων Oh, IEM και Dubois

Τα μοντέλα Oh, IEM και Dubois, αποτελούν τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα οπισθοσκέδασης, για την εκτίμηση της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας, από δεδομένα RADAR. Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες στο παρελθόν από ερευνητές, προκειμένου να αναδειχθεί το ακριβέστερο μοντέλο, ανάλογα με την περιοχή μελέτης και τα δεδομένα επεξεργασίας. Τα αποτελέσματα αυτών των μελετών, είναι πολλές φορές αντιφατικά.

Οι S. Khabazan et al. (2013), αξιολόγησαν τα μοντέλα Oh, IEM και Dubois, χρησιμοποιώντας δεδομένα Airborn Synthetic Aperture Radar (AIRSAR), των καναλιών L και C, σε περιοχές των ΗΠΑ με διάφορα είδη φυτοκάλυψης και σε διάφορα βάθη. Τα

δεδομένα της μελέτης συλλέχθηκαν στις 10 Ιουνίου του 2003. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο Dubois τείνει να υπερεκτιμά την απόκριση του RADAR και στα δύο κανάλια, αλλά τα μοντέλα IEM και Oh συχνά υπερεκτιμούν την απόκριση του RADAR στο κανάλι L και την υποεκτιμούν στο κανάλι C. Τα καλύτερα αποτελέσματα για όλα τα μοντέλα, προέκυψαν σε βάθος εδάφους 0-3 cm και σε περιοχές με κανονικοποιημένο δείκτη βλάστησης $NDVI \leq 0.2$.

Οι N.Baghdadi et al. (2006), χρησιμοποίησαν δεδομένα SAR των δορυφόρων ERS-2, RADARSAT-1 και ASAR στο κανάλι C, πάνω από επτά διαφορετικές περιοχές σε Καναδά και Γαλλία, ανάμεσα στα έτη 1995 και 2004. Οι περιοχές αυτές αποτελούνταν από αγροτικές εκτάσεις, καλλιέργειας σιταριού και καλαμποκιού. Τα αποτελέσματα της μελέτης, έδειξαν ότι:

- το μοντέλο Oh προσομοιώνει σωστά την αναλογία όποιων πολώσεων p , όμως υπερεκτιμά την αναλογία διασταυρωμένων πολώσεων q . Επιπλέον, υποεκτιμά τον συντελεστή οπισθοσκέδασης σ_{HN} των εικόνων ASAR, κατά περίπου 1.5 dB, για ομαλές επιφάνειες ($rms < 1cm$), διαπίστωση η οποία φαίνεται να αυξάνεται με τη μείωση του rms του ύψους επιφανείας.
- το μοντέλο Dubois υποεκτιμά τον συντελεστή οπισθοσκέδασης για επιφάνειες με χαμηλή τραχύτητα (5 dB για $rms < 0.6 cm$) και τον υπερεκτιμά σε επιφάνειες με τιμές τραχύτητας πάνω από 1.6 cm (15 dB σε πόλωση HH για rms ανάμεσα 4 και 5 cm). Σε επιφάνειες ενδιάμεσης τραχύτητας (rms ανάμεσα σε 0.6 και 1.6 cm), το μοντέλο αναπαράγει πιστά το σήμα RADAR. Επιπλέον, για τιμές εδαφικής υγρασίας, μικρότερες από 30%, το μοντέλο υποεκτιμά τον μετρημένο συντελεστή οπισθοσκέδασης.
- Το μοντέλο IEM συχνά υποεκτιμά τον συντελεστή οπισθοσκέδασης σ_{HH} (2.9 dB κατά μέσο όρο), ενώ για τον συντελεστή οπισθοσκέδασης δεδομένων που αντιστοιχούν σε εδαφική υγρασία μεγαλύτερη του 30%, παρατηρήθηκαν έντονες διακυμάνσεις στα δεδομένα προσομοίωσης (ανάμεσα σε -10db και +13dB). Το σφάλμα έχει ίδιο μοτίβο ποικιλίας τιμών στις πολώσεις HH και VV, για όλες τις τιμές rms ύψους επιφανείας, εδαφικής υγρασίας και γωνίας πρόσπτωσης.

Οι N.Baghdadi et al. (2006), καταλήγουν ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την μοντελοποίηση του συντελεστή οπισθοσκέδασης.

5.5. Αλγόριθμος SMOSAR

Ο Αλγόριθμος SMOSAR (Soil MOisture retrieval from multi-temporal SAR-data), αναπτύχθηκε με σκοπό την εκμετάλλευση της προσεχούς, μέχρι τότε, αποστολής των δορυφόρων Sentinel-1. Τα πλεονεκτήματα της συνεχόμενης και παντός καιρού παγκόσμιας κάλυψης ημέρας και νύχτας με χρονική διακριτική ικανότητα 6 ημερών (ενότητα 2.2.4 και 3.3), δημιούργησαν νέες προοπτικές για την επιστημονική κοινότητα, στον τομέα της ανάκτησης της εδαφικής υγρασίας από δεδομένα RADAR. Ο αλγόριθμος SMOSAR, κατασκευάστηκε με σκοπό την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της αποστολής Sentinel-1, για την δημιουργία υπηρεσιών παρακολούθησης της περιεχόμενης εδαφικής

υγρασίας σε υψηλή χωρική (100-1000m) και χρονική ανάλυση. Κατασκευάστηκε από τους A. Balenzano, et al., το 2012.

Η ισχύς του αλγορίθμου, βρίσκεται στη δυνατότητα της παρακολούθησης της εδαφικής υγρασίας των γεωργικών εδαφών, κατά τη διάρκεια της περιόδου βλάστησης, τουλάχιστον στις καλλιέργειες οι οποίες δεν κυριαρχούνται από πολλαπλή οπισθοσκέδαση του σήματος RADAR, όπως οι καλλιέργειες δημητριακών. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντιστροφή των προσωρινών αλλαγών των τιμών οπισθοσκέδασης του σήματος RADAR, αντί των απόλυτων τιμών της (A. Balenzano et al., 2011). Πράγματι, υπό την προϋπόθεση της ύπαρξης πυκνών χρονολογικών σειρών N εικόνων SAR (χρονική διακριτική ικανότητα 6-12 ημερών), η αλλαγή στις τιμές οπισθοσκέδασης μεταξύ δύο διαδοχικών καταγραφών, κυρίως οφείλεται στην προσωρινή αλλαγή της εδαφικής υγρασίας, η οποία χαρακτηρίζεται από χρονική κλίμακα λίγων ημερών και όχι με τις χρονικές μεταβολές της βιομάζας της βλάστησης ή του θόλου της καλλιέργειας ή την επιφανειακή τραχύτητα. Αυτοί οι παράγοντες, επηρεάζουν τις τιμές οπισθοσκέδασης, όμως οι αλλαγές τους χαρακτηρίζονται από χρονική κλίμακα λίγων εβδομάδων, σε αντίθεση με τη χρονική κλίμακα αλλαγών της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας. Στον αλγόριθμο SMOSAR, υιοθετείται η προσέγγιση ότι οι αλλαγές στις τιμές οπισθοσκέδασης, σε μικρή χρονική κλίμακα, οφείλονται μόνο σε αλλαγές της εδαφικής υγρασίας. Αυτή η προσέγγιση απλοποιεί την ανάκτηση της εδαφικής υγρασίας και επιτρέπει τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου, όπως απαιτείται από τους χρονικούς περιορισμούς για ένα προϊόν σχεδόν πραγματικού χρόνου.

5.5.1. Δεδομένα

Η αξιολόγηση του αλγορίθμου, πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την πλούσια και καλά τεκμηριωμένη βάση δεδομένων, η οποία δημιουργήθηκε στα πλαίσια:

- του προγράμματος AgriSAR 2006, για το αγρόκτημα Görmin στην περιοχή DEMMIN της Γερμανίας.
- του προγράμματος AgriSAR 2009, για την Ολλανδική επαρχία Flevoland.
- των προγραμμάτων ENVISAT 2003 και 2005, για την περιοχή Matera της Ιταλίας.

Οι παραπάνω περιοχές, χαρακτηρίζονται από πληθώρα σημαντικών αγρονομικών και τοπογραφικών χαρακτηριστικών.

Τα δεδομένα SAR πάνω από την περιοχή του Görmin, αποτελούνται από 12 εικόνες ASAR καθοδικής τροχιάς, με εναλλασσόμενη πόλωση (12 εικόνες με πόλωση HH και 3 εικόνες με πόλωση VV), οι οποίες αποκτήθηκαν με γωνία πρόσπτωσης μεταξύ 20° και 34°. Η μέση χρονική διακριτική ικανότητα των εικόνων, είναι 7 ημέρες από τον Μάιο έως τον Ιούλιο του 2006.

Τα δεδομένα AgriSAR του 2009 πάνω από την επαρχία Flevoland, περιλαμβάνουν προϊόντα σε πολικότητες HH/VV και VV/HH του Sentinel-1 της λειτουργίας Interferometric Wide Mode (ενότητα 2.2.4), τα οποία προσομοιώνονται από 16 εικόνες RADARSAT-2, ανοδικής τροχιάς. Η τοπική γωνία πρόσπτωσης των δεδομένων, κυμαίνεται από 24° έως 33° και η χρονική διακριτική ικανότητα, είναι 8 ημέρες από τον Ιούνιο έως τον Σεπτέμβριο.

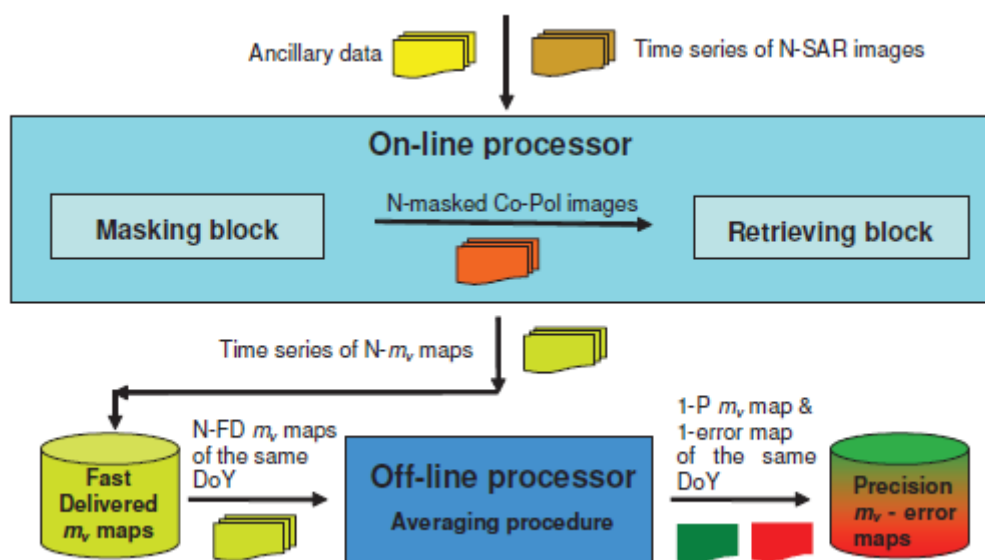
Τα δεδομένα SAR πάνω από την περιοχή Matera, αποτελούνται από 20 εικόνες ASAR καθοδικής τροχιάς, με εναλλασσόμενη πόλωση (12 εικόνες με πόλωση HH και 20 με VV). Η τοπική γωνία πρόσπτωσης σε αυτά τα δεδομένα, κυμαίνεται από 23° έως 38° και με χρονική διακριτική ικανότητα 7 ημερών από τον Σεπτέμβριο του 2003 έως τον Δεκέμβριο του 2005.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι χρονοσειρές ASAR των περιοχών Görmin και Matera, περιλαμβάνουν αρκετά χρονικά κενά και συχνά δεν περιλαμβάνουν και τις δύο πολικότητες VV και HH. Κατά συνέπεια, στην περίπτωση των εικόνων αυτών των περιοχών, έχουν επεξεργαστεί χωριστά ομάδες 4 εικόνων SAR.

Για την αξιολόγηση των προϊόντων εκτίμησης εδαφικής υγρασίας, απαιτούνται χρονικά και χωρικά κατανεμημένα δεδομένα. Οι παρατηρήσεις εδαφικής υγρασίας που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των δεδομένων SMOSAR, προήλθαν από υδρολογικό μοντέλο (V.R.N Pauwels et al., 1999) και βαθμονομήθηκαν χρησιμοποιώντας επί τόπου μετρήσεις. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτός ο τρόπος αξιολόγησης, είναι ότι οι επί τόπου μετρήσεις είναι διαθέσιμες μόνο για συγκεκριμένες ημερομηνίες, οι οποίες δεν συμπίπτουν με τις ημέρες των αποκτηθέντων δεδομένων SAR και αφορούν περιορισμένο αριθμό των επιλεγμένων τοποθεσιών δοκιμής. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης, είναι η δυνατότητα αξιολόγησης προϊόντων εδαφικής υγρασίας, τα οποία αφορούν μεγάλες περιοχές και έχουν διάφορες χωρικές αναλύσεις, επεκτείνοντας με αυτόν τον τρόπο τη σύγκριση (μεταξύ τιμών που προέρχονται από εκτίμηση και μετρημένων τιμών εδαφικής υγρασίας) πέρα από τον περιορισμένο αριθμό των επί τόπου μετρήσεων σημειακής κλίμακας.

5.5.2. Περιγραφή Αλγορίθμου

Ο Αλγόριθμος SMOSAR μετατρέπει τις πυκνές χρονοσειρές N εικόνων SAR του καναλιού C, διπλής (π.χ HH & HV ή VV & VH) ή μονής πόλωσης (π.χ HH ή VV), σε χρονική σειρά N χαρτών εδαφικής υγρασίας, αγροτικών περιοχών.



Εικόνα 27: Αρχιτεκτονική του αλγορίθμου SMOSAR.

Πηγή: A. Balenzano, et al., 2012.

Εκτός από τις χρονοσειρές εικόνων SAR, απαιτούνται και βοηθητικά δεδομένα, όπως πληροφορίες κάλυψης γης και εδαφικής υφής. Ο αλγόριθμος αποτελείται από δύο κύριους επεξεργαστές: off-line και on-line επεξεργαστής. Ο επεξεργαστής on-line παρέχει χάρτες εδαφικής υγρασίας, οι οποίοι αναφέρονται ως Fast Delivered (FD) προϊόντα σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Ο επεξεργαστής off-line απαιτεί επιπρόσθετα δεδομένα SAR, προκειμένου να εκτελεί εκτιμήσεις μέσων όρων με την πάροδο του χρόνου και σχετικών σφαλμάτων συγκεκριμένων ημερομηνιών, καθώς και να παράγει προϊόντα χαρτών ακριβείας (Precision, P) και χαρτών σφάλματος εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του on-line επεξεργαστή, είναι :

- Το μπλοκ κάλυψης (masking block), το οποίο καλύπτει (μέρος ή ολόκληρες) τις εικόνες SAR όμοιας πόλωσης, οι οποίες απεικονίζουν περιοχές όπου δεν μπορεί να υλοποιηθεί ο αλγόριθμος για την ανάκτηση της εδαφικής υγρασίας (π.χ περιοχές με πολλαπλή οπισθοσκέδαση).
- Το μπλοκ ανάκτησης , το οποίο χρησιμοποιεί N καλυμμένες (masked) εικόνες όμοιας πόλωσης, για την παραγωγή N FD χαρτών εδαφικής υγρασίας.

Το μπλοκ κάλυψης (masking block) δουλεύει σε επίπεδο εικονοστοιχείου και βασίζεται σε ένα κατώφλι, χρησιμοποιώντας δεδομένα SAR διασταυρωμένης πόλωσης. Το μπλοκ ανάκτησης λειτουργεί σε γεωργικές περιοχές ή περιοχές με αραιή βλάστηση και αντιστρέφει τις προσωρινές αλλαγές της οπισθοσκέδασης του RADAR, υπό την προϋπόθεση ότι οι αλλαγές σε σύντομο χρονικό διάστημα, οφείλονται μόνο σε αλλαγές της εδαφικής υγρασίας. Τελικώς, ο on-line επεξεργαστής εκτελεί ένα χωρικό μέσο όρο στους χάρτες ανάκτησης της εδαφικής υγρασίας, με σκοπό τη μείωση της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, ανάμεσα στις τιμές παρατήρησης και στις τιμές ανάκτησης της εδαφικής υγρασίας.

Υπό την προϋπόθεση ότι ο αλγόριθμος λειτουργεί για μια μακρά περίοδο, θα πρέπει να είναι διαθέσιμη χρονοσειρά M εικόνων, με μεγαλύτερο αριθμό εικόνων από τη χρονοσειρά των επιθυμητών N χρονικών στιγμών, εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας. Για παράδειγμα εάν ο χρήστης επιθυμεί την κατασκευή N=4 χαρτών εδαφικής υγρασίας (έναν για κάθε χρονική στιγμή N), θα πρέπει να έχει στη διάθεση του μεγαλύτερη χρονοσειρά π.χ M=5 αριθμού εικόνων, για την εξασφάλιση της ύπαρξης 2 διαδοχικών καταγραφών και τη λειτουργία του αλγορίθμου. Η χρονοσειρά M εικόνων επεξεργάζεται σε M-N+1 (π.χ 5-4+1=2) ομάδες από N (π.χ N=4 εικόνες), με αλληλοεπικάλυψη. Κάθε ομάδα δημιουργείται από την προηγούμενη της, με μετατόπιση προς τα μπροστά, μιας εικόνας. Ως αποτέλεσμα, μια γενική εικόνα συγκεκριμένης ημερομηνίας, επεξεργάζεται N φορές και στη συνέχεια N συσχετισμένοι αλλά όχι ταυτόσημοι χάρτες FD εδαφικής υγρασίας της ίδιας ημερομηνίας, αποκτώνται σαν έξοδο.

Ο επεξεργαστής off-line μετατρέπει τους N FD συσχετισμένους χάρτες εδαφικής υγρασίας, οι οποίοι αναφέρονται στην ίδια ημερομηνία, σε έναν χάρτη ακριβείας (P) και στον αντίστοιχο χάρτη σφάλματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης, σε επίπεδο εικονοστοιχείου. Η συγκεκριμένη διαδικασία για την παραγωγή του τελικού χάρτη εδαφικής υγρασίας, ακολουθείται καθώς μέσα από αυτή

αναμένεται καλύτερη ακρίβεια. Επιπλέον, η παραγωγή του χάρτη τυπικής απόκλισης μπορεί να αποτελέσει ένα πρόσθετο επίπεδο πληροφορίας, χρήσιμο για την παροχή μιας εσωτερικής αξιολόγησης της ποιότητας των χαρτών εδαφικής υγρασίας. Πιο συγκεκριμένα, μια χαμηλή τιμή τυπικής απόκλισης εικονοστοιχείου (π.χ ανάμεσα σε 0 και 3%), υποδηλώνει ότι οι συνθήκες των υποθέσεων των αλγορίθμων ικανοποιήθηκαν και ως εκ τούτου, η εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας, θεωρείται αξιόπιστη. Αντίθετα, μια υψηλή τιμή εικονοστοιχείου, σημαίνει μια ή περισσότερες αλγοριθμικές υποθέσεις, δεν ικανοποιούνται για αυτό το εικονοστοιχείο. Ενδιάμεσες τιμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μια ένδειξη αξιοπιστίας της εκτίμησης για την εδαφικής υγρασίας.

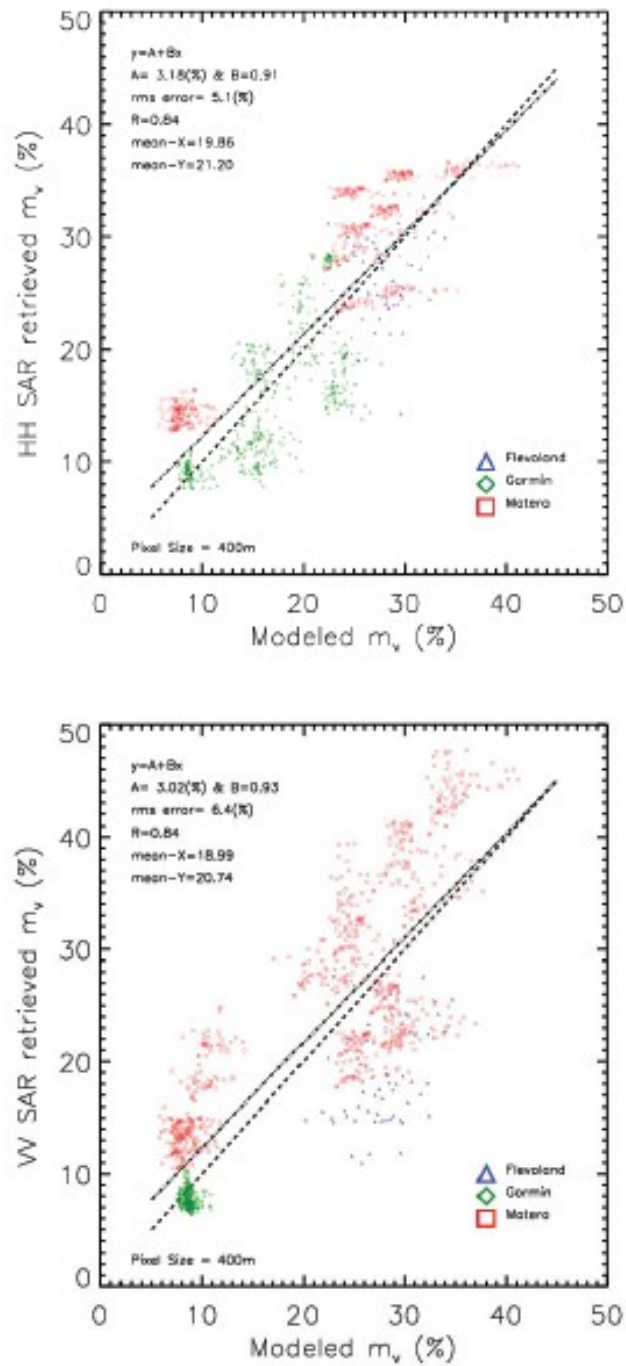
5.5.3. Αξιολόγηση Αλγορίθμου

Η αξιολόγηση του μπλοκ ανάκτησης του SMOSAR, εστιάζεται στις ιδιότητες σταθερότητας του αλγορίθμου έναντι των αλλαγών των τοποθεσιών ανάκτησης (εφαρμογή σε παγκόσμια κλίμακα), της πόλωσης και του μεγέθους του εικονοστοιχείου. Παρήχθησαν χρονοσειρές FD χαρτών εδαφικής υγρασίας, με μέγεθος εικονοστοιχείου 100m, 400m και 700m, για τις περιοχές Görmin, Matera και Flevoland. Για την αξιολόγηση της ακρίβειας των χαρτών εδαφικής υγρασίας, υπολογίστηκε η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ των τιμών εκτίμησης και των τιμών του υδρολογικού μοντέλου, σε πολώσεις HH και VV και στα τρία προαναφερθέντα μεγέθη εικονοστοιχείου. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε μια επιπλέον εκτίμηση της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος για όλη την περιοχή της κάθε τοποθεσίας δοκιμής (30 km² πάνω από το Görmin, 16 km² πάνω από τη Matera και 5 km² πάνω από το Flevoland). Σε γενικό επίπεδο, για όλες τις πολώσεις και τις περιοχές μελέτης, παρατηρήθηκε βελτίωση της απόδοσης του αλγορίθμου (μείωση της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος και αύξηση συνάφειας χαρτών) με τη μείωση της χωρικής ανάλυσης των παραγόμενων χαρτών.

Η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος για όλες τις περιοχές μελέτης και τις χωρικές κλίμακες, κυμάνθηκε από 4% έως 6% για την πόλωση HH, ενώ το αντίστοιχο εύρος για την πόλωση VV, είναι ανάμεσα σε 1% και 10%. Ενώ για την πόλωση HH, η εικόνα της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος φαίνεται αρκετά σταθερή, η αντίστοιχη για την πόλωση VV εμφανίζει μεγάλο εύρος τιμών, γεγονός που δημιουργεί μια δυσκολία γενίκευσης της προσέγγισης ανάκτησης για διάφορες περιοχές ή έναν ανεπαρκή αριθμό εικόνων και περιοχών μελέτης. Για παράδειγμα, η εικόνα 28, παρουσιάζει διαγράμματα διασποράς ανάμεσα στις τιμές εκτίμησης και σε αυτές του υδρολογικού μοντέλου, σε πόλωση HH(άνω κομμάτι) και σε πόλωση VV (κάτω κομμάτι), χαρτών με μέγεθος εικονοστοιχείου 400m.

Για την παραγωγή μεγάλων χρονοσειρών με προϊόντα χαρτών P, απαιτείται αντίστοιχου μεγέθους χρονοσειρά εικόνων SAR. Για αυτόν τον λόγο, μελετήθηκε μόνο η περιοχή Flevoland, για την οποία διατίθεται η μεγαλύτερη χρονοσειρά εικόνων SAR, σε πολώσεις HH, HV και VV. Παρατηρήθηκε μια συστηματική βελτίωση των χαρτών P σε σχέση με τους αντίστοιχους χάρτες FD. Για τους χάρτες P με πόλωση VV, δεν παρατηρήθηκε κάποια βελτίωση σε σχέση με τους αντίστοιχους FD χάρτες και τα αποτελέσματα είναι σημαντικά ασταθή. Αυτή η συμπεριφορά οδηγεί σε αναξιοπιστία των προϊόντων πόλωσης VV και σε

ενίσχυση της αξιοπιστίας των αντίστοιχων προϊόντων σε πόλωση HH, γεγονός που απαιτεί περαιτέρω μελλοντική έρευνα.



Γράφημα 10: Διασπορά πόλωσης HH (άνω διάγραμμα) και πόλωσης VV (κάτω διάγραμμα) ανάμεσα σε τιμές εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας και των τιμών από το υδρολογικό μοντέλο .

Πηγή: A. Balenzano, et al., 2012.

6. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MULESME

Το λογισμικό MULESME (MUltitemporal LEaste Square Moisture Estimator) σχεδιάστηκε για τη συστηματική χαρτογράφηση της επιφανειακής εδαφικής υγρασίας, με τη χρηματοδότηση της Ιταλικής Διαστημικής Υπηρεσίας (ASI) στο πλαίσιο του έργου MIDA (Ιταλικό ακρωνύμιο για τους χάρτες εδαφικής υγρασίας για αφομοίωση υδρολογικών δεδομένων), καθώς και της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (ESA) στο πλαίσιο του έργου WASDI (Web based ASI Spatial Data Infrastructure). Το λογισμικό δέχεται ως είσοδο μια χρονοσειρά δεδομένων SAR των δορυφόρων Sentinel-1 και βοηθητικά δεδομένα, τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια, προκειμένου να παράξει έναν χάρτη εδαφικής υγρασίας σε εθνική (Ιταλική) κλίμακα και έναν χάρτη αβεβαιότητας, με χωρική ανάλυση 500 x 500 m². Ο χάρτης εδαφικής υγρασίας και ο χάρτης αβεβαιότητας εκτίμησης της, ενημερώνονται αυτόματα, όταν είναι διαθέσιμα καινούργια δεδομένα Sentinel-1.

Το λογισμικό υλοποιεί μια αυτοματοποιημένη αλυσίδα επεξεργασίας με πηγαίο κώδικα γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού IDL (Interactive Data Language), χρησιμοποιώντας τις ρουτίνες του προγράμματος ENVI και **δεν προτείνει έναν νέο αλγόριθμο ανάκτησης εδαφικής υγρασίας.**

Μέχρι την δημιουργία του MULESME, δεν υπήρχε μια επιχειρησιακή υπηρεσία χαρτογράφησης της εδαφικής υγρασίας, βασισμένη σε δεδομένα SAR. Αυτό αποτρέπει τους πιθανούς χρήστες από την πλήρη αξιοποίηση της προόδου που έχει επιτευχθεί στον τομέα της ανάκτησης της εδαφικής υγρασίας (ή τουλάχιστον των παραλλαγών της) από δεδομένα Sentinel-1, υψηλής χρονικής διακριτικής ικανότητας (L. Pulvirenty et al., 2017).

Το MULESME όπως έχει προαναφερθεί, έχει δημιουργηθεί για την παροχή επιχειρησιακών προϊόντων σε επίπεδο εθνικής (Ιταλικής κλίμακας) και για αυτόν τον λόγο περιέχει κάποιες λειτουργίες (π.χ. αυτόματη αναζήτηση νέων απεικονίσεων Sentinel-1 και Landsat 8 για όλη την Ιταλική επικράτεια) οι οποίες εξυπηρετούν τον επιχειρησιακό του σκοπό. Δεδομένου ότι το λογισμικό, εφαρμόστηκε για την παρούσα εργασία σε επίπεδο ενός μόνο τμήματος (slice) απεικόνισης Sentinel-1 και εκτός Ιταλικής επικράτειας, στη συνέχεια θα επικεντρωθούμε στις λειτουργίες του λογισμικού που αφορούν την επεξεργασία μόνο ενός τμήματος (slice) απεικόνισης Sentinel-1.

6.1. Δεδομένα και Μέθοδοι

Τα δεδομένα Sentinel-1 που χρησιμοποιεί το MULESME, είναι αυτά τα οποία έχουν συλλεγεί με την λειτουργία IW (Interferometric Wide Swath Mode) και είναι επιπέδου Level-1 και τύπου GRD με χωρική ανάλυση 20 x 20 m² (ενότητα 2.2.4). Είναι διαθέσιμα σε διπλή πόλωση VV +VH, σύμφωνα με τα διατιθέμενα προϊόντα της λειτουργίας IW. Τα δεδομένα διατίθενται δωρεάν σε όλους τους χρήστες μέσω της ιστοσελίδας του Copernicus Open Access Hub.

6.1.1. Ανάκτηση Εδαφικής Υγρασίας

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται από το MULESME, για την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας, βασίζεται στην προσέγγιση της πολυ-χρονικής (multi-temporal) μέγιστης πιθανότητας (π.χ Kim et al., 2012), η οποία χρησιμοποιείται για την απευθείας αναστροφή ενός μοντέλου οπισθοσκέδασης γυμνού εδάφους. Η χρήση μοντέλου γυμνού εδάφους, επιβάλλει τη διάκριση της συμβολής του στο οπισθοσκεδαζόμενο σήμα, πριν από την εφαρμογή του αλγορίθμου. Το μοντέλο οπισθοσκέδασης γυμνού εδάφους που επιλέχθηκε από τους δημιουργούς του MULESME, είναι το μοντέλο Oh, όπως έχει καθιερωθεί στη βιβλιογραφία, το οποίο προτάθηκε από τον Oh το 2004. Από τις διάφορες εκδόσεις του συγκεκριμένου μοντέλου, επιλέχθηκε η συγκεκριμένη, καθώς χρησιμοποιεί μόνο την τυπική απόκλιση του ύψους της επιφάνειας s (cm), για την αναπαράσταση της εδαφικής τραχύτητας.

Κατασκευή Lookup Table (LUT)

Τα διάφορα μοντέλα οπισθοσκέδασης συσχετίζουν την κατάσταση του εδάφους, η οποία αναπαρίσταται με το ζεύγος εδαφικής υγρασίας και την τυπική απόκλιση του ύψους της επιφάνειας (Soil Moisture, s), με τον συντελεστή οπισθοσκέδασης σ° . Στον προτεινόμενο αλγόριθμο, αυτή η σχέση αναπαρίσταται με τη μορφή lookup table (LUT) (Kim et al., 2012, Pierdicca et al., 2013, 2014). Ο συγκεκριμένος πίνακας κατασκευάστηκε εισάγοντας στο μοντέλο Oh, 50 τιμές του s (από 0.5 έως 4.5 cm με βήμα 0.0816 cm), 100 τιμές εδαφικής υγρασίας SM (από 0.05 έως 0.4 m^3/m^3 με βήμα 0.0035 m^3/m^3) και 13 τιμές γωνιών πρόσπτωσης θ (από 26° έως 50° με βήμα 2°). Το εύρος των τιμών της εδαφικής υγρασίας SM και της τυπικής απόκλισης του ύψους της επιφάνειας s , είναι το ίδιο με αυτό των Pierdicca et al. (2013, 2014), λαμβάνοντας υπόψιν το εύρος ισχύος τιμών του μοντέλου Oh. Σχετικά με το εύρος της τοπικής γωνίας πρόσπτωσης, χρησιμοποιείται μεγαλύτερο από αυτό της λειτουργίας IW (ενότητα 2.2.4), προκειμένου να ληφθεί υπόψιν η τοπογραφία. Για κάθε ζευγάρι (SM, s), υπολογίστηκαν τιμές οπισθοσκέδασης σ° , μία για κάθε τιμή από τις 13 τιμές των γωνιών πρόσπτωσης. Συνεπώς ο αριθμός των εγγραφών του LUT, είναι 65000 (13 τιμές θ x 100 τιμές SM x 50 τιμές s = 65000 εγγραφές). Η επιλογή του αριθμού των εγγραφών του LUT, είναι μια ανταλλαγή μεταξύ ακρίβειας και αποτελεσματικότητας. Η χρήση του συγκεκριμένου LUT, έδωσε τη δυνατότητα της επίτευξης ακρίβειας 0.03-0.06 m^3/m^3 (Μέσο τετραγωνικό σφάλμα-RMSE) ανάκτησης εδαφικής υγρασίας σε γυμνό έδαφος, συναντώντας τις απαιτήσεις του World Meteorological Organization (WMO), ο οποίος έχει ορίσει τιμή μέσου τετραγωνικού σφάλματος 0.05 m^3/m^3 . Επιπλέον βρέθηκε ότι η χρήση περισσότερων εγγραφών στον LUT, δεν έχει ως αποτέλεσμα μια αξιοσημείωτη μείωση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος αλλά μια αύξηση του χρόνου υπολογισμού. Ο LUT δημιουργήθηκε μια για πάντα κατά τη φάση κατασκευής του λογισμικού (L. Pulvirenti, et al., 2017).

Το μοντέλο Oh (ενότητα 5.1.1) παράγει τιμές οπισθοσκέδασης σ° , σε πολικότητες VH και VV. Οι τιμές οπισθοσκέδασης για την πόλωση VH, δεν συμπεριλαμβάνονται στον LUT, καθώς η βασική πόλωση συλλογής δεδομένων του Sentinel-1 είναι η VV. Παρά το ότι η λειτουργία IW συλλέγει και δεδομένα διασταυρωμένης πόλωσης VH, δεν χρησιμοποιούνται συχνά για την ανάκτηση εδαφικής υγρασίας, καθώς είναι συχνά ιδιαίτερα ευαίσθητα στην εδαφική τραχύτητα και στην παρουσία θόλου βλάστησης (Richards, 2009).

Ο αλγόριθμος ανάκτησης του MULESME, απαιτεί μια χρονοσειρά M+1 εικόνων SAR (παρόμοια με τον Αλγόριθμο SMOSAR, ενότητα 5.5), του τρέχοντος χρόνου t και προηγούμενων χρονικών στιγμών t-1, ..., t-M). Βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της διαφοράς τετραγώνων, ανάμεσα στις μετρημένες τιμές οπισθοσκέδασης και σε αυτές που προέρχονται από μοντέλα, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (Kim and Van Zyl, 2009):

$$d[SM(t), SM(t-1), \dots, SM(t-M), s, \theta] = \{ \sigma_{VV,soil}^o(t) \Big|_{dB} - \sigma_{VV,model}^o[SM(t), s, \theta] \Big|_{dB} \}^2 + \{ \sigma_{VV,soil}^o(t-1) \Big|_{dB} - \sigma_{VV,model}^o[SM(t-1), s, \theta] \Big|_{dB} \}^2 + \dots + \{ \sigma_{VV,soil}^o(t-M) \Big|_{dB} - \sigma_{VV,model}^o[SM(t-M), s, \theta] \Big|_{dB} \}^2 \quad (23)$$

Το d συμβολίζει τη συνάρτηση κόστους, η οποία θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί και το σύμβολο $\Big|_{dB}$ υποδεικνύει ότι οι τιμές οπισθοσκέδασης είναι σε λογαριθμικές μονάδες. Η μεταβλητή $\sigma_{VV,soil}^o$, αντιστοιχεί στη συμβολή του εδάφους στις μετρήσεις RADAR, οπότε θα πρέπει να γίνουν διορθώσεις λόγω της επίδρασης της βλάστησης, πριν από τον καθορισμό της συνάρτησης κόστους. Σύμφωνα με την υπόθεση ότι οι αλλαγές της εδαφικής τραχύτητας σε μικρή χρονικά κλίμακα, είναι σημαντικά πιο αργές συγκριτικά με αυτές της εδαφικής υγρασίας, οι άγνωστοι στην (23) είναι μια μόνο τιμή για την s για όλες τις χρονικές στιγμές (t:t-M) και M+1 τιμές εδαφικής υγρασίας.

Σύμφωνα με τους Kim et al. (2012), η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους d, πραγματοποιείται αρχικά με την ανάκτηση του s και έπειτα για την συγκεκριμένη τιμή του s, βρίσκοντας τις M+1 τιμές της εδαφικής υγρασίας, για κάθε μια από τις οποίες ελαχιστοποιείται κάθε προσθετός όρος στην (23).

Η επιλογή του αριθμού M των εικόνων προηγούμενων χρονικών στιγμών, εκτός της εικόνας της χρονικής στιγμής που μελετάται, είναι ένας συμβιβασμός ανάμεσα σε ακρίβεια και υπολογιστική ταχύτητα. Σε συμφωνία με τους Pierdicca et al. (2014), οι οποίοι χρησιμοποίησαν έναν διαφορετικό πολυ-χρονικό αλγόριθμο, επιλέχθηκε M=4.

6.1.2. Ανάκτηση της Περιεκτικότητας των Φυτών σε Νερό Από Οπτικά Δεδομένα και Διόρθωση της Επίδρασης της Βλάστησης

Τα οπτικά δεδομένα έδειξαν ότι έχουν μεγάλες δυνατότητες στον υπολογισμό βιοφυσικών παραμέτρων, όπως η περιεκτικότητα των φυτών σε νερό W. Αυτός ο υπολογισμός, επιτυγχάνεται μέσω άμεσων σχέσεων μεταξύ του W και του κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης NDVI (L. Pulvirenti et al., 2017). Ο NDVI δίνεται από τη σχέση:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (24)$$

όπου ρ_{NIR} και ρ_{RED} , οι τιμές ανακλαστικότητας στο κανάλι του εγγύς υπέρυθρου και του κόκκινου, αντιστοίχως. Για τον συσχετισμό του W με τον NDVI, χρησιμοποιήθηκε η εμπειρική σχέση που προτάθηκε από τους Pierdicca et al. (2010,2013):

$$W = 11.92 \times NDVI - 2.73 \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (25)$$

Η σχέση είναι έγκυρη για $NDVI > 0.23$ και αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν στην περιοχή της Ιταλίας. Εάν $W < 0.25 \text{ kg/m}^2$, οι επιδράσεις της βλάστησης θεωρούνται αμελητέες και οι τιμές οπισθοσκέδασης των δεδομένων Sentinel-1, δεν διορθώνονται (Pierdicca et al. ,2013) .

Χρησιμοποιήθηκαν δύο ημι-εμπειρικά μοντέλα για την αναγνώριση της συμβολής της βλάστησης στις τιμές οπισθοσκέδασης των δεδομένων Sentinel-1. Το ένα μοντέλο αφορά βλάστηση η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλο μεγέθους φυτικές συνιστώσες και το δεύτερο μοντέλο αφορά βλάστηση η οποία χαρακτηρίζεται από μικρού μεγέθους φυτικές συνιστώσες. Ο λόγος αυτού του διαχωρισμού, είναι το συμπέρασμα των Macelloni et al. (2001), σύμφωνα με το οποίο, στις καλλιέργειες οι οποίες χαρακτηρίζονται από μικρές φυτικές συνιστώσες (στενά φύλλα), οι τιμές οπισθοσκέδασης μειώνονται όσο αυξάνεται η βιομάζα, ενώ στα φυτά με μεγαλύτερα φύλλα και στελέχη, οι τιμές οπισθοσκέδασης τείνουν να αυξάνονται όσο αυξάνεται η βιομάζα.

Για τη βλάστηση με μικρές φυτικές συνιστώσες επιλέχθηκε το μοντέλο Water Cloud Model (WCM) των Attema and Ulaby (1978), σύμφωνα με το οποίο οι μετρημένες τιμές οπισθοσκέδασης, είναι:

$$\sigma^{\circ} = \sigma^{\circ}_{veg} + \tau^2 \sigma^{\circ}_{soil} \quad (26)$$

$$\sigma^{\circ}_{veg} = aW \cos \theta (1 - \tau^2) \quad (27)$$

$$\tau^2 = \exp(-2bW \sec \theta) \quad (28)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (26), οι τιμές οπισθοσκέδασης σε εδάφη με βλάστηση, είναι το άθροισμα της συμβολής της βλάστησης (σ°_{veg}), η οποία σχετίζεται με το περιεχόμενο νερό των φυτών και της συμβολής του εδάφους (σ°_{soil}).

Στις παραπάνω σχέσεις, οι συντελεστές a και b , είναι εμπειρικοί και επιλέχθηκαν για όλες τις χρήσεις γης των περιοχών μελέτης, οι τιμές των Bindlish και Barroe (2001), σύμφωνα με τους οποίους $a = 0.0012$ και $b = 0.091$. Οι τιμές των συντελεστών a και b , προέκυψαν από αγροτικές περιοχές, με βλάστηση σε μέτριο στάδιο ανάπτυξης.

Σύμφωνα με το μοντέλο WCM, όταν ο συντελεστής σ°_{veg} είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον συντελεστή $\tau^2 \sigma^{\circ}_{soil}$, οι τιμές οπισθοσκέδασης καθορίζονται από το W και τείνουν να μην είναι ευαίσθητες στην εδαφική υγρασία. Ωστόσο, οι Joseph et al. (2010), έδειξαν ότι ακόμα και σε μέγιστη βιομάζα, οι τιμές οπισθοσκέδασης επηρεάζονται σημαντικά από την εδαφική υγρασία, καθώς η σκέδαση κατά μήκος της διαδρομής έδαφος-βλάστηση, μπορεί να είναι αξιοσημείωτη για κάποια είδη βλάστησης, όπως το καλαμπόκι και περιέχει πληροφορίες εδαφικής υγρασίας. Ανέπτυξαν τη μέθοδο ratio method (RM), σύμφωνα με την οποία οι τιμές οπισθοσκέδασης, εκφράζονται ως:

$$\sigma^{\circ}_{soil} / \sigma^{\circ} = [cW^2 + \exp(-dW)] \quad (29)$$

όπου τα c και d είναι και πάλι εμπειρικοί συντελεστές. Η παραπάνω σχέση ισχύει για γωνίες πρόσπτωσης 15° , 35° και 55° , ενώ το εύρος τιμών για το MULESME, είναι από 26° έως 50° . Οι τιμές των c και b για το συγκεκριμένο εύρος γωνιών, προσδιορίστηκαν με παρεμβολή των τιμών 15° , 35° και 55° , με πολυώνυμο 2ης τάξης:

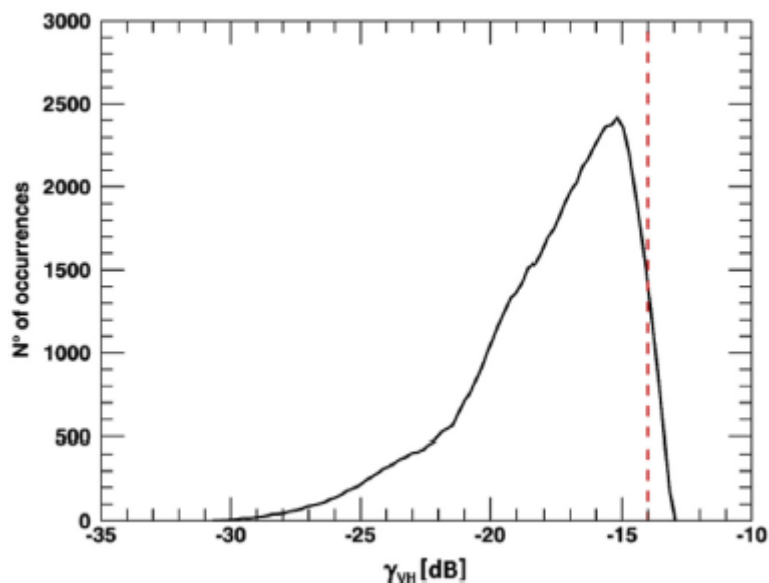
$$c = 6.25 \times 10^{-6} \theta - 0.00111\theta + 0.0533 \quad (30)$$

$$d = -8.55 \times 10^{-5}\theta - 0.0201\theta + 0.233 \quad (31)$$

Για την περίπτωση μελέτης που θεωρήθηκε για την ανάπτυξη του μοντέλου RM, η μέγιστη τιμή του W , είναι περίπου 5 kg/m^2 . Πάνω από αυτή την τιμή, η ανάκτηση της εδαφικής υγρασίας θεωρείται αναξιόπιστη, οπότε το MULESME καλύπτει τα εικονοστοιχεία με $W > 5 \text{ kg/m}^2$, κατά την ανάκτηση της εδαφικής υγρασίας (L. Pulvirenti, et al., 2017).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το μοντέλο WCM εφαρμόζεται όταν υπάρχει βλάστηση με μικρές φυτικές συνιστώσες (σχέσεις (26) έως (28)), ενώ για την παρουσία βλάστησης με μεγαλύτερες φυτικές συνιστώσες, εφαρμόζεται το μοντέλο RM. Προκειμένου να αποφασιστεί το είδος βλάστησης (μικρά ή μεγάλα φυτικά μέρη) και κατά συνέπεια το μοντέλο που θα εφαρμοστεί (WCM ή RM), χρησιμοποιείται ένα κατώφλι για τα δεδομένα διασταυρωμένης πόλωσης (VH) του Sentinel-1. Αυτό το κατώφλι ορίζεται με βάση τα ευρήματα των Satalino et al. (2014), οι οποίοι χρησιμοποίησαν δεδομένα μετρήσεων οπισθοσκέδασης διασταυρωμένης πόλωσης C-band των δορυφόρων ENVISAT ASAR και RADARSAT-2, κανονικοποιημένα για το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης (γ_{VH}), προκειμένου να διακρίνουν τη βλάστηση που εξασθενεί το σήμα RADAR (βλάστηση μικρών συστατικών μερών) από τη βλάστηση που κυριαρχείται από σκέδαση. Σύμφωνα με τα ευρήματά τους, οι καλλιέργειες οι οποίες κυριαρχούνται από σκέδαση, έχουν τιμές γ_{VH} μεγαλύτερες από -14dB . Δεδομένου ότι ο πληθυσμός των εικονοστοιχείων που εξασθενούν και ο πληθυσμός των εικονοστοιχείων που σκεδάζουν το σήμα RADAR, δεν δημιουργούν δύο διακριτές κορυφές ιστογράμματος, χρησιμοποιήθηκε μια σταθερή τιμή κατωφλίου γ_{VH} .

Προκειμένου να τηρηθεί συνέπεια ως προς την εφαρμογή του μοντέλου οπισθοσκέδασης O_h για την παραγωγή του LUT, δημιουργήθηκε το ιστόγραμμα των τιμών (γράφημα 10) γ_{VH} , λαμβάνοντας υπόψιν και τις 65000 τιμές του LUT.



Γράφημα 11: Ιστόγραμμα των κανονικοποιημένων τιμών που περιλαμβάνονται στον LUT, ως προς το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης γ_{VH} .

Πηγή: L. Pulvirenti, et al., 2017

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι σύμφωνα με το μοντέλο Oh, σε συνθήκες γυμνού εδάφους, το γ_{VH} είναι κυρίως λιγότερο από -14 db (μόνο το 15% των τιμών του LUT, ξεπέρασε την τιμή -14 db). Συνεπώς, μπορούμε να αναμένουμε ότι υπό την επίδραση σημαντικής αύξησης της σκέδασης, $\gamma_{VH} > -14$ dB, σε συμφωνία με τα ευρήματα των Satalino et al. (2014). Συνεπώς η συγκεκριμένη τιμή γ_{VH} , χρησιμοποιήθηκε ως κατώφλι, πάνω από το οποίο η βλάστηση θεωρείται ότι παράγει κυρίαρχες επιδράσεις οπισθοσκέδασης και εφαρμόζεται το μοντέλο RM, για τιμές κάτω από το κατώφλι ($\gamma_{VH} \leq -14$ dB), εφαρμόζεται το μοντέλο WCM.

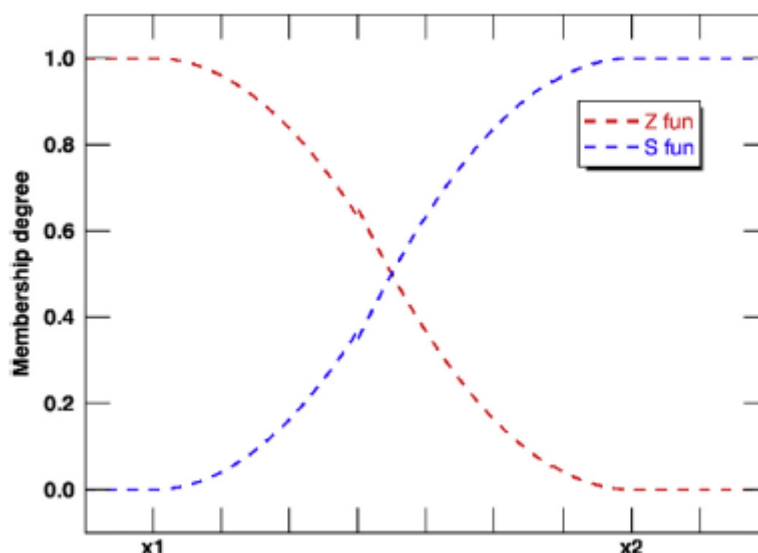
6.1.3. Εκχώρηση βαθμού αβεβαιότητας

Για την εκχώρηση ενός βαθμού αβεβαιότητας σε κάθε εκτίμηση, λήφθηκαν υπόψιν οι παρακάτω παράγοντες:

- 1) επίπεδο ανάπτυξης της βλάστησης
- 2) τοπική γωνία πρόσπτωσης
- 3) τοπογραφική κλίση
- 4) αριθμός εικόνων Sentinel-1 (N_{img}) που επεξεργάστηκαν

Καθώς είναι δύσκολο να αντιμετωπιστεί αλγοριθμικά το πρόβλημα της εκχώρησης ενός βαθμού αβεβαιότητας σε κάθε εκτίμηση, επιλέχθηκε από τους δημιουργούς του προγράμματος, η ασαφής λογική (Fuzzy logic). Με την ασαφή λογική, το πρόβλημα της εκχώρησης αβεβαιότητας, μετατρέπεται σε πρόβλημα καθορισμού ενός βαθμού συμμετοχής, στην κλάση των εικονοστοιχείων των οποίων η εκτίμηση εδαφικής υγρασίας, θεωρείται αβέβαιη. Το νέο πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί αλγοριθμικά, μέσω της εφαρμογής συναρτήσεων συμμετοχής, οι οποίες καθορίζουν τον βαθμό συμμετοχής σε κλάσεις, ανάλογα με τους συντελεστές που θα επιλεγούν από τον χρήστη, οι οποίοι δίνουν τη δυνατότητα να ληφθούν υπόψιν διαφορετικοί παράγοντες, όπως αυτοί που αναφέρονται παραπάνω. Οι τιμές εξόδου των συναρτήσεων συμμετοχής, είναι πραγματικοί αριθμοί μεταξύ 0 και 1. Ο αριθμός 0 σημαίνει μη συμμετοχή στην κλάση, ενώ ο αριθμός 1 σημαίνει μέγιστη συμμετοχή στην κλάση.

Η εφαρμογή των συναρτήσεων συμμετοχής, ονομάζεται fuzzification στη βιβλιογραφία και στο MULESME εκτελείται μέσω των συναρτήσεων S και Z. Αυτές οι συναρτήσεις θα καλούνται στο εξής Zfun ($x:x_1, x_2$) και Sfun ($x:x_1, x_2$), όπου το x είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή της συνάρτησης και οι x_1 και x_2 , οι παράμετροι της, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τις τιμές κατωφλίου για τον καθορισμό του βαθμού συμμετοχής στην κλάση αβεβαιότητας.



Γράφημα 12: Συναρτήσεις συμμετοχής σε κλάσεις S και Z.

Πηγή: L. Pulvirenti, et al., 2017

Αβεβαιότητα λόγω βλάστησης

Όπως έχει προαναφερθεί, η παρουσία βλάστησης, επηρεάζει τις τιμές οπισθοσκέδασης και δυσχεραίνει τη μοντελοποίησή της. Συνεπώς, θα πρέπει να αναμένεται ότι με την αύξηση του όγκου βλάστησης, αυξάνεται και ο βαθμός αβεβαιότητας ανάκτησης της εδαφικής υγρασίας. Σύμφωνα με το μοντέλο RM, η τιμή του W που αντιπροσωπεύει την παρουσία μέγιστου όγκου βλάστησης (μέγιστη τιμή για την ανάπτυξη του μοντέλου) είναι 5 kg/m², ενώ η παρουσία βλάστησης θεωρείται ελάχιστη για $W < 0.25$ kg/m² (Pierdicca et al., 2013). Η εκχώρηση συμμετοχής στην κλάση αβεβαιότητας για την βλάστηση, σύμφωνα με αυτό το σκεπτικό, εκφράζεται από τη συνάρτηση:

$$d_w = S_{fun}(W; x_1=0.25, x_2=5) \quad (32)$$

όπου εκχωρείται μέγιστος βαθμός συμμετοχής 1 (κάλυψη εικονοστοιχείων), στα εικονοστοιχεία με $W=5$ kg/m² και ελάχιστος βαθμός συμμετοχής 0, στα εικονοστοιχεία με $W=0.25$ kg/m².

Σύμφωνα με τους Satalino et al. (2014), εάν η τιμή του γ_{VH} είναι υψηλή, η βλάστηση τείνει να σκεδάζει το σήμα RADAR και η ευαισθησία των μετρήσεων οπισθοσκέδασης στην εδαφική υγρασία τείνει να μειώνεται. Η μέση τιμή του γ_{VH} των δειγμάτων του LUT είναι 18 dB, συνεπώς κάτω από αυτή την τιμή θεωρείται ότι οι τιμές οπισθοσκέδασης δεν επηρεάζονται από την ποσότητα σκέδασης και είναι αυτή που επιλέχθηκε για την ελάχιστη συμμετοχή στην κλάση αβεβαιότητας. Σύμφωνα με τους Satalino et al. (2014), η επίδραση της σκέδασης στο οπισθοσκεδαζόμενο σήμα δεν είναι σημαντική (γυμνό έδαφος) για $\gamma_{VH} > -14$ dB. Θέλοντας να δημιουργηθεί ένα διάστημα με μέσο την τιμή -14 dB και ελάχιστο άκρο -18 dB, επιλέχθηκε η τιμή -10 dB για την εκχώρηση μέγιστης αβεβαιότητας. Αυτοί οι κανόνες, εκφράζονται από τη συνάρτηση:

$$d_v = S_{fun}(\gamma_{VH}; x_1=-18, x_2=-10) \quad (33)$$

Οι βαθμοί συμμετοχής d_w και d_v των συναρτήσεων (32) και (33), αντίστοιχα, συνδυάζονται μέσω του λογικού τελεστή ή (or) στην συνάρτηση:

$$d_{veg} = \max (d_w, d_v) \quad (34)$$

όπου επιλέγεται ο μέγιστος από τους βαθμούς αβεβαιότητας των (32) και (33).

Αβεβαιότητα λόγω τοπογραφίας

Αναφορικά με τον βαθμό αβεβαιότητας που σχετίζεται με την τοπογραφία και την τοπική γωνία πρόσπτωσης, είναι γνωστό ότι η επίδραση της βλάστησης και της εδαφικής τραχύτητας στις μετρήσεις οπισθοσκέδασης, είναι μικρότερη σε χαμηλές γωνίες πρόσπτωσης. Επίσης θα πρέπει να θεωρηθεί ότι οι μετρήσεις σε επίπεδες εκτάσεις, είναι περισσότερο ακριβείς, συγκριτικά με μετρήσεις σε εκτάσεις με περίπλοκη τοπογραφία (L. Pulvirenti, et al., 2017).

Σύμφωνα με τον Richards (2009) το τοπογραφικό ανάγλυφο δεν προκαλεί μόνο μετατόπιση του εύρους, αλλά και αλλαγές στην ένταση των εικόνων SAR. Οι διακυμάνσεις της κλίσης της τάξης των 2° ή και λιγότερο, αντιστοιχούν σε πολύ μικρές διακυμάνσεις της έντασης του RADAR. Όταν η τοπογραφική κλίση αυξάνεται, η τοπική γωνία πρόσπτωσης, τείνει να παρουσιάζει απότομες διακυμάνσεις, κάτι που ισχύει και για την ένταση του RADAR, οδηγώντας σε αύξηση του βαθμού αβεβαιότητας. Συνεπώς, επιλέχθηκε η ελάχιστη συμμετοχή στην κλάση αβεβαιότητας, σε εικονοστοιχεία με τοπογραφική κλίση 2° και μέγιστη συμμετοχή σε εικονοστοιχεία με τοπογραφική κλίση 15° (η τοπογραφική κλίση εξάγεται χρησιμοποιώντας ψηφιακό μοντέλο εδάφους) :

$$d_v = \text{Sfun} (\text{Slope}; x_1=2, x_2=15) \quad (35)$$

Υιοθετώντας την ελάχιστη και μέγιστη τοπική γωνία πρόσπτωσης των προϊόντων IW, επιλέχθηκε η εκχώρηση μέγιστης συμμετοχής στην κλάση αβεβαιότητας, στα εικονοστοιχεία με τοπική γωνία πρόσπτωσης 29° και μέγιστη σε αυτά με 46° , δημιουργώντας τη συνάρτηση:

$$d_\theta = \text{Sfun} (\theta; x_1=29, x_2=46) \quad (36)$$

Ομοίως, οι βαθμοί συμμετοχής d_v και d_θ των συναρτήσεων (35) και (36), αντίστοιχα, συνδυάζονται μέσω του λογικού τελεστή ή (or) στην συνάρτηση:

$$d_{topo} = \max (d_{slo}, d_\theta) \quad (37)$$

όπου επιλέγεται ο μέγιστος από τους βαθμούς αβεβαιότητας των (35) και (36).

Αβεβαιότητα λόγω αριθμού εικόνων

Αν και αναμένεται να υπάρχει πάντα ο αριθμός των $M+1=5$ διαθέσιμων εικόνων SAR, προς επεξεργασία, μπορεί κάποιο εικονοστοιχείο κάποιας από τις εικόνες προς επεξεργασία, να έχει καλυφθεί (π.χ λόγω $W>5 \text{ kg/m}^2$). Οπότε, επιλέχθηκε να εκχωρείται ελάχιστη συμμετοχή στην κλάση αβεβαιότητας, στα εικονοστοιχεία των οποίων διατίθενται 5 εικόνες για την ανάκτηση της εδαφικής υγρασίας και μέγιστη σε αυτά με 1 εικόνα.

$$d_{meas} = \text{Zfun} (N_{img}; x_1=1, x_2=5) \quad (38)$$

Συνολική αβεβαιότητα

Τα αποτελέσματα των (34), (37) και (38), συνδυάζονται στην παρακάτω συνάρτηση, όπου υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος όρος τους:

$$d_{pixel} = 0.5 \times d_{veg} + 0.25 \times d_{topo} + 0.25 \times d_{means} \quad (39)$$

Επιλέχθηκε να δοθεί το μεγαλύτερο βάρος, για την εκχώρηση αβεβαιότητας, στην παρουσία βλάστησης, καθώς θεωρήθηκε από τους δημιουργούς του προγράμματος, η κύρια πηγή αβεβαιότητας των εκτιμήσεων.

Η τελική διεργασία σε κάθε προσέγγιση που βασίζεται σε ασαφή λογική (fuzzy logic), ονομάζεται defuzzification και μέσω αυτής εκχωρείται κάθε στοιχείο ενός ασαφούς συνόλου σε μια κλάση, σύμφωνα με τον βαθμό συμμετοχής (Pulvirenti et al., 2014). Επιλέχθηκε να δημιουργηθούν 3 κλάσεις αβεβαιότητας ανάκτησης της εδαφικής υγρασίας, οι οποίες ονομάζονται low, medium και high. Ο διαχωρισμός των 3 κλάσεων, πραγματοποιήθηκε με τον διαχωρισμό του εύρους της τιμής εξόδου (0 έως 1) της τελικής συνάρτησης συμμετοχής (38):

$$\text{High uncertainly: } 2/3 < d_{pixel} \leq 1$$

$$\text{Medium uncertainly: } 1/3 < d_{pixel} \leq 2/3$$

$$\text{Low uncertainly: } 0 \leq d_{pixel} \leq 1/3$$

6.2. Το Λογισμικό

6.2.1. Δευτερεύον Επεξεργαστής

Ο Δευτερεύον επεξεργαστής, παράγει τον χάρτη περιεχόμενου νερού των φυτών (Wmap), ο οποίος αποτελεί και μια από τις εισόδους του MULESME. Για τη δημιουργία του Wmap, χρησιμοποιούνται οπτικές εικόνες πολυφασματικών αισθητήρων, μέσω των οποίων υπολογίζεται η τιμή του NDVI για κάθε εικονοστοιχείο και έπειτα μέσω της σχέσης (24), υπολογίζεται η τιμή του περιεχόμενου νερού των φυτών W. Στην παρούσα στιγμή χρησιμοποιούνται κυρίως δεδομένα του αισθητήρα Landsat-8, του επιπέδου Level-1 Precision Terrain (L1TP) (ενότητα 2.1.1), όμως τίποτα δεν αποτρέπει τον χρήστη από την επεξεργασία εικόνων των δορυφόρων Sentinel-2 και MODIS (MOD13Q1). Ο λόγος της δυνατότητας χρήσης εικόνων και των 3 παραπάνω αισθητήρων, έγκειται στην παροχή όσο το δυνατόν πιο ενημερωμένων (πρόσφατων) τιμών του κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης NDVI, για τη δημιουργία όσο το δυνατόν ακριβέστερου Wmap και κατά συνέπεια ακριβέστερων εκτιμήσεων εδαφικής υγρασίας. Η χρονική διακριτική ικανότητα των Landsat-8 και MODIS, είναι 16 ημέρες, ενώ του Sentinel-2 είναι 10 ημέρες με 1 δορυφόρο και 5 ημέρες με χρήση και των 2 δορυφόρων του σχηματισμού. Αυτοί οι χρόνοι είναι κατάλληλοι για την παρακολούθηση του φαινολογικού κύκλου της βλάστησης (L. Pulvirenti et al., 2017).

Για τη δημιουργία του χάρτη εδαφικής υγρασίας (σε εθνική κλίμακα) της Ιταλικής επικράτειας, ο δευτερεύον επεξεργαστής, αναζητά μέσω της διαδικτυακής πλατφόρμας U.S Geological Survey Earth Explorer, της πιο πρόσφατες εικόνες Landsat 8. Αντιστοίχως,

αναζητά τις πιο πρόσφατες εικόνες Sentinel-2 από την διαδικτυακή πλατφόρμα Copernicus Open Access Hub (ή Italian Sentinel Collaborative Data Hub) και τις πιο πρόσφατες εικόνες MODIS από την πλατφόρμα Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System (LAADS) Distributed Active Archive Center (DAAC).

Πριν από τον υπολογισμό του δείκτη NDVI για τις διατιθέμενες εικόνες, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος Fmask (Zhu et al., 2015; Zhu and Woodcock, 2012), καθώς η παρουσία νεφών αλλοιώνει τις τιμές του δείκτη NDVI. Ο αλγόριθμος Fmask, εφαρμόζεται μέσω του αντίστοιχου εργαλείου του προγράμματος ENVI. Τα εικονοστοιχεία που αναγνωρίζονται από τον αλγόριθμο ως σύννεφα, καλύπτονται και δεν υπολογίζεται για αυτά η τιμή W, ώστε να αποφευχθούν οι λανθασμένες εκτιμήσεις εδαφικής υγρασίας. Σε αυτήν την περίπτωση, η τιμή W για τα εικονοστοιχεία που καλύφθηκαν, δεν ενημερώνεται σύμφωνα με την πιο πρόσφατη οπτική εικόνα και για την ανάκτηση της εδαφικής υγρασίας χρησιμοποιείται η τελευταία τιμή W που είναι διαθέσιμη.

Προκειμένου να καταστούν διαχειρίσιμα τα προϊόντα διαφορετικών μεγεθών εικονοστοιχείων, των οπτικών εικόνων και των εικόνων Sentinel-1, ο χάρτης Wmap ανασχεδιάζεται (resample) και επαναπροβάλεται (reprojection), χρησιμοποιώντας το εργαλείο “Layer Stacking”. Η συγκεκριμένη διαδικασία απαιτεί τον καθορισμό ενός κύριου (master) προϊόντος, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως γεωγραφική αναφορά για χαρτογραφική προβολή και μέγεθος εικονοστοιχείου. Το προϊόν που επιλέχθηκε ως κύριο είναι ο χάρτης κάλυψης γης Corine Land Cover (LC map), για την Ιταλική επικράτεια (διαθέσιμος στη σελίδα <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>). Ο LC map έχει προβολή UTM 32 (για την Ιταλική επικράτεια), datum WGS84 και μέγεθος εικονοστοιχείου 100 x 100 m². Ο LC map δημιουργείται μια για πάντα, για κάθε περιοχή μελέτης, κατά τη φάση της προετοιμασίας των προϊόντων εισόδου. Κάθε νέος διαθέσιμος χάρτης κάλυψης γης του προγράμματος Corine, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδο στο MULESME.

Το MULESME σχεδιάστηκε για να λειτουργεί συστηματικά, μια φορά την ημέρα. Αρχικά, ο δευτερεύον επεξεργαστής ελέγχει για τη διαθεσιμότητα νέων οπτικών εικόνων, και εάν υπάρχουν ενημερώνει τον Wmap. Στη συνέχεια, ελέγχει τη διαθεσιμότητα νέων εικόνων Sentinel-1 και εφόσον υπάρχουν παράγει νέες εκτιμήσεις της εδαφικής υγρασίας.

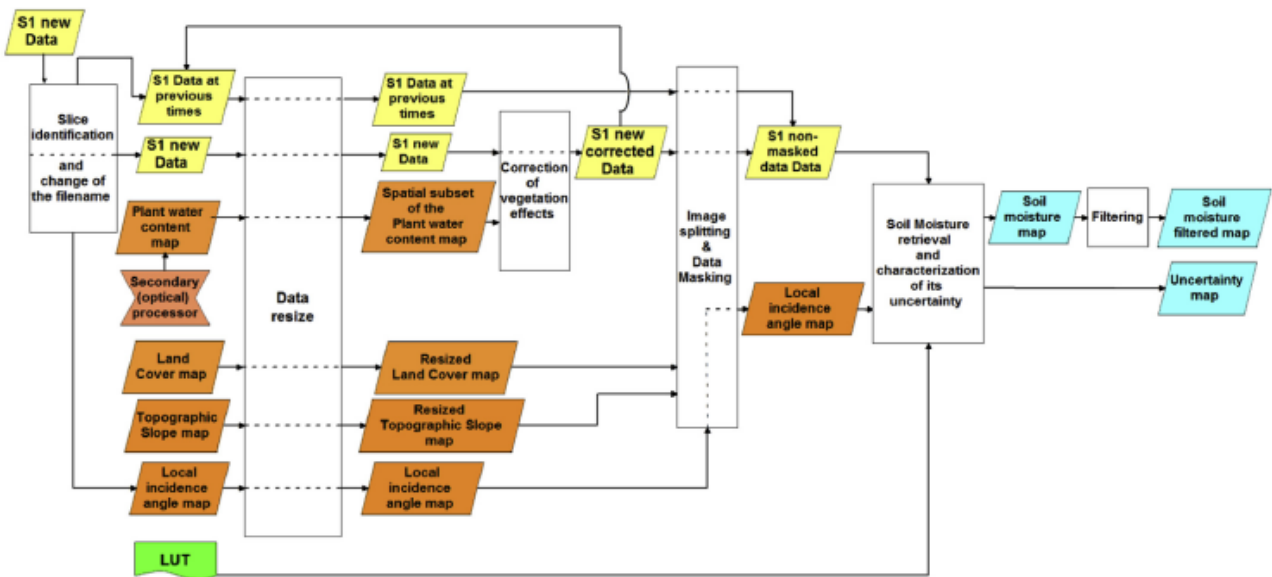
6.3. Ροή εργασιών του MULESME

Το λογισμικό, σε γενικές γραμμές, εκτελεί τις εξής διαδικασίες:

- 1) Διαβάζει τα στοιχεία εισόδου
- 2) Αλλάζει το μέγεθος των δεδομένων
- 3) Διορθώνει την επίδραση της βλάστησης στις μετρήσεις οπισθοσκέδασης των δεδομένων του Sentinel-1
- 4) Καλύπτει τα εικονοστοιχεία των οποίων η ανάκτηση της εδαφικής υγρασίας είναι επισφαλής

- 5) Εφαρμόζει τον πολυχρονικό αλγόριθμο ανάκτησης της εδαφικής υγρασίας και ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων στον εξαγόμενο χάρτη εδαφικής υγρασίας
- 6) Εκχωρεί μια τιμή αβεβαιότητας σε κάθε εικονοστοιχείο του εξαγόμενου χάρτη

Η ροή εργασιών του MULESME, φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 28: Ροή εργασιών MULESME.

Πηγή: L. Pulvirenti et al., 2017.

6.3.1. Δεδομένα εισόδου

Τα δεδομένα εισόδου, είναι:

- 1) M+1 εικόνες Sentinel-1
- 2) Χάρτης τοπικών γωνιών πρόσπτωσης
- 3) Χάρτης κάλυψης γης (LC map)
- 4) Χάρτης τοπογραφικών κλίσεων (Slope map)
- 5) Χάρτης περιεκτικότητας νερού των φυτών Wmap, ο οποίος παράγεται από τον δευτερεύοντα επεξεργαστή

Ο χάρτης τοπογραφικών κλίσεων, παράγεται από το εργαλείο του ENVI “Topographic Modeling”, χρησιμοποιώντας ως είσοδο ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους. **Για τη λειτουργία του MULESME σε εθνική (Ιταλική κλίμακα), θα πρέπει οι χάρτες LC και Slope, να έχουν τον ίδιο αριθμό γραμμών και στηλών.**

Οι εικόνες Sentinel-1 που χρησιμοποιούνται ως είσοδος, είναι βαθμονομημένα GRD δεδομένα οπισθοσκέδασης, τα οποία παράγονται μέσω του ελεύθερου λογισμικού ESA Sentinel Application Platform (SNAP). Οπότε για τη δημιουργία των εικόνων εισόδου, θα πρέπει να εκτελεστούν μέσω του SNAP, οι ακόλουθες διεργασίες:

- 1) εφαρμογή αρχείου τροχιάς (apply orbit file)
- 2) αφαίρεση θερμικού θορύβου (thermal noise removal)
- 3) βαθμονόμηση (calibration)
- 4) multi-looking (για τη δημιουργία τετραγωνικού pixel 100 x 100 m²)
- 5) διόρθωση εδάφους (terrain correction) με προβολή UTM/WGS84

Το SNAP χρησιμοποιείται επίσης για τη δημιουργία του χάρτη τοπικών γωνιών πρόσπτωσης (Local Incidence Map).

6.3.2. Δημιουργία και Φιλτράρισμα του Χάρτη Εδαφικής Υγρασίας

Το μέγεθος μιας εικόνας multi-looked Sentinel-1 τετραγωνικού εικονοστοιχείου 100 x 100 m², είναι της τάξης των 2800/2900 x 2000/2500 pixels. Για λόγους διαχειρησιμότητας, κάθε εικόνα Sentinel-1, χωρίζεται σε χωρικές υπο-ενότητες των 500 x 500 pixels, όπως έγινε και από τους Pulvirenti et al. (2014). Στη συνέχεια εκτελείται η κάλυψη των pixels, των οποίων η ανάκτηση της εδαφικής υγρασίας, θεωρείται επισφαλής. Το MULESME καλύπτει εικονοστοιχεία:

- αστικών περιοχών, δασών και υδάτινων σωμάτων (σύμφωνα με τον χάρτη κάλυψης γης)
- με περίπλοκη τοπογραφία, των οποίων η κλίση είναι μεγαλύτερη από 15°
- με περιεκτικότητα νερού των φυτών $W > 5 \text{ kg/m}^2$
- με τοπική γωνία πρόσπτωσης μικρότερη των 24°, τιμή που αντιστοιχεί στην μικρότερη τιμή στον LUT, μείον 2° ανοχής ή μεγαλύτερη των 52° που είναι η μεγαλύτερη στον LUT, μείον 2° ανοχής.
- Με τιμές οπισθοσκέδασης σε πόλωση VV, μικρότερη των -19 dB (συνήθως οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε εικονοστοιχεία καλυμμένα με νερό, παγωμένο έδαφος ή και υγρό χιόνι) και μεγαλύτερη των -2 dB (συνήθως οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε αστικές περιοχές ή δάση) σύμφωνα με τους Pierdicca et al. (2014).

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των προϊόντων IW, είναι η διαφορά των γωνιών πρόσπτωσης μεταξύ εγγύς περιοχής (near range) και μακρινής περιοχής (far range), γεγονός που θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν (L. Pulvirenti et al., 2017). Για κάθε εικονοστοιχείο της κάθε χωρικής υπο-ενότητας, αναγνωρίζεται η τιμή της γωνίας πρόσπτωσης στον LUT (θ_{LUT}), η οποία είναι πλησιέστερη στην τιμή της τοπικής γωνίας πρόσπτωσης (θ_i), σύμφωνα με τον χάρτη τοπικών γωνιών πρόσπτωσης που παρήχθη, μέσω του SNAP. Με αυτόν τον τρόπο παράγεται ένας δεύτερος χάρτης τοπικών γωνιών πρόσπτωσης (θ_{i2}), του οποίου οι τιμές είναι αυτές που περιλαμβάνονται στον LUT. Στη συνέχεια το MULESME εκτελεί βρόγχο επανάληψης και στις 13 τιμές θ_{LUT} και επεξεργάζονται ταυτόχρονα όλα τα pixel για τα οποία ισχύει $\theta_{LUT} = \theta_{i2}$.

Όπως έγινε και από τους Kim et al. (2012), για την παραγωγή του χάρτη εδαφικής υγρασίας, εκτιμήθηκε πρώτα η τιμή της τραχύτητας s , θεωρώντας ότι είναι η ίδια για όλους τους προσθετέους της (22). Για τον σκοπό αυτό, εξετάζονται όλες οι πιθανές τιμές του s στον LUT και για κάθε s , υπολογίζονται οι τιμές της εδαφικής υγρασίας που ελαχιστοποιούν κάθε προσθετέο της (22), οι οποίες δηλώνονται ως $SM_m(i)(i=t:M)$. Το άθροισμα αυτών των προσθετέων, αντιπροσωπεύει το ελάχιστο της συνάρτησης κόστους για την εξεταζόμενη τιμή s . Ως εκ τούτου, δηλώνοντας με \tilde{s} μια γενική τιμή του s στον LUT, η $d_{min}(\tilde{s})$ δίνεται από:

$$d_{min}(\tilde{s}) = \{ \sigma_{VV,soil}^o(t) \Big|_{dB} - \sigma_{VV,model}^o[SM_m(t), \tilde{s}, \theta_{12}] \Big|_{dB} \}^2 + \{ \sigma_{VV,soil}^o(t-1) \Big|_{dB} - \sigma_{VV,model}^o[SM_m(t-1), \tilde{s}, \theta_{12}] \Big|_{dB} \}^2 + \dots + \{ \sigma_{VV,soil}^o(t-M) \Big|_{dB} - \sigma_{VV,model}^o[SM_m(t-M), \tilde{s}, \theta_{12}] \Big|_{dB} \}^2 \quad (40)$$

όπου :

$$SM_m(i) = SM \Big| \{ \sigma_{VV,soil}^o(t) \Big|_{dB} - \sigma_{VV,model}^o[SM(i), \tilde{s}, \theta_{12}] \Big|_{dB} \}^2 \\ = \min(\{ \sigma_{VV,soil}^o(t) \Big|_{dB} - \sigma_{VV,model}^o[SM(i), \tilde{s}, \theta_{12}] \Big|_{dB} \}^2); i \\ = t : t - M \quad (41)$$

Συνδυάζοντας τις διάφορες συναρτήσεις $d_{min}(\tilde{s})$ για τις διάφορες τιμές του s στον LUT, καθορίζεται η συνάρτηση κόστους για την εκτίμηση του s , η οποία ονομάζεται $d(s)$. Η εκτίμηση του s (s_{est}) είναι η τιμή του s στον LUT, η οποία ελαχιστοποιεί την $d(s)$. Οι εκτιμήσεις της εδαφικής υγρασίας (SM_{est}) των χρονικών στιγμών $t, t-1, \dots, t-M$ είναι οι τιμές της εδαφικής υγρασίας στον LUT (Kim et al., 2012), οι οποίες αποκτήθηκαν μέσω της (41) για $\tilde{s} = s_{est}$.

Ο τελικός χάρτης εδαφικής υγρασίας, παράγεται με την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας, για κάθε χωρική υπο-ενότητα του κομματιού (slice) απεικόνισης Sentinel-1. Επιπλέον, σύμφωνα με τη σχέση (41), είναι δυνατόν να εκτιμηθούν οι τιμές εδαφικής υγρασίας, εκτός της παρούσας χρονικής στιγμής t , και των προηγούμενων χρονικών στιγμών. Λόγω του ότι το MULESME σχεδιάστηκε προκειμένου να παρέχει στους χρήστες δεδομένα που ανανεώνονται σε καθημερινή βάση, επιλέχθηκε να παράγεται από το λογισμικό μόνο ο χάρτης εδαφικής υγρασίας της παρούσας στιγμής t .

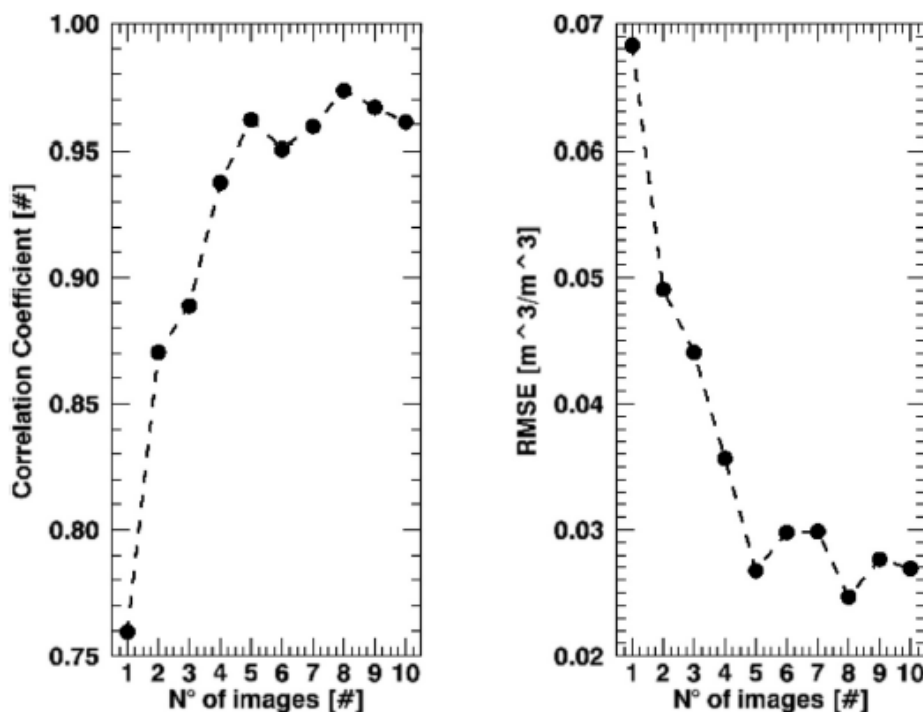
Προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία χαρτών με θόρυβο και λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι χάρτες εδαφικής υγρασίας σχεδιάζονται για την εξομοίωση σε υδρολογικά μοντέλα, εφαρμόζεται ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων με μάσκα 5x5, στον τελικό χάρτη (εικόνα 28). Συνεπώς, η πραγματική ανάλυση των χαρτών εδαφικής υγρασίας, είναι της τάξεως των 500x500 m². Το σκεπτικό αυτό βασίζεται στο ότι η ανάλυση των 500x500 m², είναι η ίδια με αυτή του υδρολογικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί σε μελλοντική αφομοίωση χαρτών εδαφικής υγρασίας από δεδομένα Sentinel-1 (L. Pulvirenti et al., 2017).

6.4. Αξιολόγηση Αλγορίθμου

6.4.1. Αξιολόγηση με Προσομοιωμένα Δεδομένα

Η πρώτη αξιολόγηση εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας συνθετικές εικόνες SAR της C-band, μέσω της εφαρμογής του μοντέλου Oh. Θεωρώντας σταθερές τιμές εδαφικής τραχύτητας s και τιμές εδαφικής υγρασίας που διαφοροποιούνταν στον χρόνο, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές οπισθοσκέδασης, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των συνθετικών εικόνων. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν προσομοιωμένα δεδομένα SAR και προσομοιωμένες παρατηρήσεις εδαφικής υγρασίας, επί του εδάφους. Δεδομένου ότι για τη δημιουργία των δεδομένων οπισθοσκέδασης δεν θεωρήθηκε η ύπαρξη βλάστησης (εφαρμογή μοντέλου Oh), αυτού του τύπου η αξιολόγηση, αφορά γυμνά εδάφη.

Παρατηρήθηκε ότι η ακρίβεια ανάκτησης εδαφικής υγρασίας, σε δεδομένα προσομοίωσης, αυξάνεται όσο ο αριθμός των εικόνων της χρονοσειράς επεξεργασίας, παραμένει μικρότερων των 5 εικόνων ($M+1 < 5$), γεγονός που δικαιώνει την επιλογή της πολυ-χρονικής (multi-temporal) προσέγγισης. Όπως φαίνεται και στα γράφημα 12, η αύξηση του αριθμού των εικόνων της χρονοσειράς επεξεργασίας πέραν του αριθμού των 5 εικόνων, δεν έχει ως αποτέλεσμα κάποια αξιοσημείωτη αύξηση της ακρίβειας, η οποία να κάνει συμφέρουσα και την αντίστοιχη αύξηση του χρόνου επεξεργασίας. Για αυτόν τον λόγο, οι δημιουργοί του προγράμματος επέλεξαν τον αριθμό εικόνων SAR $M=4$ προηγούμενων χρονικών στιγμών.



Γράφημα 13: Συντελεστής συσχέτισης και Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (RMSE) σε σχέση με τον αριθμό των εικόνων της χρονοσειράς επεξεργασίας.

Πηγή: L. Pulvirenti, et al., 2017

Σύμφωνα με το γράφημα 12, για $M+1=5$, ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R=0.96$ και η ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος $R\sim 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

6.4.2 Αξιολόγηση με Πειραματικά Δεδομένα

Όπως προαναφέρθηκε, το MULESME σχεδιάστηκε για την Ιταλική επικράτεια, όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε περιοχές εκτός Ιταλίας (L. Pulvirenti et al., 2017). Οπότε, για την αξιολόγηση του αλγορίθμου σε πειραματικά δεδομένα, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της καμπάνιας AgriSAR 2006 της ESA. Η καμπάνια διεξήχθη για της αγροτικές περιοχές του DEMMIN της βόρειας Γερμανίας, κατά την περίοδο 19 Απριλίου έως 26 Ιουλίου του 2006. Πραγματοποιήθηκαν επίγειες μετρήσεις περιεχόμενου νερού των φυτών και εδαφικής υγρασίας, σχεδόν ταυτόχρονα με τη λήψη των εικόνων SAR.

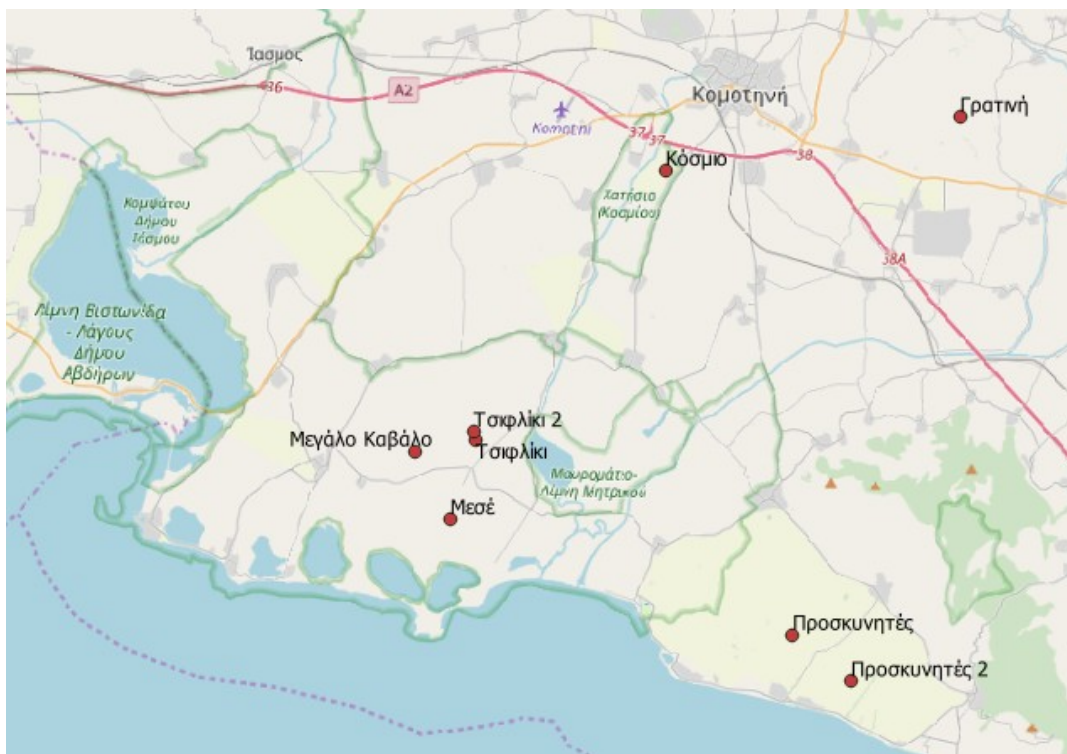
Τα δεδομένα της καμπάνιας συλλέχθηκαν για διάφορες περιοχές με διαφορετικές καλλιέργειες. Το RMSE υπολογίστηκε ίσο με $0.12 \text{ m}^3/\text{m}^3$ για το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων, καθώς η έντονη παρουσία βλάστησης τους μήνες Ιουνίου και Ιουλίου, μεταβάλλει τις τιμές οπισθοσκέδασης και συνεπώς την ακρίβεια ανάκτησης των τιμών εδαφικής υγρασίας. Το RMSE είναι αρκετά υψηλό συγκριτικά με αυτό της καμπάνιας AgriSAR, το οποίο κυμάνθηκε μεταξύ $0.03\sim 0.14 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Θα πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι τα δεδομένα Sentinel-1 δεν είναι πλήρως πολωσιμετρικά, σε αντίθεση με αυτά της AgriSAR, στην οποία χρησιμοποιήθηκαν πλήρως πολωσιμετρικά δεδομένα (πολώσεις VV, HV, VH, και HH). Επιπλέον τα δεδομένα Sentinel-1 έχουν συλλεγεί μόνο στη C-band, ενώ στην AgriSAR συλλέχθηκαν δεδομένα στα κανάλια X, C και L (L. Pulvirenti et al., 2017).

Λαμβάνοντας υπόψιν μόνο της εκτιμήσεις εδαφικής υγρασίας με βαθμό αβεβαιότητας low ή medium, το συνολικό RMSE βελτιώνεται και υπολογίζεται σε $0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3$, ενώ σε περιπτώσεις όπου η βλάστηση ήταν αραιή ($W < 0.25 \text{ kg}/\text{m}^2$), υπολογίστηκε RMSE ίσο με $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Η τιμή του $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ συναντά τις απαιτήσεις ακρίβειας του WMO (ενότητα 6.1.1) (L. Pulvirenti et al., 2017).

7. ΕΦΑΡΜΟΓΗ MULESME-ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΧΡΗΣΗΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

7.1. Περιοχή Μελέτης

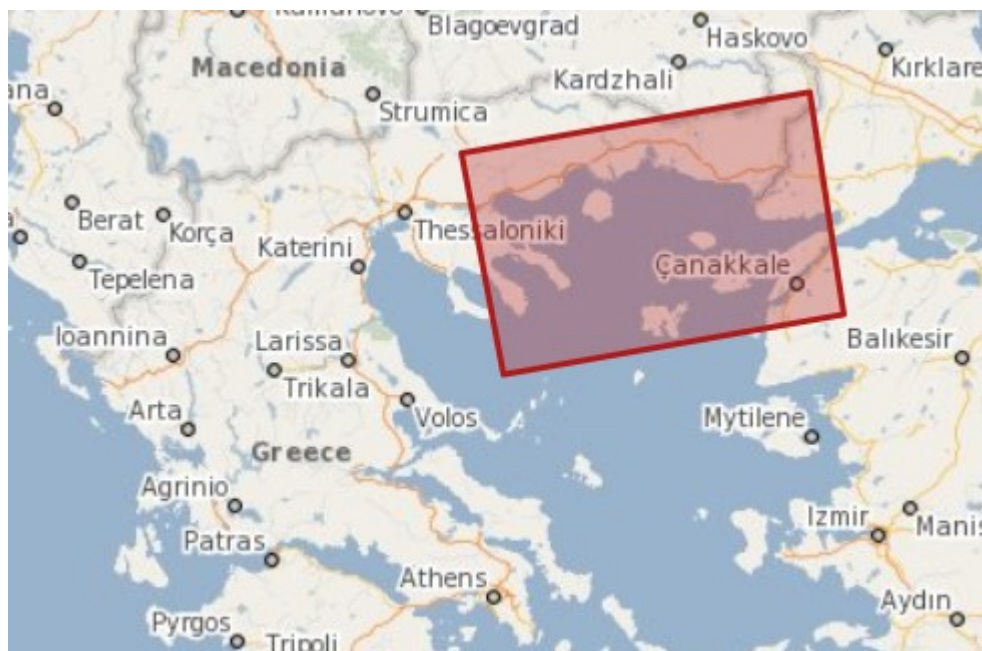
Η περιοχή μελέτης είναι η ευρύτερη περιοχή της Κομοτηνής, η οποία καθορίστηκε σύμφωνα με τη θέση των 8 επίγειων σταθμών μέτρησης της εδαφικής υγρασίας, οι μετρήσεις των οποίων χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου.



Εικόνα 29: Περιοχή μελέτης-Σταθμοί επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας (κόκκινες κουκίδες).

7.2. Δεδομένα Sentinel-1

Για την εφαρμογή του MULESME στην περιοχή μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν 13 εικόνες SAR ανοδικής (ascending) τροχιάς των δορυφόρων Sentinel-1A και Sentinel-1B, της σχετικής τροχιάς (relative orbit) 29, οι οποίες αποκτήθηκαν μέσω της λειτουργία IW. Οι εικόνες είναι δωρεάν διαθέσιμες στην ηλεκτρονική διεύθυνση <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> και αφορούν την περίοδο 06 Ιουλίου 2018 έως 16 Σεπτεμβρίου 2018. Στην εικόνα 30, παρουσιάζεται το αποτύπωμα (footprint) των εικόνων στην περιοχή μελέτης, η οποία καλύπτεται από ένα μόνο τμήμα (slice) εικόνας Sentinel-1.



Εικόνα 30: Αποτόπωμα εικόνων Sentinel-1 στην περιοχή μελέτης.

7.2.1. Προεπεξεργασία Εικόνων Sentinel-1

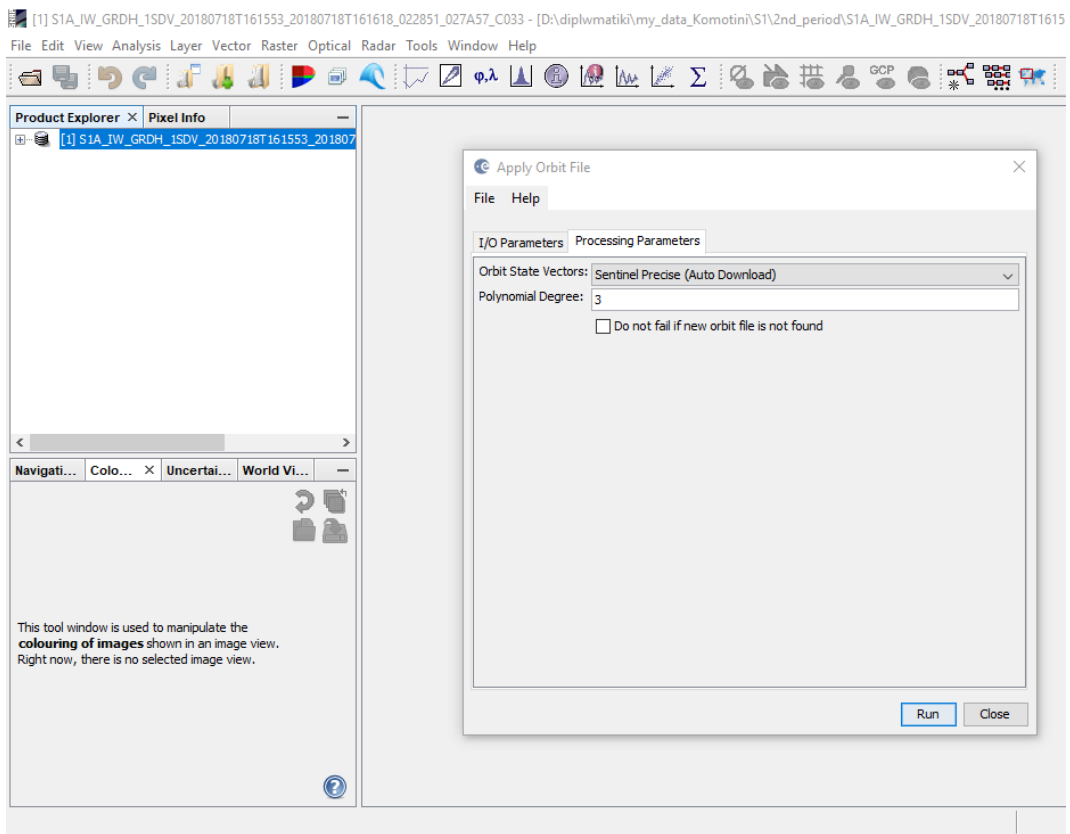
Για την είσοδο των εικόνων Sentinel-1 στο MULESME, απαιτείται προεπεξεργασία (ενότητα 6.3.1), η οποία πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το ελεύθερο λογισμικό SNAP (έκδοση 6.0.10).

Εφαρμογή Αρχείου Τροχιάς (Apply Orbit File)

Τα προϊόντα Sentinel-1, για τη γρήγορη διάθεσή τους στο κοινό, διαθέτουν πληροφορίες τροχιάς οι οποίες έχουν συλλεγεί με χρήση συστήματος πλοήγησης, επί των δορυφόρων. Η λειτουργία apply orbit file, επιτρέπει την εφαρμογή πληροφοριών ακριβούς (precise) τροχιάς στις εικόνες, οι οποίες είναι διαθέσιμες έπειτα από 20 ημέρες από την ημερομηνία διάθεσης των εικόνων. Η εφαρμογή των πληροφοριών ακριβούς τροχιάς, είναι σημαντική για την ποιότητα όλων των σταδίων προεπεξεργασίας των εικόνων SAR, κυρίως για το στάδιο της γεωαναφοράς και για αυτόν τον λόγο εφαρμόζεται πριν από οποιοδήποτε στάδιο προεπεξεργασίας.

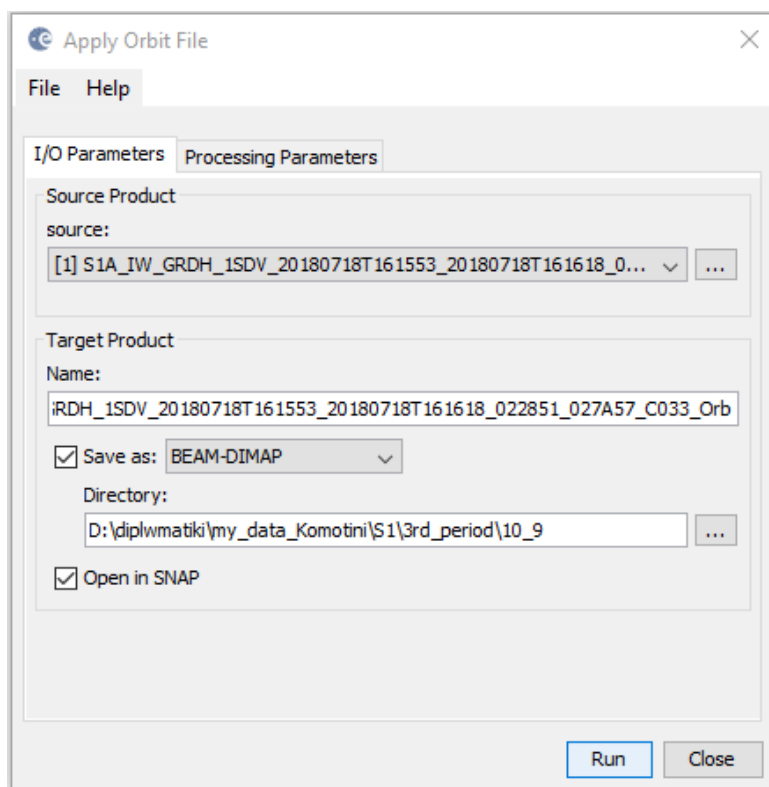
Έπειτα από τη λήψη μιας εικόνας, μέσω της πλατφόρμας Copernicus Open Access Hub, το αρχείο εισάγεται στο λογισμικό SNAP, σε μορφή zip (ίδια μορφή με αυτή της διάθεσης του αρχείου), χωρίς να απαιτείται κάποια επεξεργασία και επιλέγοντας τις εντολές **File** ➔ **Open Product**.

Έπειτα από την επιλογή του αρχείου εικόνας που επιθυμεί ο χρήστης, επιλέγονται οι εντολές **Radar** και **Apply orbit file**. Στο παράθυρο που εμφανίζεται, στην καρτέλα **Processing Parameters**, επιλέγονται οι παράμετροι όπως φαίνεται στην εικόνα 31.



Εικόνα 31: Παράμετροι επεξεργασίας, εντολής εφαρμογής αρχείου τροχιών.

Στη συνέχεια, στην καρτέλα **I/O Parameters**, επιλέγεται το όνομα και η θέση του νέου αρχείου εικόνας που θα δημιουργηθεί μετά την επεξεργασία της εικόνας και επιλέγεται η εντολή **Run**.

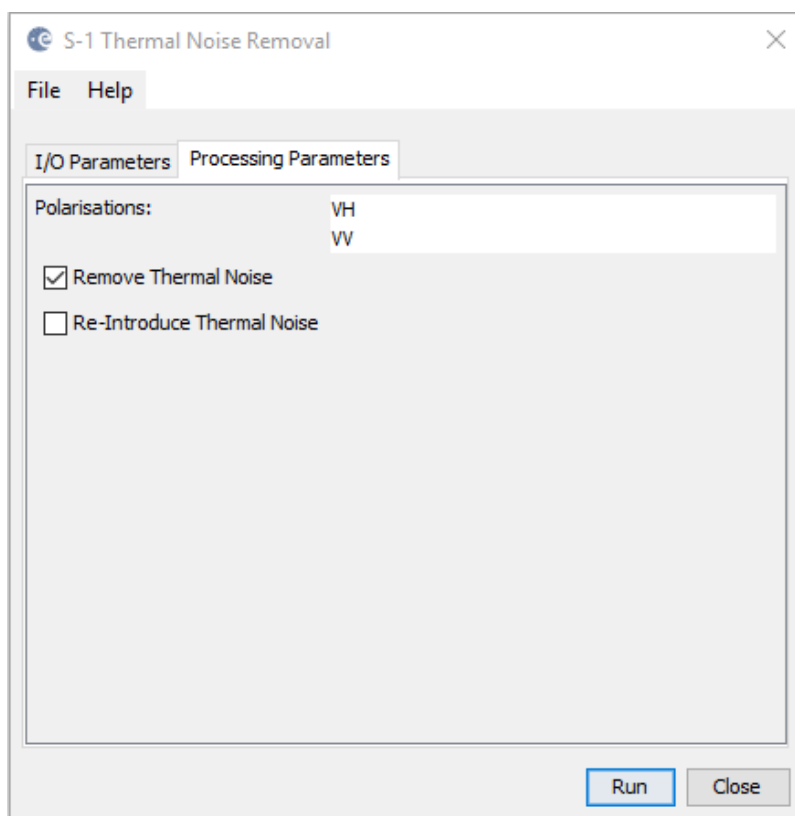


Εικόνα 32: Επιλογή θέσης και ονόματος του αρχείου που δημιουργείται έπειτα από την επεξεργασία της εικόνας.

Αφαίρεση Θερμικού Θορύβου (Thermal Noise Removal)

Ο θερμικός θόρυβος μιας εικόνας SAR, προκαλείται από την τυχαία διακύμανση της τάσης εντός του ηλεκτρικού κυκλώματος μιας κεραίας SAR και δεν σχετίζεται με το επιστρεφόμενο σήμα της κεραίας (όπως το φαινόμενο της κηλίδωσης). Εμφανίζεται σε όλη την έκταση της εικόνας και επιδρά στην ποιότητα των δεδομένων και για τον λόγο αυτό θα πρέπει να εφαρμόζονται διαδικασίες αφαίρεσης του.

Η εφαρμογή του κάθε σταδίου επεξεργασίας, θα πρέπει να γίνει στο αρχείο που δημιουργήθηκε από την εφαρμογή του προηγούμενου σταδίου. Έπειτα λοιπόν από την επιλογή στο αριστερό παράθυρο του SNAP (Product Explorer), του αρχείου εικόνας που προέκυψε από την εφαρμογή της εντολής Apply Orbit File, επιλέγεται η εντολή **Radar** ⇒ **Radiometric** ⇒ **S-1 Thermal Noise Removal**. Στην καρτέλα **Processing Parameters**, επιλέγονται οι παράμετροι όπως φαίνονται στην εικόνα 33.



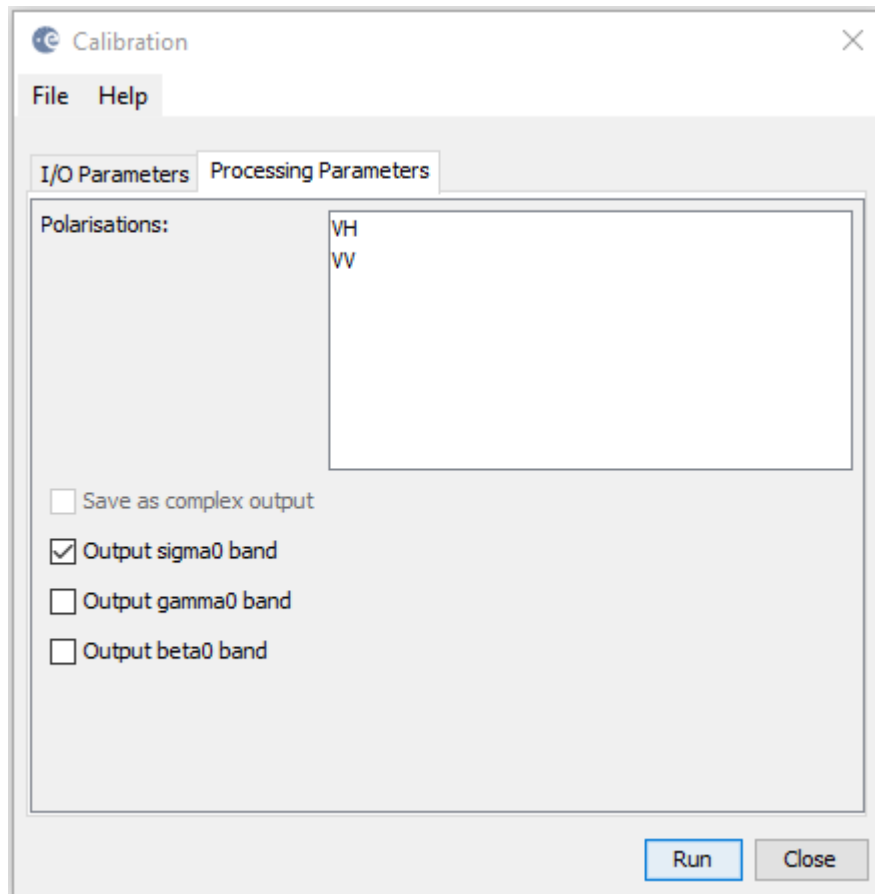
Εικόνα 33: Παράμετροι επεξεργασίας, εντολής αφαίρεσης θερμικού θορύβου.

Στη συνέχεια όπως και σε όλα τα στάδια επεξεργασίας, επιλέγεται το όνομα και η θέση του νέου αρχείου που θα δημιουργηθεί έπειτα από την εφαρμογή του σταδίου της αφαίρεσης του θερμικού θορύβου.

Βαθμονόμηση (Calibration)

Οι εικόνες SAR δεν διατίθενται διορθωμένες ραδιομετρικά. Οι τιμές των εικονοστοιχείων των εικόνων, είναι αποθηκευμένες σαν ψηφιακοί αριθμοί (Digital Numbers DN). Με την ραδιομετρική βαθμονόμηση, μετατρέπονται οι τιμές των εικονοστοιχείων σε τιμές οπισθοσκέδασης.

Για την εφαρμογή του συγκεκριμένου σταδίου, αφού επιλεγεί από το αριστερό παράθυρο (Product Explorer), το αρχείο που δημιουργήθηκε από την επεξεργασία του προηγούμενου σταδίου, επιλέγονται οι εντολές **Radar** ⇒ **Radiometric** ⇒ **Calibrate**. Στην καρτέλα **Processing Parameters**, επιλέγονται οι παράμετροι όπως φαίνονται στην εικόνα 34.



Εικόνα 34: Παράμετροι επεξεργασίας, εντολής ραδιομετρικής βαθμονόμησης.

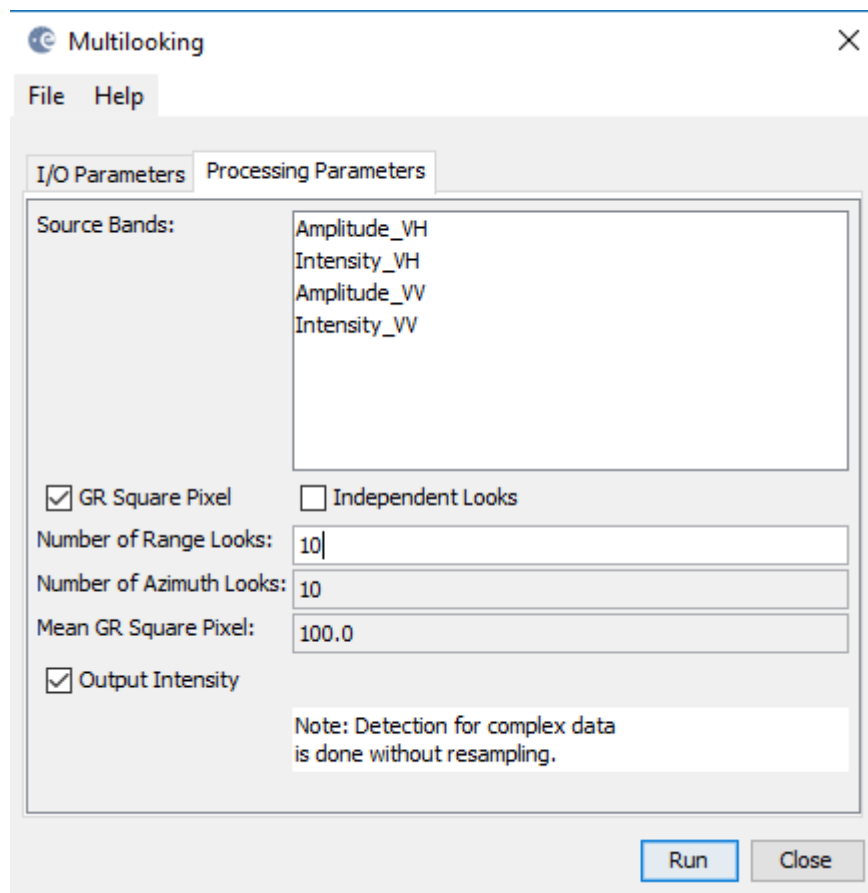
Επιλέγεται μόνο η εξαγωγή των τιμών του συντελεστή σ^0 , καθώς μόνο οι τιμές του συγκεκριμένου συντελεστή οπισθοσκέδασης θα χρησιμοποιηθούν μετέπειτα για την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας.

Στη συνέχεια, επιλέγεται το όνομα και η θέση του νέου αρχείου που θα δημιουργηθεί έπειτα από την εφαρμογή του σταδίου της ραδιομετρικής βαθμονόμησης.

Multi-looking

Το στάδιο προεπεξεργασίας των εικόνων Multi-looking, εφαρμόζεται για τη μείωση του φαινομένου της κηλίδωσης, το οποίο οφείλεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος RADAR και μειώνει την ποιότητα των δεδομένων.

Για την εφαρμογή του συγκεκριμένου σταδίου, αφού επιλεγεί από το αριστερό παράθυρο (Product Explorer), το αρχείο που δημιουργήθηκε από την επεξεργασία του προηγούμενου σταδίου, επιλέγονται οι εντολές **Radar** ⇒ **Multilooking**. Στην καρτέλα **Processing Parameters**, επιλέγονται οι παράμετροι όπως φαίνονται στην εικόνα 35, προκειμένου να δημιουργηθούν τετραγωνικά εικονοστοιχεία διαστάσεων 100 x 100 m².



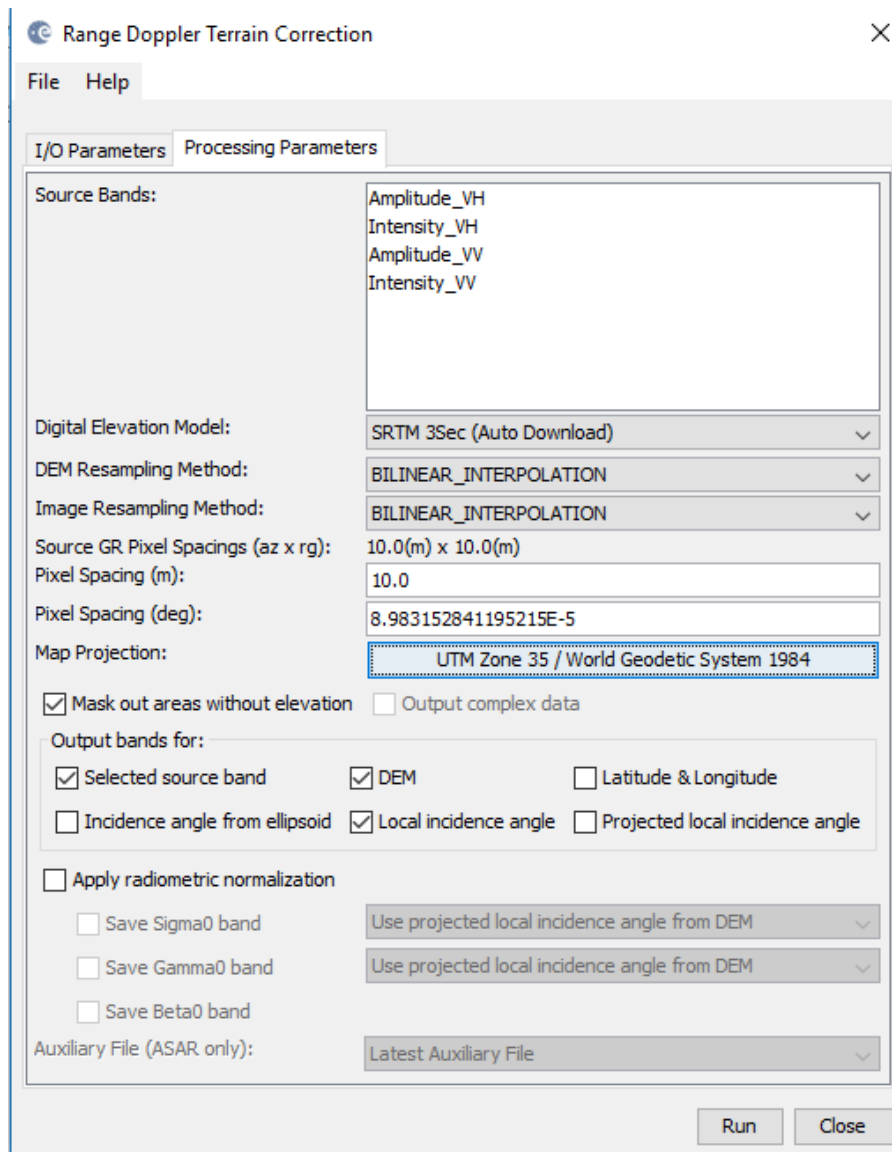
Εικόνα 35: Παράμετροι επεξεργασίας, εντολής Multi-looking.

Στη συνέχεια, επιλέγεται το όνομα και η θέση του νέου αρχείου που θα δημιουργηθεί έπειτα από την εφαρμογή του σταδίου Multi-looking.

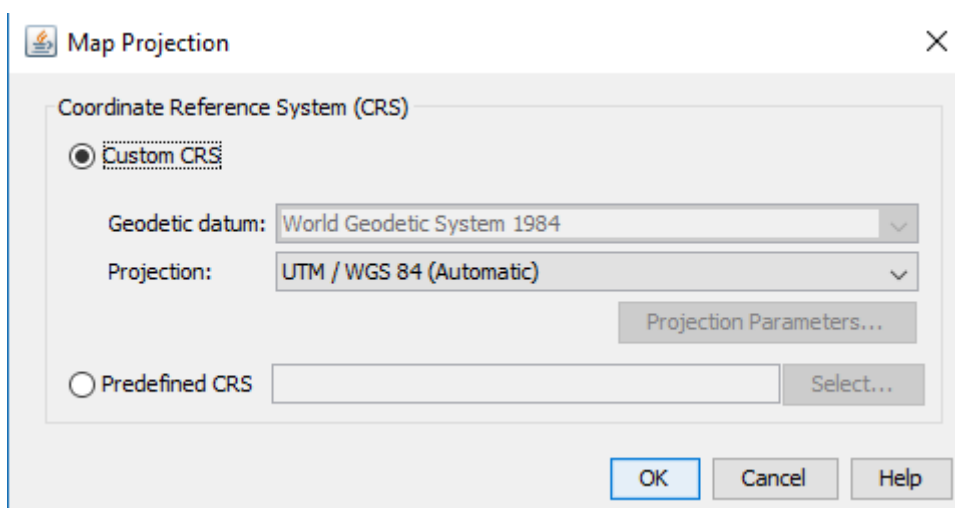
Διόρθωση Εδάφους (Terrain Correction)

Η διόρθωση εδάφους ή γεωμετρική διόρθωση, πραγματοποιείται προκειμένου τα εικονοστοιχεία της προς επεξεργασία εικόνας να τοποθετηθούν σε γεωγραφικές θέσεις με συντεταγμένες που ορίζονται από ένα σύστημα αναφοράς. Για την εφαρμογή αυτής της διαδικασίας, απαιτείται η χρήση Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, το οποίο λαμβάνεται αυτόματα από το SNAP.

Για την εφαρμογή του συγκεκριμένου σταδίου, αφού επιλεγεί από το αριστερό παράθυρο (Product Explorer), το αρχείο που δημιουργήθηκε από την επεξεργασία του προηγούμενου σταδίου, επιλέγονται οι εντολές **Radar** ⇒ **Geometric** ⇒ **Terrain Correction** ⇒ **Range Doppler Terrain Correction**. Στην καρτέλα **Processing Parameters**, επιλέγονται οι παράμετροι όπως φαίνονται στην εικόνα 36. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι επιλέγοντας το πεδίο **Map Projection**, εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου, στο οποίο θα πρέπει να επιλεγεί το σύστημα αναφοράς UTM/WGS84 (Automatic) (Εικόνα 37). Μετά την επιλογή, εμφανίζεται αυτόματα η ζώνη του συστήματος UTM, της προς επεξεργασία εικόνας. Οι εικόνες της περιοχής μελέτης, ανήκουν στη ζώνη 35.

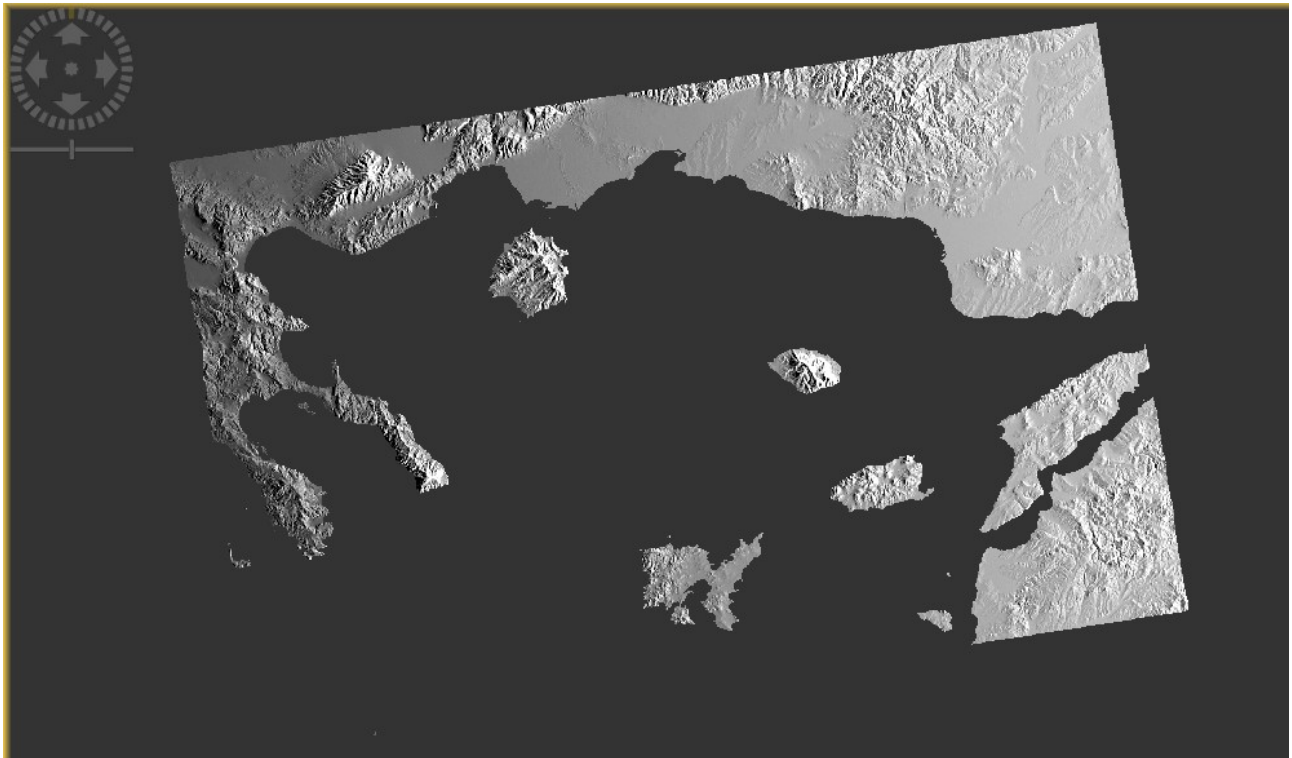


Εικόνα 36: Παράμετροι επεξεργασίας, εντολής Range Doppler Terrain Correction.



Εικόνα 37: Παράθυρο διαλόγου επιλογής γεωγραφικού συστήματος αναφοράς.

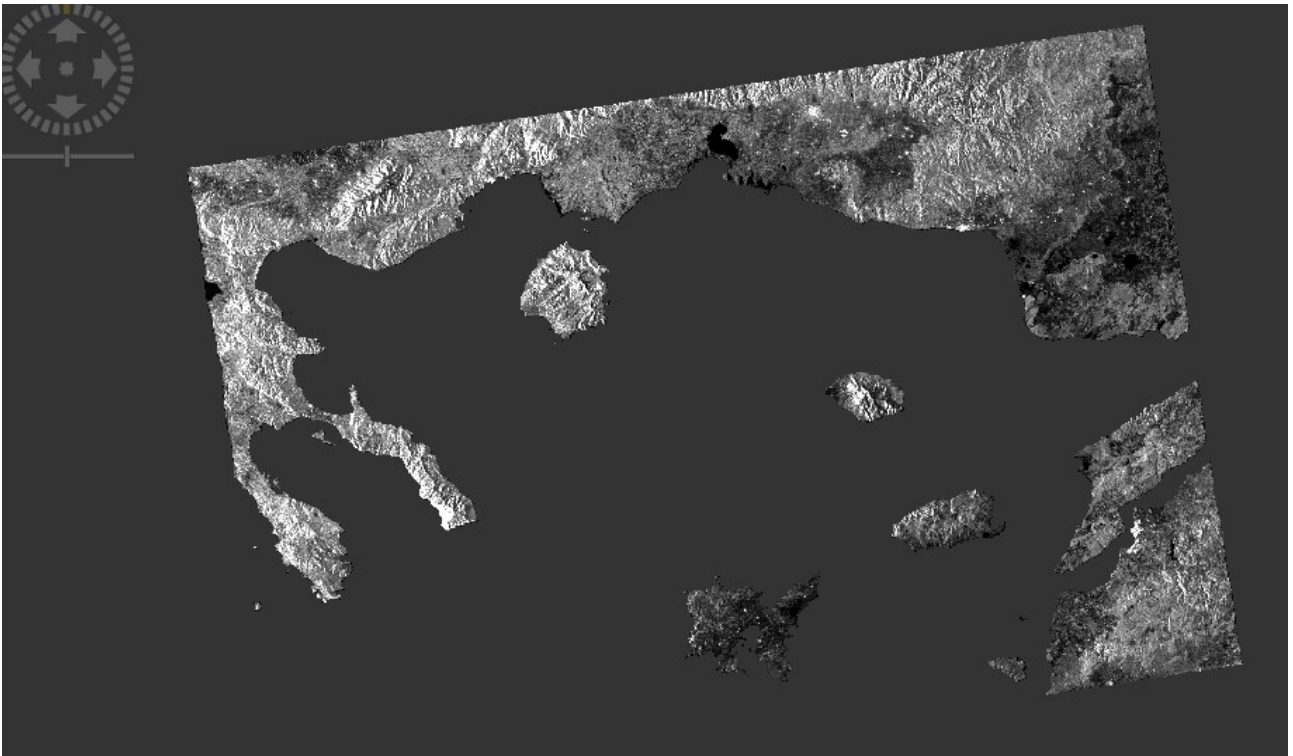
Επιπλέον, όπως φαίνεται στην εικόνα 36, μέσω της επιλογής του πεδίου Local Incidence angle, δίνεται η δυνατότητα της εξαγωγής του χάρτη τοπικών γωνιών πρόσπτωσης κατά την διαδικασία της γεωμετρικής διόρθωσης, ο οποίος αποτελεί ένα από τα δεδομένα εισόδου του MULESME (6.3.1). Ο χάρτης τοπικών γωνιών πρόσπτωσης είναι ίδιος για όλες της εικόνες SAR που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς όλες ανήκουν στην σχετική τροχιά 29 και έχουν το ίδιο εδαφικό αποτύπωμα. Συνεπώς, ο συγκεκριμένος χάρτης δημιουργήθηκε μια φορά και χρησιμοποιήθηκε για όλες τις εκτιμήσεις εδαφικής υγρασίας. Κάθε φορά που αλλάζει η περιοχή μελέτης, ο χρήστης θα πρέπει να εξάγει νέο χάρτη τοπικών γωνιών πρόσπτωσης.



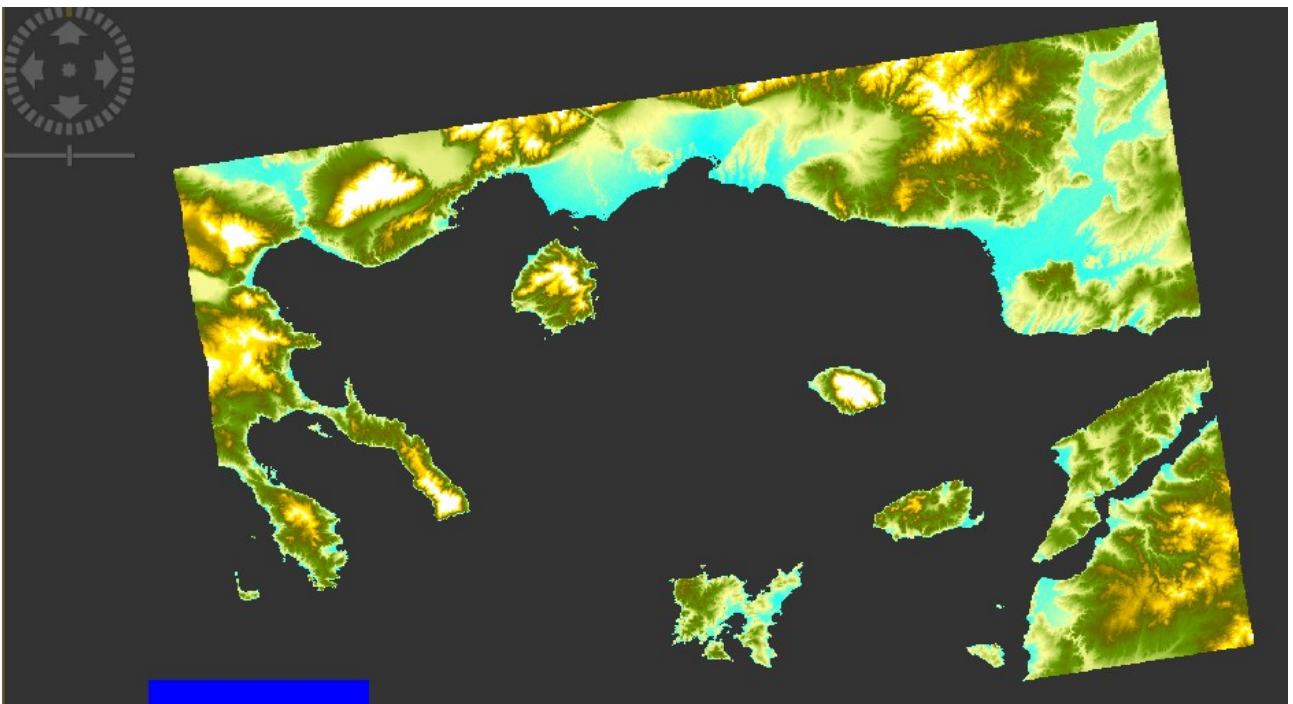
Εικόνα 38: Χάρτης τοπικών γωνιών πρόσπτωσης περιοχής μελέτης.

Η εικόνα που δημιουργείται από τη διαδικασία της διόρθωσης εδάφους, αποτελεί την τελική εικόνα SAR που δέχεται ως είσοδο το MULESME και είναι στην προκαθορισμένη μορφή αρχείων BEAM-DIMAP του SNAP. Η εικόνα διαθέτει τα παρακάτω κανάλια:

- SigmaO_VH, το οποίο περιέχει τις τιμές οπισθοσκέδασης σε πόλωση VH
- SigmaO_VV, το οποίο περιέχει τις τιμές οπισθοσκέδασης σε πόλωση VV
- elevation, το οποίο περιέχει την πληροφορία υψομέτρου
- localIncidenceAngle, το οποίο περιέχει τον χάρτη τοπικών γωνιών πρόσπτωσης



Εικόνα 39: Κανάλι τιμών οπισθοσκέδασης πόλωσης VH.



Εικόνα 40: Κανάλι υψομετρικών τιμών.

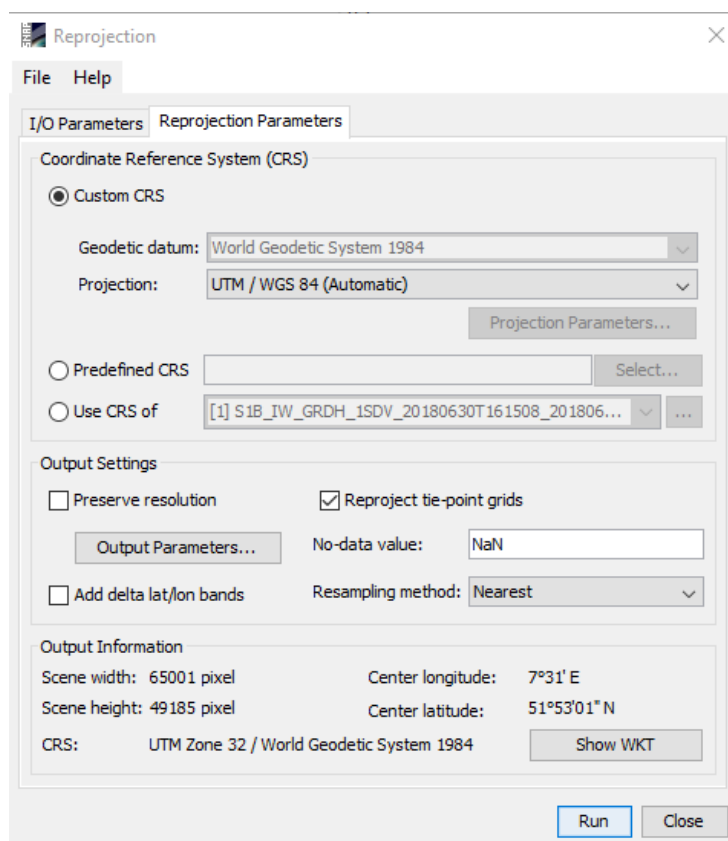
7.3. Βοηθητικά Δεδομένα

7.3.1. Χάρτης Κάλυψης Γης

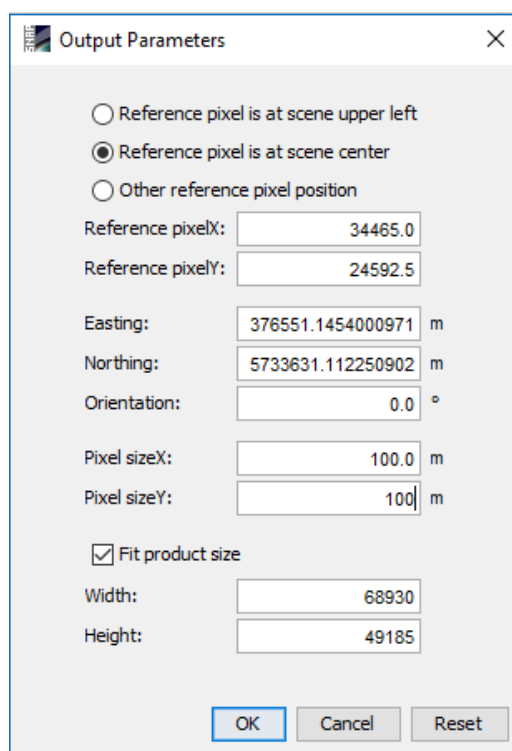
Για την κατασκευή του χάρτη κάλυψης γης, ο οποίος αποτελεί ένα από τα δεδομένα εισόδου του MULESME (ενότητα 6.3.1), χρησιμοποιήθηκε ο ελεύθερα διαθέσιμος χάρτης Corine Land Cover 2012 v.20 (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012?tab=download>). **Οι χάρτες κάλυψης γης και κλίσεων, θα πρέπει να έχουν διαστάσεις εικονοστοιχείων 100x100 m², χαρτογραφική προβολή UTM/WGS84 και τον ίδιο αριθμό γραμμών και στηλών.** Ο χάρτης Corine καλύπτει την ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης, η διάσταση των εικονοστοιχείων του είναι 100x 100 m² και το σύστημα αναφοράς του είναι το ETRS89, όπως λαμβάνεται από την ηλεκτρονική πλατφόρμα. Συνεπώς, για την κατασκευή του χάρτη εισόδου στο λογισμικό, θα πρέπει να γίνει επαναπροβολή του σε σύστημα αναφοράς UTM/WGS84. Στη συνέχεια, για μείωση του χρόνου επεξεργασίας, ο χάρτης κάλυψης θα πρέπει να προσαρμοστεί στις διαστάσεις της περιοχής μελέτης. Ο χάρτης κάλυψης έχει διαφορετικές (μεγαλύτερες) διαστάσεις από τις εικόνες SAR όταν γίνεται χρήση του MULESME σε εθνική κλίμακα, εφόσον όμως η επεξεργασία των εικόνων για την παρούσα εργασία, γίνεται σε ένα μόνο τμήμα (slice) εικόνας Sentinel-1, προκειμένου να προσαρμοστεί ο χάρτης κάλυψης στις διαστάσεις της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιήθηκε ως εικόνα αναφοράς ένα από τα κανάλια (SigmaO_VH, SigmaO_VV, elevation και localIncidenceAngle) μίας από τις εικόνες SAR που δημιουργήθηκαν από την προεπεξεργασία στο λογισμικό SNAP (ενότητα 7.2.1).

Για την επαναπροβολή του χάρτη κάλυψης γης, χρησιμοποιήθηκε η εντολή **Raster** ⇒ **Geometric Operations** ⇒ **Reprojection** του SNAP, επιλέγοντας όπως και για τη γεωμετρική διόρθωση των εικόνων, στην καρτέλα **Reprojection Parameters** (εικόνα 41), την χαρτογραφική προβολή UTM/WGS84 (Automatic) (Εικόνα 37). Στην καρτέλα **Output Parameters** επιλέγονται οι διαστάσεις των εικονοστοιχείων του χάρτη, οι οποίες θα πρέπει να είναι 100x100 m² (εικόνα 42). Για τη μείωση του χρόνου επεξεργασίας της εντολής **Reprojection**, μπορεί να χρησιμοποιηθεί πριν από αυτή, η εντολή **Raster** ⇒ **Subset**, προκειμένου να μειωθεί ο όγκος του αρχικού χάρτη κάλυψης γης.

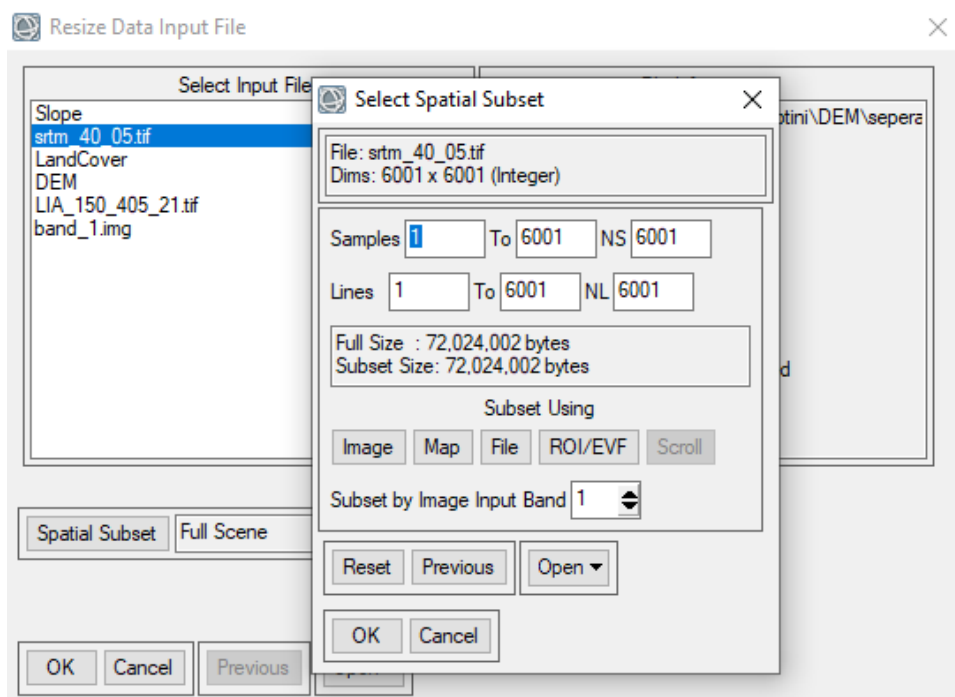
Για την προσαρμογή του χάρτη κάλυψης γης στις διαστάσεις της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο **Resize Data** του λογισμικού ENVI (έκδοση 5.2), χρησιμοποιώντας ως εικόνα αναφοράς (για τις διαστάσεις της προσαρμογής), τον χάρτη τοπικών γωνιών πρόσπτωσης της εικόνας 04/9/2018, μέσω του πεδίου **Spatial Subset** (εικόνα 43) . Ο τελικός χάρτης κάλυψης γης (εικόνα 44), προκειμένου να εισαχθεί στο MULESME, θα πρέπει να αποθηκευτεί σε μορφή **hdr**, η οποία είναι και η προκαθορισμένη μορφή αποθήκευσης των αρχείων του προγράμματος ENVI. Ο χάρτης κάλυψης γης, κατασκευάστηκε μια μόνο φορά και χρησιμοποιήθηκε για όλες τις εκτιμήσεις εδαφικής υγρασίας.



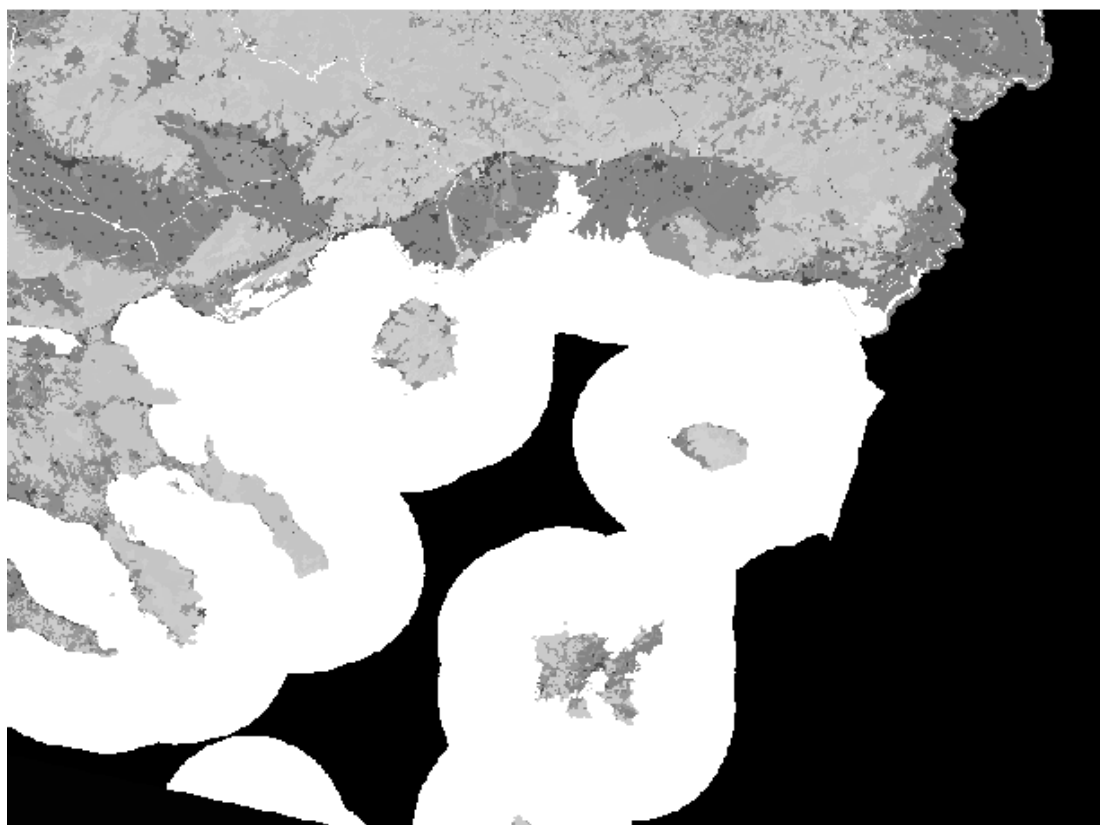
Εικόνα 41: Παράμετροι εντολής Reprojection.



Εικόνα 42: Παράμετροι χάρτη εξόδου, εντολής Reprojection.



Εικόνα 43: Παράμετροι εντολής **Resize Data**, λογισμικού ENVI.



Εικόνα 44: Τελικός χάρτης κάλυψης γης, για την εισαγωγή στο MULESME.

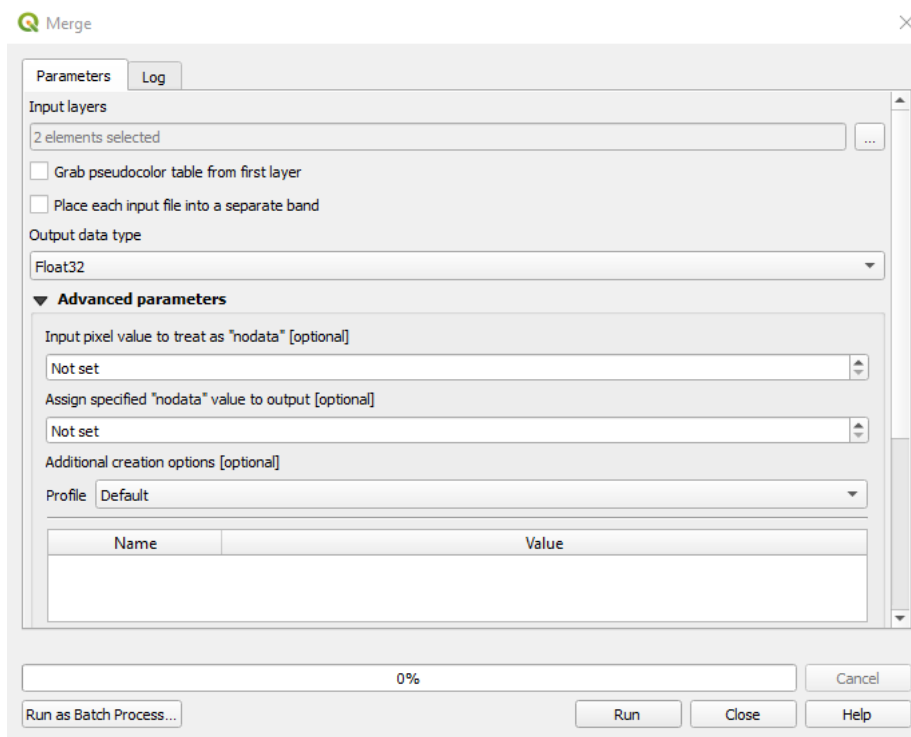
7.3.2. Χάρτης Τοπογραφικής Κλίσης

Για την κατασκευή του χάρτη τοπογραφικής κλίσης, χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερα διαθέσιμο ψηφιακό μοντέλο εδάφους ("ΨΜΕ) SRTM . Η αναζήτηση των αρχείων του ΨΜΕ, στην ηλεκτρονική πλατφόρμα αναζήτησης (<http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>), πραγματοποιείται είτε με αρχεία με μέγεθος κανάβου 5 x 5 μοίρες, είτε 30 x 30 μοίρες. Για την αποφυγή μεγάλου μεγέθους αρχείων, επιλέχθηκε ο κανάβος των 5 x 5 μοιρών.

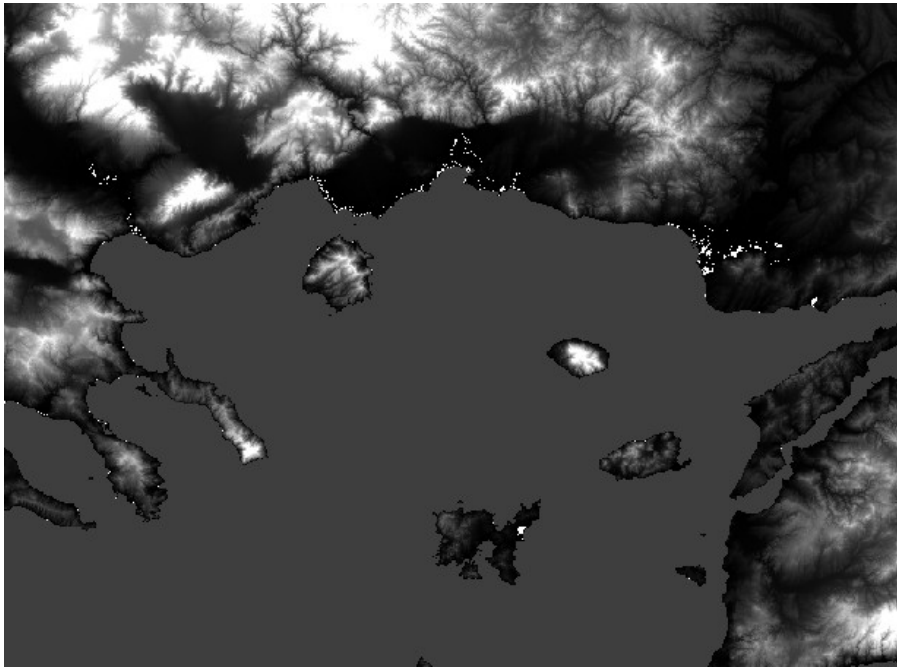
Για την κάλυψη της περιοχής μελέτης, απαιτήθηκαν παραπάνω του ενός αρχείου raster ΨΜΕ, τα οποία πρέπει να συνενωθούν σε ένα αρχείο. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο **Merge (Ratser ⇒ Miscellaneous ⇒ Merge)**, της βιβλιοθήκης GDAL της Python, μέσω του ελεύθερα διαθέσιμου λογισμικού QGIS (έκδοση 6.3.1-Noosa). Στην καρτέλα **Parameters**, επιλέγονται τα αρχεία raster που επιθυμεί ο χρήστης να συνενωθούν σε ένα αρχείο (εικόνα 45) .

Στη συνέχεια, το αρχείο που προέκυψε από τη συνένωση, εισάγεται στο λογισμικό SNAP, προκειμένου να γίνει η επαναπροβολή του με χρήση της εντολής **Reprojection**, όπως και για την επαναπροβολή του χάρτη κάλυψης γης, επιλέγοντας σύστημα αναφοράς UTM/WGS84 (automatic) (ενότητα 7.3.1). Επιπλέον, τα αρχεία raster του ΨΜΕ SRTM, όπως διατίθενται, έχουν μέγεθος εικονοστοιχείου 30 x 30 m² (για αυτά που ανήκουν στη ζώνη του Ισημερινού), συνεπώς στην καρτέλα Output Parameters (εικόνα 42), θα πρέπει να επιλεγεί διάσταση εικονοστοιχείου 100 x 100 m².

Έπειτα, το αρχείο του ΨΜΕ που δημιουργήθηκε από την επαναπροβολή, εισάγεται στο λογισμικό ENVI, προκειμένου με την εντολή **Resize Data** (εικόνα 43), να προσαρμοστεί στις διαστάσεις της περιοχής μελέτης (εικόνα 46).

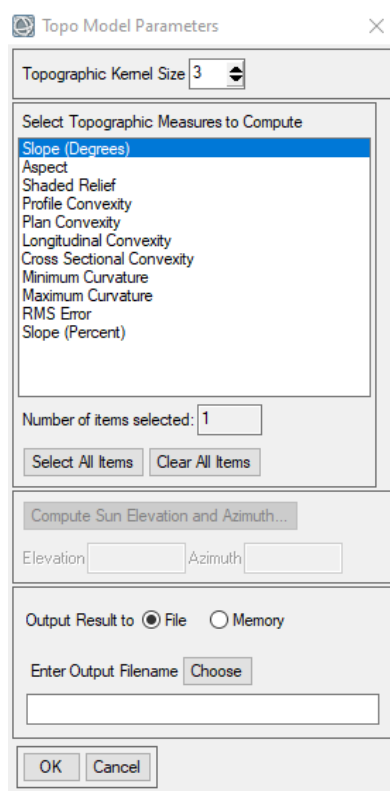


Εικόνα 45: Παράμετροι εντολής Merge, λογισμικού QGIS.

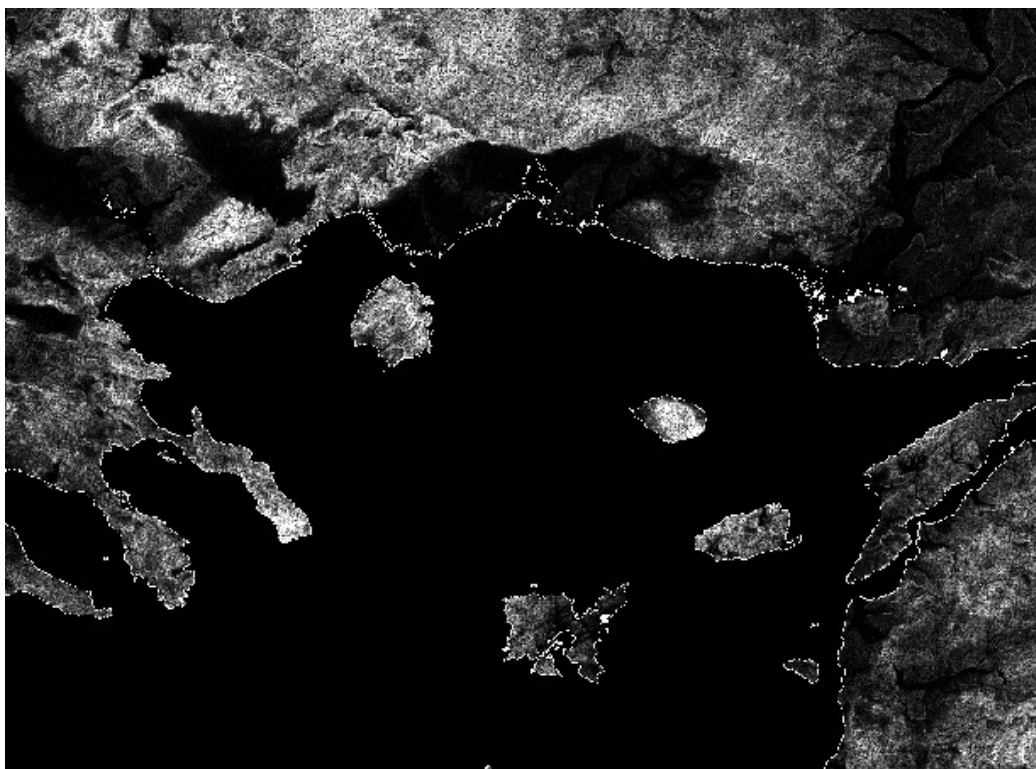


Εικόνα 46: ΨΜΕ προσαρμοσμένο στις διαστάσεις της περιοχής μελέτης.

Το τελικό βήμα για την κατασκευή του χάρτη κλίσεων, είναι η χρήση του εργαλείου **Topographic Modeling** του λογισμικού SNAP. Στην καρτέλα Topo Model Parameters, θα πρέπει να επιλεγεί Slope (Degrees), καθώς το MULESME χρησιμοποιεί τις τιμές γωνιών για τις διάφορες λειτουργίες του, σε μοίρες (εικόνα 47). Τέλος, το αρχείο θα πρέπει να αποθηκευτεί σε μορφή hdr, ώστε να μπορεί να εισαχθεί στο MULESME.



Εικόνα 47: Παράμετροι εργαλείου Topographic Modeling, λογισμικού ENVI.



Εικόνα 48: Τελικός χάρτης τοπογραφικής κλίσης, για την εισαγωγή στο MULESME.

7.3.3. Χάρτης τοπικών γωνιών πρόσπτωσης

Ο χάρτης τοπικών γωνιών πρόσπτωσης, δημιουργείται κατά τη διαδικασία της διόρθωσης εδάφους (ενότητα 7.2.1). Όταν το MULESME χρησιμοποιείται σε εθνική κλίμακα, θα πρέπει να επεξεργαστούν περισσότερες της μίας εικόνας Sentinel-1, προκειμένου να καλυφθεί όλη η περιοχή μελέτης και συνεπώς θα πρέπει να εισαχθούν ως δεδομένα εισόδου, ένας χάρτης τοπικών γωνιών πρόσπτωσης για κάθε εικόνα Sentinel-1. Οι δημιουργοί του λογισμικού, για την εφαρμογή του στην κλίμακα της Ιταλικής επικράτειας, κατασκεύασαν και αποθήκευσαν όλους τους χάρτες τοπικών γωνιών πρόσπτωσης που αντιστοιχούν σε αυτήν, κατά τη φάση σχεδιασμού του λογισμικού. Λόγω των χαρακτηριστικών της λειτουργίας απόκτησης δεδομένων IW (ενότητα 2.2.4), οι συντεταγμένες του κεντρικού εικονοστοιχείου και ο αριθμός σχετικής τροχιάς, των κομματιών (slice) εικόνας Sentinel-1, είναι γνωστές εκ των προτέρων. Για την χρήση του αντίστοιχου χάρτη τοπικών γωνιών πρόσπτωσης, για κάθε τμήμα (slice) που επεξεργάζεται, οι δημιουργοί ονόμασαν τα αρχεία των χαρτών τοπικών γωνιών πρόσπτωσης, σύμφωνα με τον αριθμό σχετικής τροχιάς τους και τις συντεταγμένες του κεντρικού τους εικονοστοιχείου (όνομα αρχείου: LIA_Orb_Lat_Long). Οπότε για κάθε εικόνα που επεξεργάζεται, επιλέγεται από τον αλγόριθμο του προγράμματος το αρχείο του χάρτη τοπικών γωνιών πρόσπτωσης που έχει ίδιο αριθμό σχετικής τροχιάς με την εικόνα και ταυτόχρονα τις πλησιέστερες συντεταγμένες κεντρικού εικονοστοιχείου.

Για την παρούσα εργασία, η εφαρμογή του αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε σε ένα μόνο κομμάτι (slice) εικόνας Sentinel-1, κάθε φορά. Εντούτοις, το όνομα αρχείου του χάρτη τοπικών γωνιών πρόσπτωσης που χρησιμοποιήθηκε, μετονομάστηκε σύμφωνα με τον τρόπο ονομασίας αυτών των αρχείων, που επιλέχθηκε από τους δημιουργούς του MULESME (όνομα αρχείου: LIA_29_404_25), για λόγους αποφυγής σφαλμάτων κατά την εφαρμογή του κώδικα.

7.3.4. Lookup Table

Για την εφαρμογή MULESME στην περιοχή μελέτης, χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος Lookup Table με αυτόν που κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε από τους δημιουργούς του προγράμματος, χωρίς κάποια τροποποίηση.

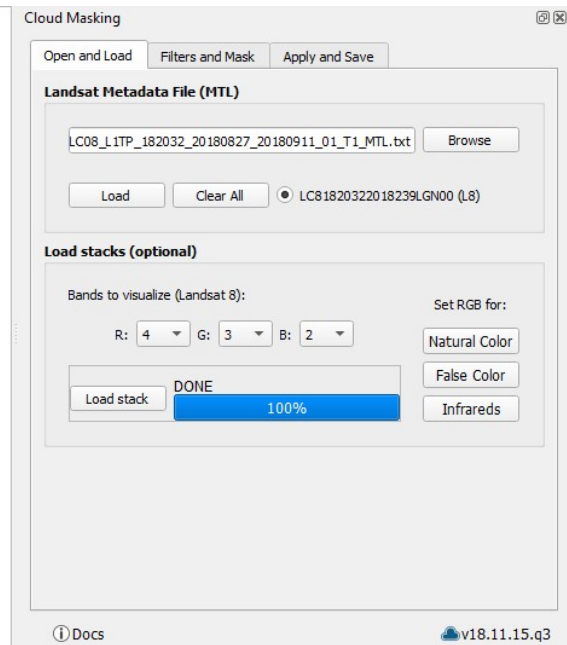
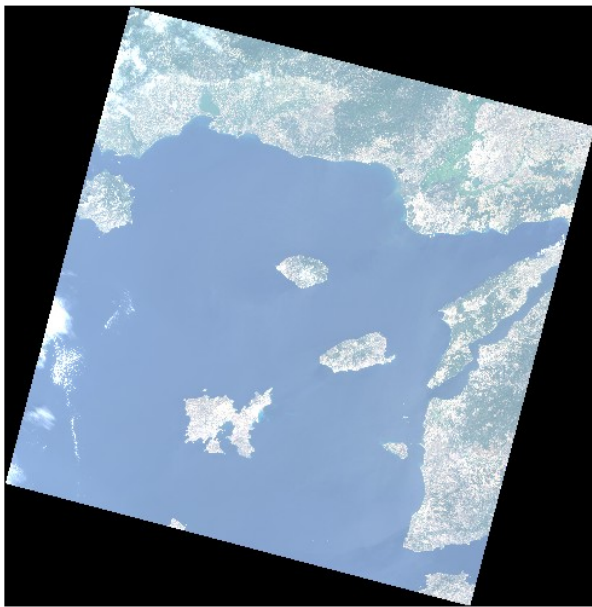
7.3.5. Χάρτης Περιεκτικότητας Νερού των Φυτών

Για τη δημιουργία του χάρτη περιεκτικότητας νερού των φυτών από τον δευτερεύοντα επεξεργαστή (ενότητα 6.2.1), απαιτείται η είσοδος στο MULESME από τον χρήστη, μιας εικόνα οπτικού δέκτη. Η εικόνα αυτή, μπορεί να προέρχεται από τους οπτικούς πολυφασματικούς αισθητήρες των δορυφόρων Landsat8, Sentinel-2 ή MODIS. Οι οπτικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία, είναι οι ελεύθερα διαθέσιμες εικόνες του Landsat 8 OLI/TIRS C1, επιπέδου Level-1, μέσω ηλεκτρονικής πλατφόρμας (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Ο χάρτης περιεκτικότητας νερού των φυτών, κατασκευάζεται αυτόματα από τον δευτερεύοντα επεξεργαστή, χωρίς να απαιτείται κάποια ενέργεια από τον χρήστη, εκτός από την αποσυμπίεση του αρχείου με τα κανάλια της εικόνας, όπως λαμβάνεται από την ηλεκτρονική πλατφόρμα. Μέρος αυτής της αυτοματοποιημένης διαδικασίας που διεξάγεται από τον αλγόριθμο του λογισμικού, είναι η αναγνώριση και η κάλυψη των εικονοστοιχείων, οι τιμές ανακλαστικότητας των οποίων, αντιστοιχούν σε νεφοκάλυψη (ενότητα 6.2.1). Η αναγνώριση αυτών των εικονοστοιχείων, γίνεται μέσω της εφαρμογής του αλγορίθμου Fmask (Zhu et al., 2015; Zhu and Woodcock, 2012), ο οποίος υλοποιείται μέσω της εντολής **Calculate Cloud Mask For Product**, της γλώσσας προγραμματισμού IDL. Η συγκεκριμένη εντολή στον κώδικα του MULESME, μπορεί να υλοποιηθεί μόνο μέσω της χρήσης του λογισμικού ENVI, έκδοσης 5.4 και νεότερης. Η έκδοση του λογισμικού που διατέθηκε για την υλοποίηση της εργασίας, είναι η 5.2. Συνεπώς, δεν ήταν δυνατό να ολοκληρωθεί από τον δευτερεύοντα επεξεργαστή, η κατασκευή του χάρτη.

Για να ξεπεραστεί το παραπάνω πρόβλημα, χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερα διαθέσιμο εργαλείο **Cloud Masking** του QGIS, μέσω του οποίου εφαρμόζεται σε γλώσσα προγραμματισμού Python, ο αλγόριθμος Fmask.

Για την εφαρμογή του εργαλείου Cloud Masking, έπειτα από την εγκατάσταση του και το άνοιγμα του παράθυρου διαλόγου στο QGIS, επιλέγεται το αρχείο με κατάληξη MTL, του αποσυμπιεσμένου φακέλου με τα κανάλια της οπτικής εικόνας. Στην εικόνα 49, φαίνεται το παράθυρο διαλόγου (καρτέλα Open and Load) και η εικόνα Landsat 8 της 27/8/2018, σε έγχρωμο σύνθετο φυσικών χρωμάτων (R-G-B:4-3-2).



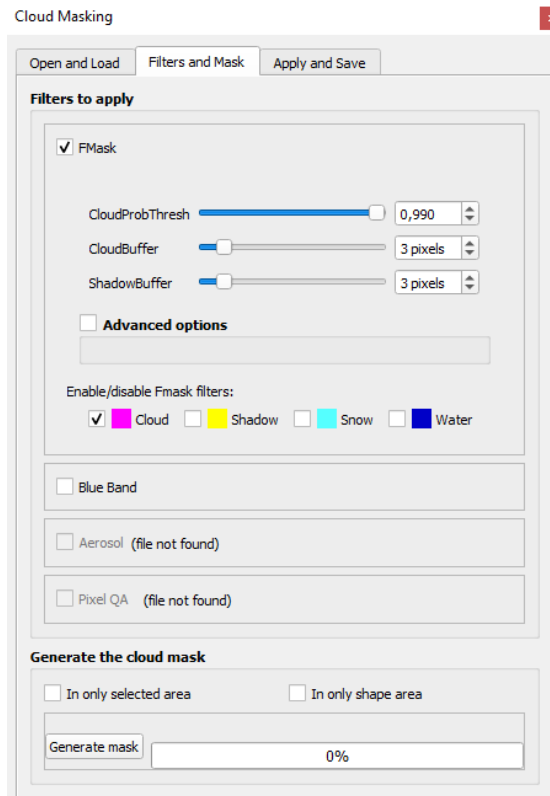
Εικόνα 49: Εικόνα Landsat 8 της 27/8/2018 και η καρτέλα Open and Load του εργαλείου Cloud Masking .

Στη συνέχεια επιλέγονται στην καρτέλα **Filters and mask**, οι παράμετροι εφαρμογής του αλγορίθμου Fmask και επιλέγεται η εντολή **Generate Mask** (εικόνα 50), οι οποίοι είναι οι ίδιοι με αυτούς που επέλεξαν οι δημιουργοί του MULESME, για την εφαρμογή της εντολής **Calculate Cloud Mask For Product**.

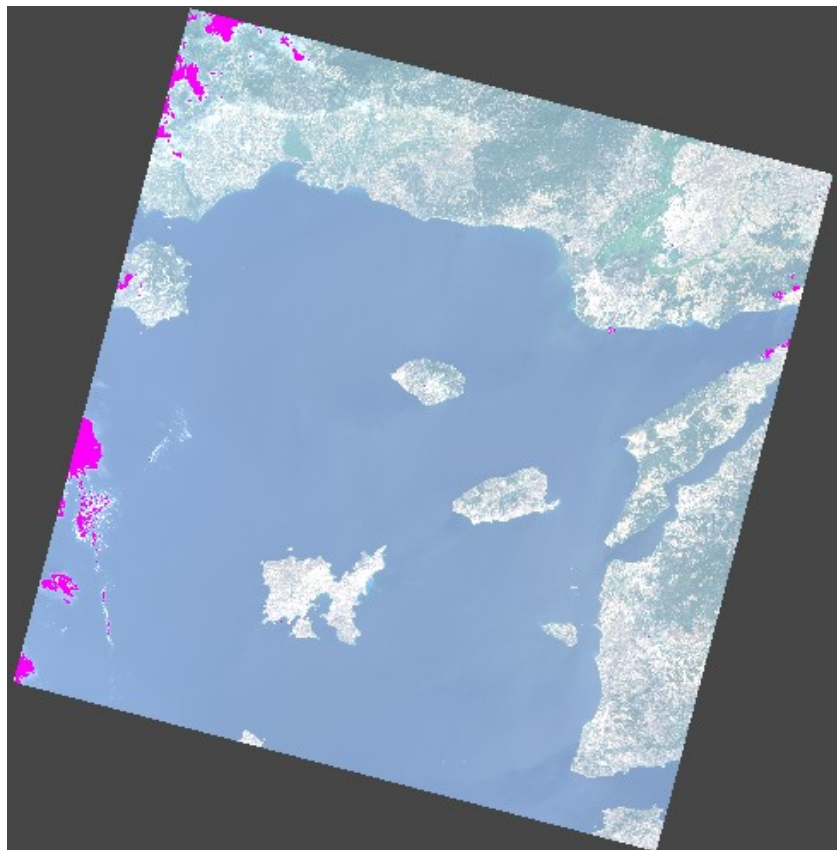
Μετά τη δημιουργία της μάσκας, επιλέγεται η καρτέλα **Apply and Save** (εικόνα 51). Προκειμένου η μάσκα που δημιουργήθηκε να μπορεί να εισαχθεί στο MULESME, πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες τροποποιήσεις στον κώδικα IDL. Σύμφωνα με αυτές, η μάσκα θα πρέπει να αποθηκευθεί μέσω της επιλογής **Save Mask**, στον φάκελο με τα υπόλοιπα κανάλια της εικόνας Landsat 8 και με όνομα αρχείου αυτό του ονόματος αρχείου της εικόνας και κατάληξη **_Fmask** και όχι τον αριθμό του καναλιού. Για παράδειγμα το αρχείο που αντιστοιχεί στην μάσκα των εικονοστοιχείων με νεφοκάλυψη της εικόνας 27/8/209, είναι:

LC08_L1TP_182032_20180827_20180911_01_T1_Fmask.TIF

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος Fmask του QGIS, δίνει διαφορετικές τιμές στα εικονοστοιχεία της εικόνας που αναγνωρίζονται ως νέφη, από την εντολή **Calculate Cloud Mask For Product**, του ENVI, οπότε τροποποιήθηκαν και οι αντίστοιχες τιμές στον αλγόριθμο του MULESME. Επίσης, το εργαλείο Fmask του QGIS, εφαρμόζεται μόνο σε εικόνες Landsat, οπότε με τις ενέργειες που περιγράφηκαν παραπάνω, δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του Wmap, οπτικές εικόνες των δορυφόρων Sentinel-2 και MODIS.



Εικόνα 50: Παράμετροι εφαρμογής αλγορίθμου Fmask του λογισμικού QGIS .



Εικόνα 51: Μάσκα εικονοστοιχείων νεφοκάλυψης (Μωβ χρώμα) .

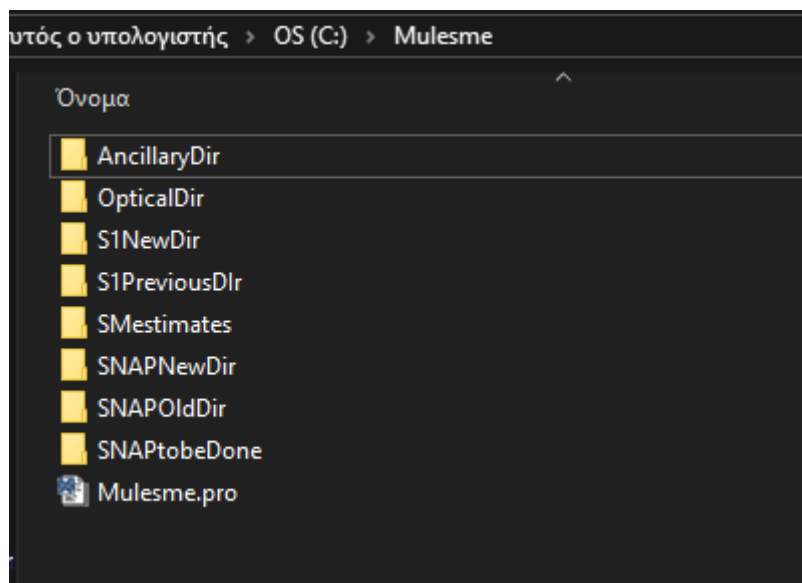
7.4. Δομή Φακέλων και Εισαγωγή Αρχείων

7.4.1. Εισαγωγή Βοηθητικών Αρχείων

Το MULESME, αποτελείται από έναν κύριο φάκελο με την ονομασία **Mulesme**, ο οποίος για να λειτουργήσει το λογισμικό, θα πρέπει να αποθηκεύεται στην θέση [C:\](#) του υπολογιστή του χρήστη. Σε αυτόν τον φάκελο, περιέχονται 7 υποφάκελοι, για την ταξινόμηση των αρχείων που διαχειρίζεται το λογισμικό, οι οποίοι θα πρέπει να είναι αποθηκευμένοι στη θέση [C:\Mulesme](#) (εικόνα 51).

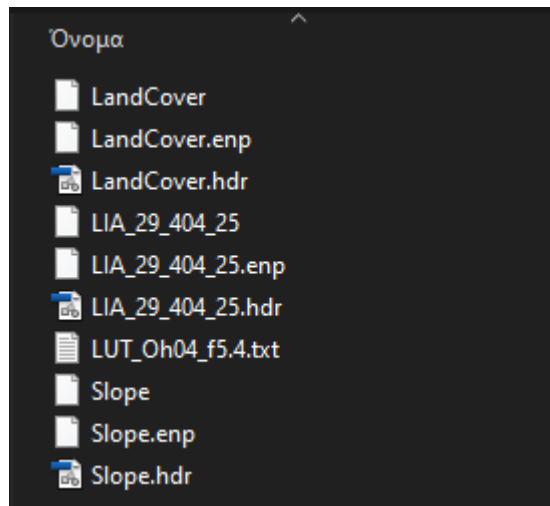
Οι υποφάκελοι είναι:

- **AncillaryDir**: όπου αποθηκεύονται τα βοηθητικά δεδομένα (Χάρτης τοπικών γωνιών πρόσπτωσης, χάρτης κάλυψης γης και χάρτης τοπογραφικής κλίσης).
- **OpticalDir**: όπου αποθηκεύονται οι οπτικές εικόνες των πολυφασματικών δεκτών
- **S1NewDir**: όπου αποθηκεύονται τα αρχεία νέων εικόνων Sentinel-1, που βρήκε αυτόματα το MULESME (για την Ιταλική επικράτεια)
- **S1PreviousDir**: όπου αποθηκεύονται τα αρχεία παλαιότερων εικόνων Sentinel-1 που βρέθηκαν αυτόματα από το MULESME για την Ιταλική επικράτεια
- **SMestimates**: όπου αποθηκεύονται οι χάρτες εκτίμησης εδαφικής υγρασίας
- **SNAPNewDir**: όπου αποθηκεύονται οι εικόνες Sentinel-1 που έχουν προεπεξεργαστεί στο λογισμικό SNAP (ενότητα 7.2.1) και είναι αυτές που θα χρησιμοποιηθούν για τις εκτιμήσεις εδαφικής υγρασίας
- **SNAPOldDir**: όπου αποθηκεύονται οι εικόνες Sentinel-1 του φακέλου SNAPNewDir, έπειτα από την επεξεργασία τους από το MULESME.



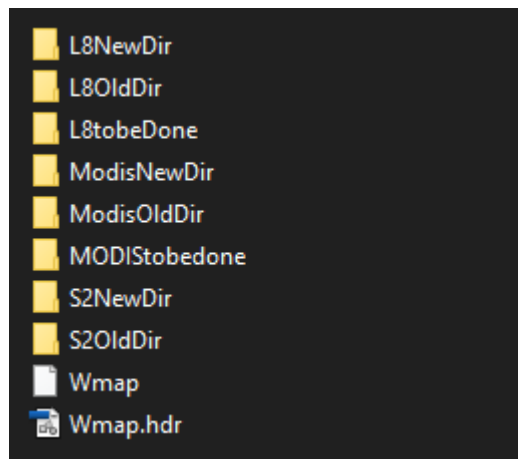
Εικόνα 52: Δομή φακέλων του MULESME .

Προκειμένου να λειτουργήσει το λογισμικό για ένα μόνο τμήμα (slice) εικόνας Sentinel-1, εκτός της Ιταλικής επικράτειας, αρχικά θα πρέπει να τοποθετηθούν τα αρχεία των βοηθητικών δεδομένων στον φάκελο AncillaryDir (εικόνα 53).



Εικόνα 53: Αρχεία βοηθητικών δεδομένων, φακέλου AncillaryDir.

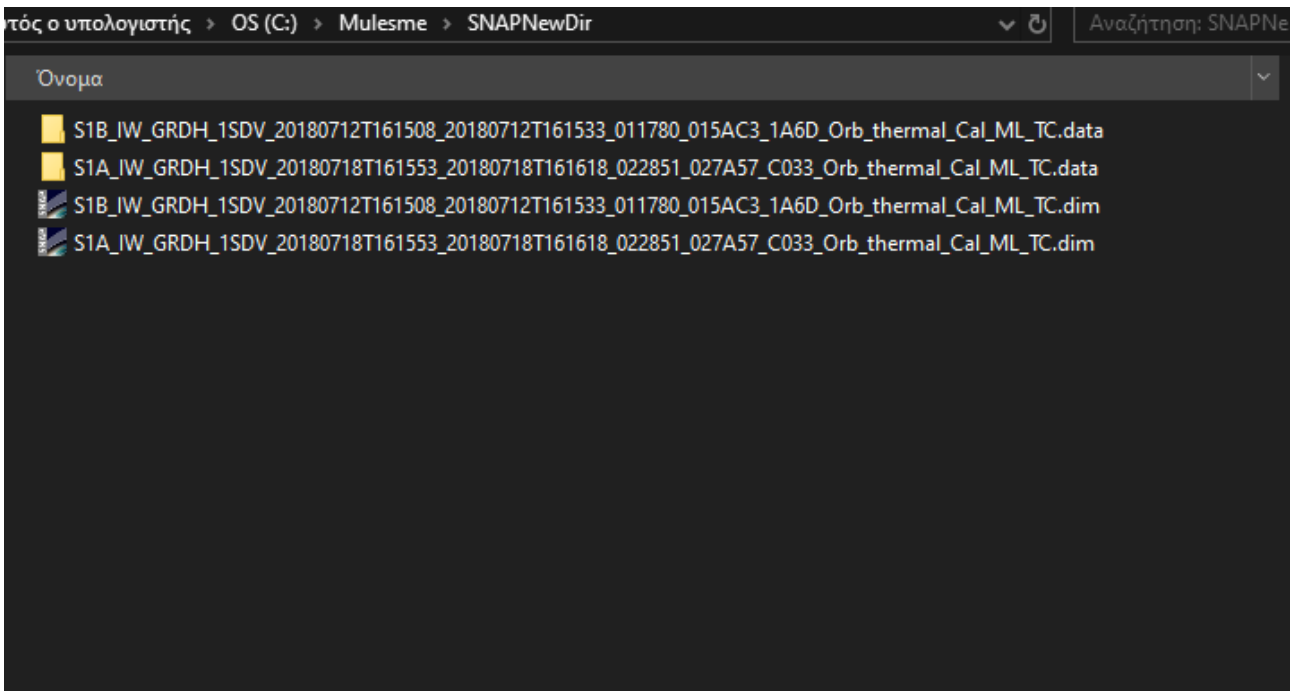
Στη συνέχεια αποθηκεύεται αποσυμπιεσμένος ο φάκελος με τα κανάλια της προς επεξεργασίας οπτικής εικόνας, στον φάκελο **L8NewDir**, του φακέλου **OpticalDir**, καθώς η εικόνα που θα χρησιμοποιηθεί είναι Landsat 8 (εικόνα 54). Ο χάρτης περιεκτικότητας νερού των φυτών, μετά την κατασκευή του από τον δευτερεύον επεξεργαστή, αποθηκεύεται επίσης, στον φάκελο **OpticalDir**.



Εικόνα 54: Υποφάκελοι του φακέλου OpticalDir.

Έπειτα τοποθετούνται τα αρχεία εικόνων που προέκυψαν από την προεπεξεργασία τους στο SNAP, στον φάκελο SNAPNewDir (εικόνα 55). Για κάθε εικόνα Sentinel-1, που επιθυμεί ο χρήστης να επεξεργαστεί, τοποθετούνται 2 αρχεία (παράγωγα της μορφής αποθήκευσης BEAM-DIMAP). Ο μέγιστος αριθμός των εικόνων που μπορεί να τοποθετηθούν για επεξεργασία στον φάκελο SNAPNewDir, είναι 5 (ενότητα 6.4.1) και συνεπώς 10 αρχεία (2 για κάθε εικόνα). Στην εικόνα 55, φαίνεται ένα παράδειγμα τοποθέτησης αρχείων 2 εικόνων Sentinel-1, για την εκτίμηση εδαφικής υγρασίας. Οι εικόνες αφορούν τις ημερομηνίες 12/7/2018 και 18/7/2018. Το MULESME θα παράξει

αυτόματα τον χάρτη εδαφικής υγρασίας της 18/7/2018, ως η πιο πρόσφατη από τις ημερομηνίες των δύο εικόνων.



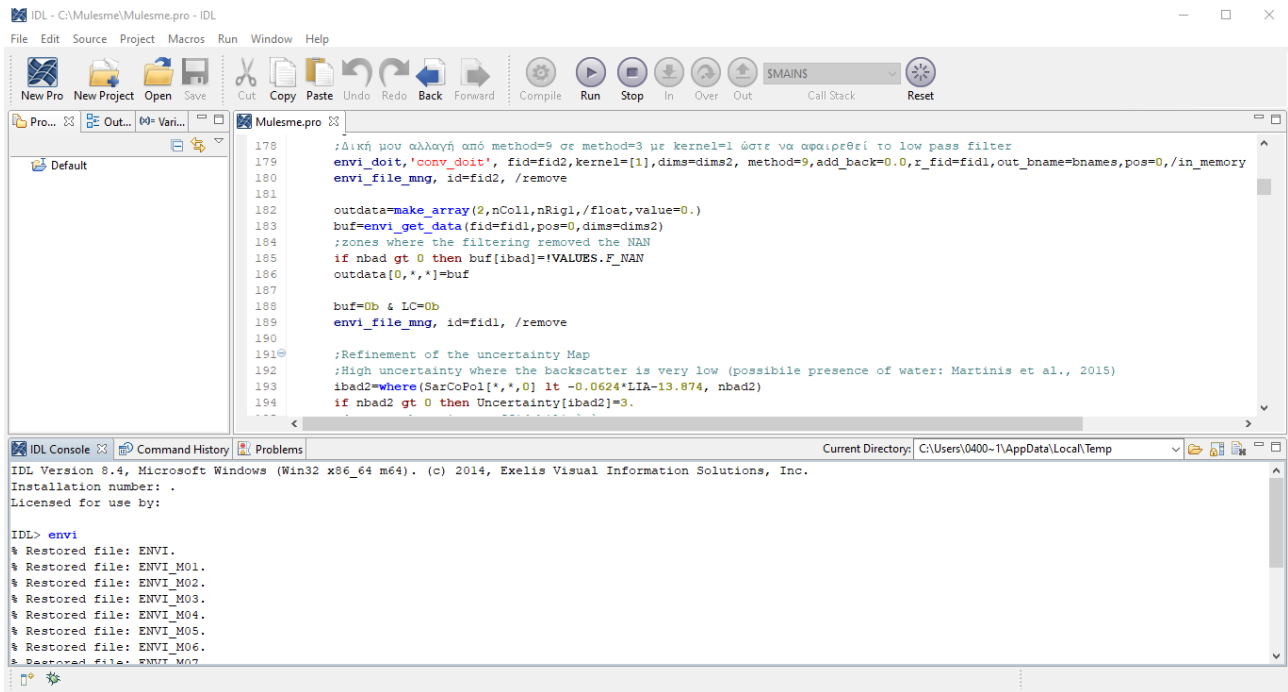
Εικόνα 55: Αρχεία εικόνων Sentinel-1 στον φάκελο SNAPNewDir.

Οι φάκελοι στην περίπτωση της μη αυτοματοποιημένης εφαρμογής του MULESME, για την Ιταλική επικράτεια, παραμένουν κενοί.

7.4.2. Εφαρμογή λογισμικού

Εφόσον τοποθετηθούν όλα τα απαραίτητα αρχεία στους κατάλληλους φακέλους, ο χρήστης είναι σε θέση να εφαρμόσει τον αλγόριθμο του λογισμικού, στην περιοχή ενδιαφέροντος του. Στον φάκελο **MULESME**, όπου περιέχονται όλοι οι υποφάκελοι, βρίσκεται το αρχείο με όνομα: **Mulesme.pro**. Σε αυτό το αρχείο, περιέχεται ο κώδικας του προγράμματος σε γλώσσα IDL και ανοίγοντας το, εμφανίζονται οι γραμμές του κώδικα στην κονσόλα της IDL.

Για την εφαρμογή του κώδικα, πληκτρολογείται η εντολή **envi** και έπειτα το πλήκτρο **enter**, ώστε να ενεργοποιηθούν οι ρουτίνες του προγράμματος ENVI (εικόνα 56). Στη συνέχεια επιλέγεται η εντολή **Run** και ξεκινά η εφαρμογή του αλγορίθμου.



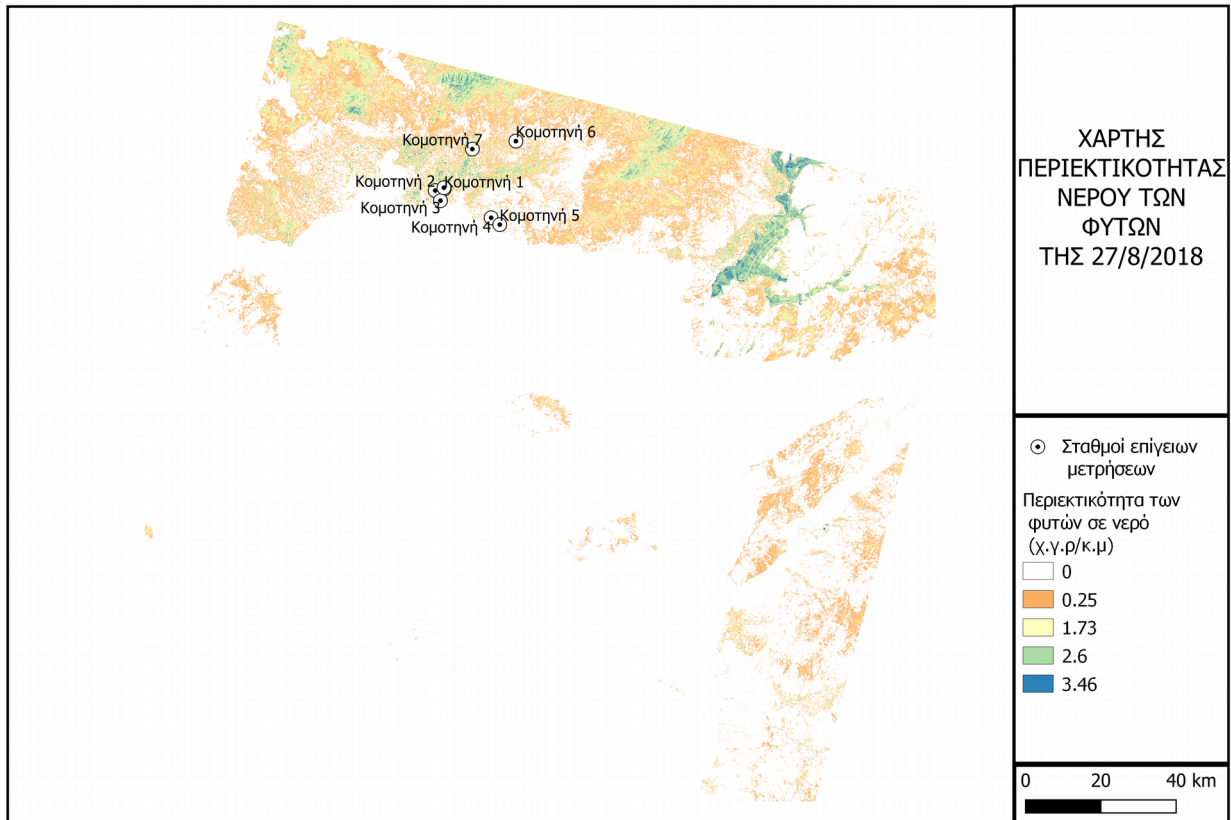
Εικόνα 56: Κώδικας MULESME, στην κονσόλα της IDL.

Το MULESME εφαρμόστηκε σε προσωπικό υπολογιστή, με λειτουργικό σύστημα Windows 10 και μνήμη RAM 8 GB.

7.5. Δεδομένα Εξόδου

7.5.1. Χάρτης Περιεκτικότητας Νερού των Φυτών

Το πρώτο αρχείο εξόδου του MULESME, είναι ο χάρτης περιεκτικότητας νερού των φυτών (εικόνα 57), ο οποίος χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τις εκτιμήσεις της εδαφικής υγρασίας. Το αρχείο είναι σε μορφή hdr και ο απαιτούμενος χρόνος επεξεργασίας για τη δημιουργία του, είναι περίπου 80 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 57: Χάρτης περιεκτικότητας νερού των φυτών, της 27/8/2018.

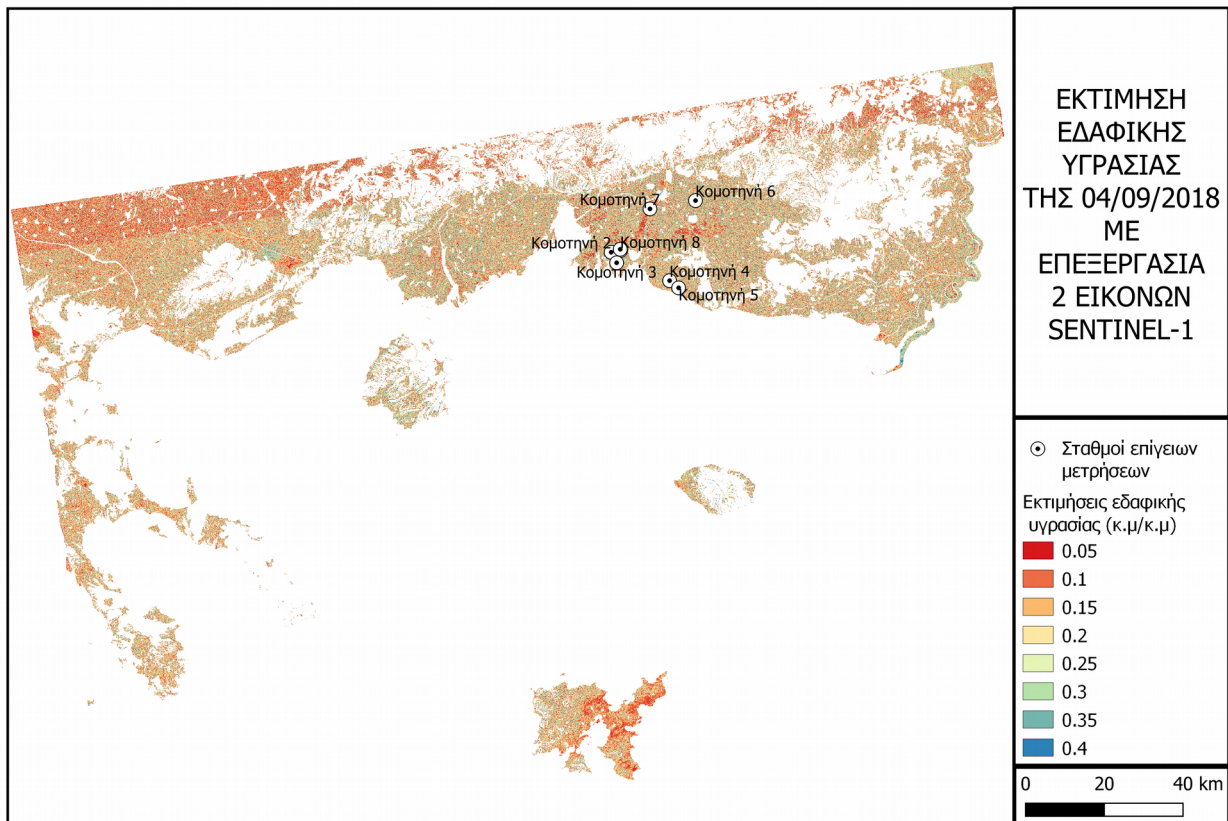
7.5.2. Χάρτης Εκτίμησης Εδαφικής Υγρασίας

Το MULESME, παράγει ένα αρχείο εξόδου, σε μορφή GeoTiff, το οποίο αποθηκεύεται στον φάκελο SMestimates. Το αρχείο περιέχει 2 κανάλια (bands). Το πρώτο κανάλι (band 1), είναι ο χάρτης εκτίμησης εδαφικής υγρασίας. Ο χρόνος επεξεργασίας για την παραγωγή του αρχείου κυμαίνεται από περίπου 15 λεπτά (επεξεργασία 1+1 εικόνων Sentinel-1) μέχρι 45 περίπου λεπτά (επεξεργασία 4+1 εικόνων Sentinel-1).

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 6.3.2, πριν την εξαγωγή του χάρτη εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας, οι δημιουργοί του MULESME, εφαρμόζουν ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων με μάσκα (kernel) διαστάσεων 5 x 5 εικονοστοιχείων, προκειμένου ο χάρτης να είναι περισσότερο ευδιάκριτος, εφόσον καλύπτει όλη την Ιταλική επικράτεια. Ως εκ τούτου, αναφέρουν ότι η τελική χωρική ανάλυση του χάρτη, είναι 500 x 500 m².

Εφόσον, στην παρούσα εργασία, το MULESME δεν εφαρμόστηκε σε εθνική κλίμακα, έγιναν κατάλληλες τροποποιήσεις στον κώδικα του, προκειμένου να μην εφαρμόζεται το φίλτρο χαμηλών χαμηλών συχνοτήτων, στον εξαγόμενο χάρτη. Ως εκ τούτου, η τελική χωρική ανάλυση του χάρτη, είναι 100 x 100 m², όπως και όλων των αρχείων εισόδου. Στην εικόνα 57, φαίνεται ο χάρτης εκτίμησης εδαφικής υγρασίας της 04/09/2018, καθώς και οι θέσεις των επίγειων σταθμών μετρήσεων. Τα εικονοστοιχεία με άσπρο χρώμα, έχουν

καλυφθεί από το MULESME και δεν έχει γίνει εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας τους, για τους λόγους που περιεγραφήκαν στην ενότητα 6.3.2.

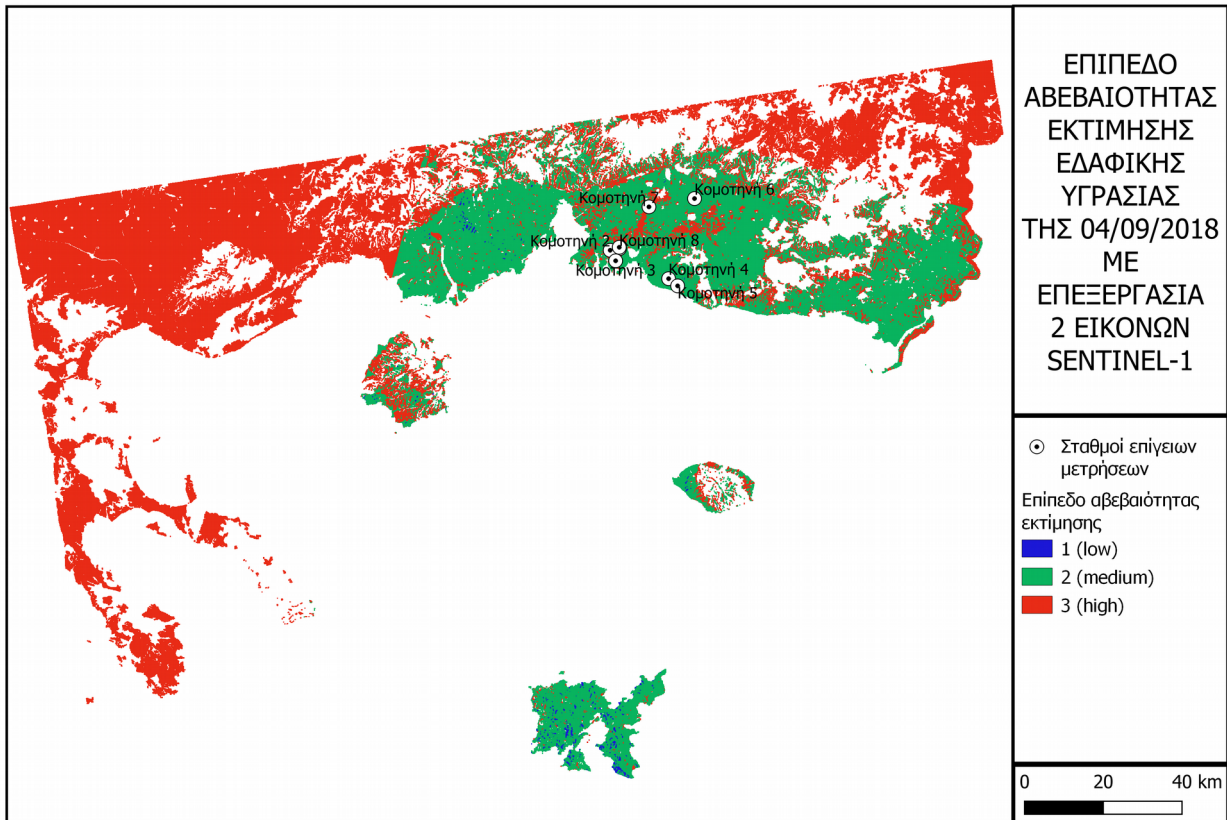


Εικόνα 58: Χάρτης εκτίμησης εδαφικής υγρασίας, της 04/09/2018.

Θα πρέπει να αναφερθεί, ότι η οπτική εικόνα δεν καλύπτει όλο το τμήμα (slice) της εικόνας Sentinel-1, οπότε για τις περιοχές που δεν υπάρχει πληροφορία για τον δείκτη NDVI, δεν μπορεί να υπολογιστεί η περιεκτικότητα σε νερό των φυτών και οι εκτιμήσεις εδαφικής υγρασίας γίνονται χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η επίδραση της βλάστησης.

7.5.3. Χάρτης Αβεβαιότητας Εκτίμησης Εδαφικής Υγρασίας

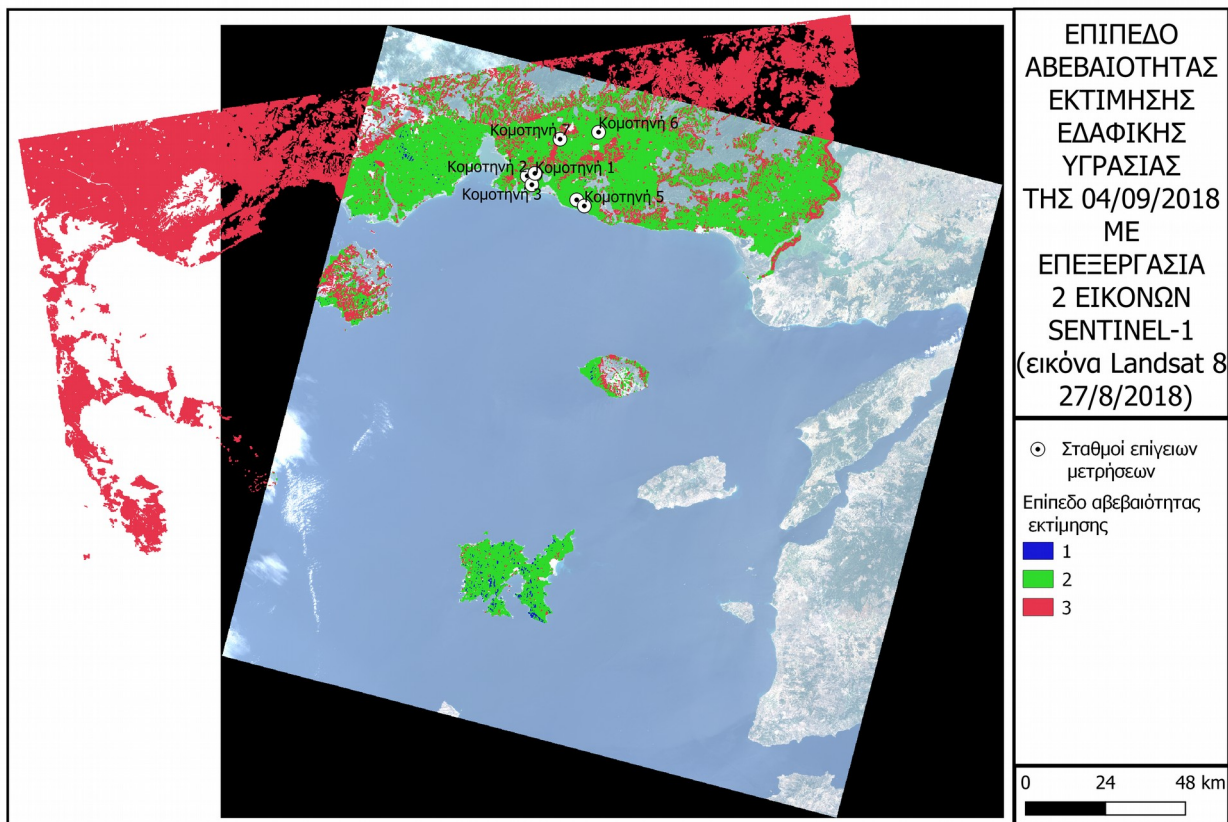
Το δεύτερο κανάλι (band 2) του αρχείου εξόδου στον φάκελο SMestimates, είναι ο χάρτης αβεβαιότητας εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας. Πριν την εξαγωγή του αρχείου για τον συγκεκριμένο χάρτη, δεν εφαρμόζεται κάποιο φίλτρο (εικόνα 28), όπως για τον χάρτη εκτίμησης εδαφικής υγρασίας, οπότε δεν χρειάστηκε κάποια επέμβαση στον κώδικα του MULESME, για την αφαίρεση του. Στην εικόνα 59, φαίνεται ένα παράδειγμα χάρτη αβεβαιότητας εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας, της 04/09/2018.



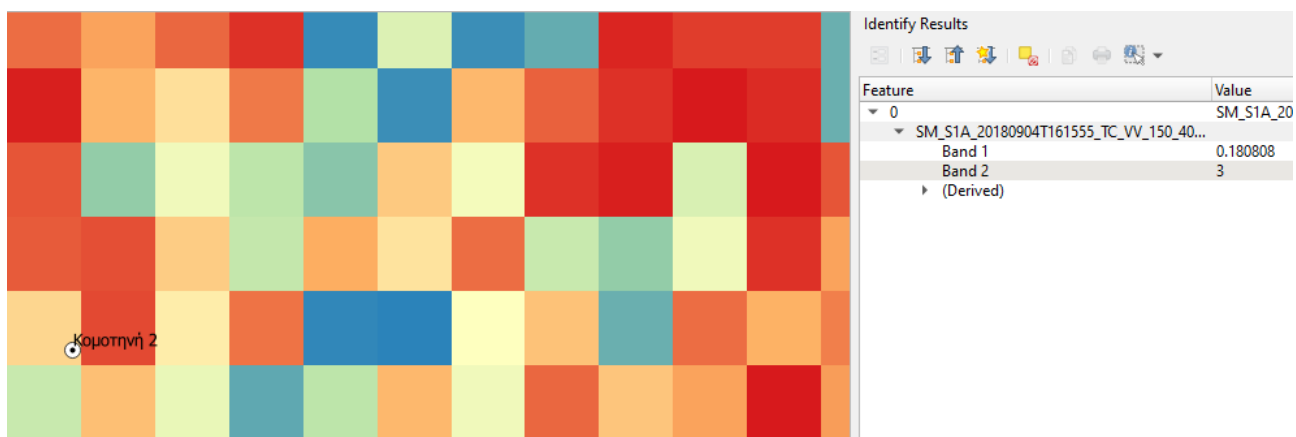
Εικόνα 59: Χάρτης αβεβαιότητας εκτίμησης εδαφικής υγρασίας, της 04/09/2018.

Στον χάρτη της εικόνας 59, έχει τοποθετηθεί μαζί με τον χάρτη αβεβαιότητας και η οπτική εικόνα που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας και του επιπέδου αβεβαιότητας της. Το αποτύπωμα (footprint) των εικόνων Landsat 8, δεν καλύπτει το συνολικό αποτύπωμα (footprint) των εικόνων Sentinel-1, για την περιοχή μελέτης. Παρατηρούμε ότι στις περιοχές όπου δεν υπάρχει πληροφορία για τον δείκτη NDVI (αδυναμία διόρθωσης λόγω ύπαρξης βλάστησης), δίνεται σε όλη την έκτασή τους (αριστερό κόκκινο μέρος του χάρτη) το υψηλότερο επίπεδο αβεβαιότητας 3.

Ανεξάρτητα από την χρωματική απόδοση που θα επιλέξει ο χρήστης για τον χάρτη εκτίμησης εδαφικής υγρασίας και τον αντίστοιχο χάρτη αβεβαιότητας της, χρησιμοποιώντας ένα λογισμικό που μπορεί να διαβάζει αρχεία της μορφής GeoTiff, μπορεί να έχει για κάθε εικονοστοιχείο που τον ενδιαφέρει, μια τιμή εκτίμησης εδαφικής υγρασίας και μια τιμή για την εκτίμηση της. Για την εξαγωγή αυτών των τιμών για κάθε εικονοστοιχείο, χρησιμοποιήθηκε η εντολή **Identify Features** του λογισμικού QGIS. Στην εικόνα 60, φαίνεται ένα παράδειγμα των πληροφοριών εκτίμησης εδαφικής υγρασίας και αβεβαιότητας, της 04/09/2018, του εικονοστοιχείου στο οποίο ανήκει ο επίγειος σταθμός μέτρησης με όνομα « Κομοτηνή 2» (ποσοστό εδαφικής υγρασίας: 0.181 m³/m³ και επίπεδο αβεβαιότητας:3).



Εικόνα 60: Χάρτης αβεβαιότητας εκτίμησης εδαφικής υγρασίας της 04/09/2018 και εικόνα Landsat 8 της 27/8/2018.



Εικόνα 61: Πληροφορίες εκτίμησης εδαφικής υγρασίας και αβεβαιότητας της, του εικονοστοιχείου στο οποίο ανήκει ο σταθμός επίγειων μετρήσεων « Κομοτηνή 2 ».

8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Αρχικά, έγινε διαχωρισμός ολόκληρης της περιόδου για την οποία διαθέτουμε επίγειες μετρήσεις εδαφικής υγρασίας, σε τρεις χρονικές περιόδους, ανάλογα με τα κύρια στάδια ανάπτυξης των βαμβακόφυτων. Ο διαχωρισμός αυτός, πραγματοποιήθηκε προκειμένου να γίνει σύνδεση των αποτελεσμάτων της εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας, με το στάδιο ανάπτυξης των φυτών, καθώς η φυτοκάλυψη αποτελεί μαζί με την εδαφική τραχύτητα, τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τις εκτιμήσεις εδαφικής υγρασίας. Οι χρονικοί περίοδοι και τα στάδια ανάπτυξης, είναι:

- 1) **1η χρονική περίοδος:** Εμφάνιση ανθοφόρων-βλαστοφόρων βλαστών: από 4 Ιουλίου 2018 έως 7 Ιουλίου 2018
- 2) **2η χρονική περίοδος:** Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας: από 8 Ιουλίου 2018 έως 31 Ιουλίου 2018
- 3) **3η χρονική περίοδος:** Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων: από 20 Αυγούστου 2018 έως 18 Σεπτεμβρίου 2018.

Για κάθε μια από τις τρεις περιόδους ανάπτυξης των φυτών, επιλέχθηκε μια εικόνα Sentinel-1, η ημερομηνία λήψης της οποίας ανήκει σε αυτή την περίοδο. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε το MULESME 4 φορές (για αριθμό εικόνων επεξεργασίας 1+1, 2+1, 3+1 και 4 +1) για κάθε μια από τις τρεις ημερομηνίες, με προσθήκη κάθε φορά μιας επιπλέον εικόνας επεξεργασίας, με λήψη 6 ημερών πριν, για την εκμετάλλευση της χρονικής διακριτικής ικανότητας των δορυφόρων Sentinel-1.

Αναφορικά με τις οπτικές εικόνες, για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας των φυτών σε νερό W , χρησιμοποιήθηκαν αυτές που η ημερομηνία τους είναι πλησιέστερη σε αυτή της εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας, εφόσον δεν υπήρχε νεφοκάλυψη στην περιοχή μελέτης. Σε διαφορετική περίπτωση, επιλέχθηκε η διαθέσιμη εικόνα, της αμέσως προηγούμενης λήψης, χωρίς νεφοκάλυψη.

8.1. 1ο Σύνολο Εφαρμογών του MULESME

1η Χρονική Περίοδος

Τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων της εδαφικής υγρασίας και τα αντίστοιχα αποτελέσματα των επίγειων μετρήσεων της 1ης περιόδου, παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα A1, του παραρτήματος Α.

Για κάθε αριθμό εικόνων επεξεργασίας, υπολογίστηκε η Ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος PMTS (Route Mean Square Error), σύμφωνα με την σχέση:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (F-O)^2}{T}}$$

όπου, F η επίγεια μέτρηση εδαφικής υγρασίας, O η αντίστοιχη εκτίμηση εδαφικής υγρασίας και T το πλήθος των ζευγών των τιμών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα.

Ημερομηνία Εκτιμήσεων Εδαφικής Υγρασίας	Ημερομηνία Οπτικής Εικόνας	Αριθμός Εικόνων Επεξεργασίας	Αριθμός Παρατηρήσεων	Ημερομηνίες Εικόνων Προηγούμενων Χρονικών Στιγμών	Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (m^3/m^3)
06 Ιουλίου 2018	8 Ιουνίου 2018	1+1	4	30/06/2018	0,230
06 Ιουλίου 2018	8 Ιουνίου 2018	1+2	4	30/06/2018 24/06/2018	0,221
06 Ιουλίου 2018	8 Ιουνίου 2018	1+3	4	30/06/2018 24/06/2018 18/06/2018	0,199
06 Ιουλίου 2018	8 Ιουνίου 2018	1+4	4	30/06/2018 24/06/2018 18/06/2018 12/06/2018	0,142

Πίνακας 4: Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος, επεξεργασίας εικόνων 1ης περιόδου .

Από τον πίνακα 4, συμπεραίνουμε ότι η PMTΣ και συνεπώς η ακρίβεια των εκτιμήσεων, αυξάνεται όσο αυξάνεται και ο αριθμός των εικόνων επεξεργασίας προηγούμενων χρονικών στιγμών. Η αύξηση αυτή είναι της τάξης των $0,088 m^3/m^3$ ($= 0,023-0,142 m^3/m^3$). Σύμφωνα με τον αλγόριθμο πολυ-χρονικής (multi-temporal) προσέγγισης που χρησιμοποιείται, είναι αναμενόμενη η αύξηση της ακρίβειας των εκτιμήσεων, με την αύξηση των εικόνων επεξεργασίας προηγούμενων χρονικών στιγμών, μικρού χρονικού διαστήματος μεταξύ τους (6 ημέρες για τα δεδομένα που έχουμε στη διάθεση μας). Η ανάπτυξη των φυτών αυτής της περιόδου, είναι στο κατώτερο στάδιο, συνεπώς οι τιμές οπισθοσκέδασης δεν επηρεάζονται σημαντικά από την παρουσία βλάστησης και δεν απαιτείται διόρθωση τους, πριν από την εισαγωγή στη συνάρτηση κόστους (ενότητα 6.1.1). Συνεπώς, η προσθήκη των τιμών οπισθοσκέδασης κάθε εικόνας προηγούμενης χρονικής στιγμής, αυξάνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, η οπτική εικόνα, παρά το ότι αφορά λήψη 28 ημερών πριν από αυτή της εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας, δε φαίνεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα, καθώς και τότε η ανάπτυξη της βλάστησης, ήταν σε χαμηλό στάδιο.

2η Χρονική Περίοδος

Τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων της εδαφικής υγρασίας και τα αντίστοιχα αποτελέσματα των επίγειων μετρήσεων της 2ης περιόδου, παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα Α2, του παραρτήματος Α.

Ημερομηνία Εκτιμήσεων Εδαφικής Υγρασίας	Ημερομηνία Οπτικής Εικόνας	Αριθμός Εικόνων Επεξεργασίας	Αριθμός Παρατηρήσεων	Ημερομηνίες Εικόνων Προηγούμενων Χρονικών Στιγμών	Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (m ³ /m ³)
30 Ιουλίου 2018	10 Ιουλίου 2018	1+1	7	24/07/2018	0,141
30 Ιουλίου 2018	10 Ιουλίου 2018	1+2	7	24/07/2018 18/07/2018	0,130
30 Ιουλίου 2018	10 Ιουλίου 2018	1+3	7	24/07/2018 18/07/2018 12/07/2018	0,156
30 Ιουλίου 2018	10 Ιουλίου 2018	1+4	7	24/07/2018 18/07/2018 12/07/2018 06/07/2018	0,141

Πίνακας 5: Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος, επεξεργασίας εικόνων 2ης περιόδου .

Σύμφωνα με τον πίνακα 5, η ακρίβεια (ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος) της εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας με επεξεργασία αριθμού εικόνων 1+1, είναι η ίδια με τα αποτελέσματα της επεξεργασίας 1+4 εικόνων Sentinel-1. Η βέλτιστη ακρίβεια, επιτυγχάνεται με αριθμό εικόνων 1+2, χωρίς σημαντική διαφορά όμως από αυτή των 1+1 εικόνων, ενώ η μικρότερη ακρίβεια επιτυγχάνεται με αριθμό 1+3 εικόνων.

Ο λόγος της διακύμανσης της PMTΣ, στις εκτιμήσεις με διαφορετικό αριθμό επεξεργασίας εικόνων, μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η βιομάζα των βαμβακόφυτων σε αυτή την περίοδο αυξάνεται δυναμικά, οπότε οι αλλαγές στις τιμές οπισθοσκέδασης, αντιστοιχούν και στις δυναμικές αλλαγές της βιομάζας των φυτών λόγω της ανάπτυξης τους. Αυτές οι αλλαγές, δεν διορθώνονται πάντα επιτυχώς σε αυτή την περίοδο από τα ημι-εμπειρικά μοντέλα Water Cloud Model και Ratio Method (ενότητα 6.1.2), καθώς οι διορθώσεις τους γίνονται σύμφωνα με τις πληροφορίες της οπτικής εικόνας της 10/7/2018 (ημερομηνία εκτίμησης 30/7/2018). Το αποτέλεσμα είναι η εισαγωγή τιμών οπισθοσκέδασης στη συνάρτηση κόστους, οι οποίες μειώνουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Το σκεπτικό αυτό επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της επεξεργασίας 1+4 εικόνων, όπου η PMTΣ έχει την ίδια τιμή με αυτή της επεξεργασίας των 1+1 εικόνων, καθώς επεξεργάζονται εικόνες SAR πλησιέστερων χρονικών στιγμών (12/7/2018 και 06/07/2018) σε αυτή της οπτικής εικόνας, με αποτέλεσμα οι τιμές οπισθοσκέδασης τους να διορθώνονται ακριβέστερα, πριν από την εισαγωγή τους στη συνάρτηση κόστους.

3η Χρονική Περίοδος

Τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων της εδαφικής υγρασίας και τα αντίστοιχα αποτελέσματα των επίγειων μετρήσεων της 3ης περιόδου, παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα Α3, του παραρτήματος Α.

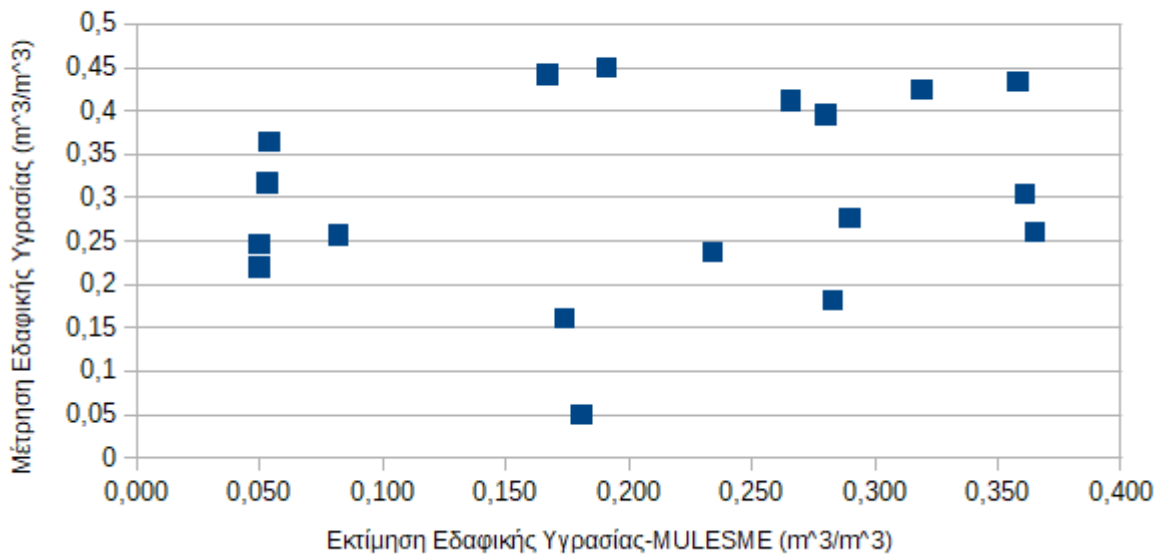
Ημερομηνία Εκτιμήσεων Εδαφικής Υγρασίας	Ημερομηνία Οπτικής Εικόνας	Αριθμός Εικόνων Επεξεργασίας	Αριθμός Παρατηρήσεων	Ημερομηνίες Εικόνων Προηγούμενων Χρονικών Στιγμών	Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (m ³ /m ³)
04 Σεπτεμβρίου 2018	27 Αυγούστου 2018	1+1	7	29/08/2018	0,146
04 Σεπτεμβρίου 2018	27 Αυγούστου 2018	1+2	7	29/08/2018 23/08/2018	0,174
04 Σεπτεμβρίου 2018	27 Αυγούστου 2018	1+3	7	29/08/2018 23/08/2018 17/08/2018	0,188
04 Σεπτεμβρίου 2018	27 Αυγούστου 2018	1+4	7	29/08/2018 23/08/2018 17/08/2018 11/08/2018	0,198

Πίνακας 6: Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος, επεξεργασίας εικόνων 3ης περιόδου .

Σύμφωνα με τον πίνακα 6, παρατηρούμε ότι η ακρίβεια μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των εικόνων επεξεργασίας, γεγονός που αντιτίθεται στο σκεπτικό της πολυ-χρονικής (multi-temporal) προσέγγισης του αλγορίθμου. Ο λόγος που μπορεί να συμβαίνει αυτό, πιθανόν να σχετίζεται και πάλι με τη βιομάζα των βαμβακόφυτων, η οποία είναι στο μέγιστο επίπεδο σε αυτή την περίοδο και οι τιμές οπισθοσκέδασης δεν διορθώνονται επιτυχώς λόγω της παρουσίας της, παρά το γεγονός ότι η ημερομηνία λήψης της οπτικής εικόνας (27/8/2018), είναι αρκετά κοντά σε αυτές των εικόνων SAR, ενώ η βλάστηση σε αυτή την περίοδο έχει σταματήσει να αναπτύσσεται. Συνεπώς, φαίνεται ότι τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα για τη διόρθωση των τιμών της οπισθοσκέδασης λόγω βλάστησης (Water Cloud Model και Ratio Method), αδυνατούν να διορθώσουν επιτυχώς της επιδράσεις της βλάστησης σε αυτό το στάδιο ανάπτυξης των φυτών και για αυτό η PMTS αυξάνεται συνεχώς με την αύξηση των εικόνων επεξεργασίας.

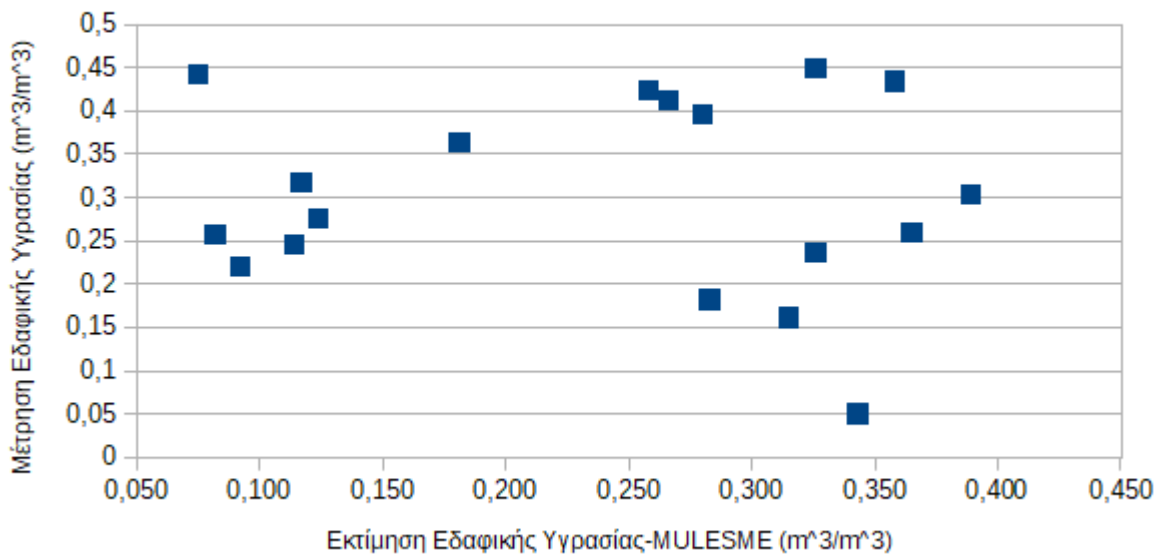
Στη συνέχεια, παρατίθενται διαγράμματα διασποράς, των αποτελεσμάτων μεταξύ εκτιμήσεων εδαφικής υγρασίας και επίγειων μετρήσεων. Κάθε διάγραμμα αφορά τα αποτελέσματα διαφορετικού αριθμού εικόνων επεξεργασίας και των τριών χρονικών περιόδων.

Αποτελέσματα Επεξεργασίας 1+1 Εικόνων

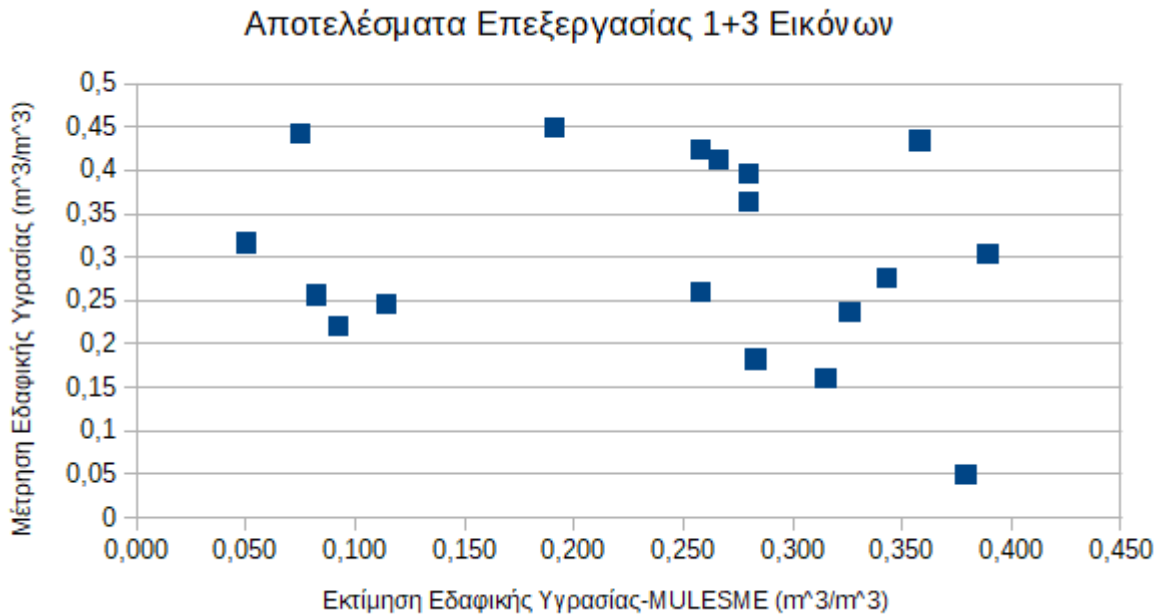


Γράφημα 14: Διασπορά μεταξύ εκτιμήσεων και επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας, με επεξεργασία 1+1 εικόνων.

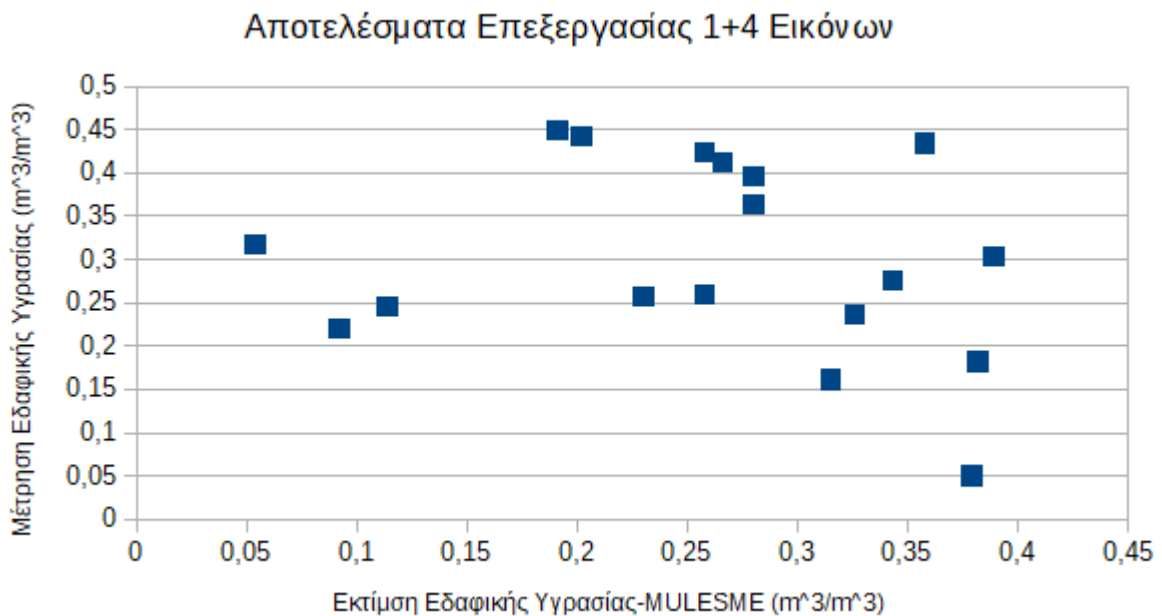
Αποτελέσματα Επεξεργασίας 1+2 Εικόνων



Γράφημα 15: Διασπορά μεταξύ εκτιμήσεων και επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας, με επεξεργασία 1+2 εικόνων.



Γράφημα 16: Διασπορά μεταξύ εκτιμήσεων και επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας, με επεξεργασία 1+3 εικόνων.



Γράφημα 17: Διασπορά μεταξύ εκτιμήσεων και επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας, με επεξεργασία 1+4 εικόνων.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα, συμπεραίνουμε ότι τη μικρότερη διασπορά μεταξύ εκτιμήσεων και επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας, παρουσιάζουν οι εκτιμήσεις με αριθμό εικόνων επεξεργασίας 1+1.

Η συνολική διαπίστωση από τη μελέτη των αποτελεσμάτων και των τριών περιόδων, είναι ότι λόγω της δυναμικής ανάπτυξης και του είδους των βαμβακόφυτων, η ακρίβεια δεν αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του αριθμού εικόνων επεξεργασίας προηγούμενων

χρονικών στιγμών για την 2η και 3η περίοδο, ενώ για την 1η υπάρχει αξιοσημείωτη αύξηση της ακρίβειας.

8.2. 2ο Σύνολο Εφαρμογών του MULESME

Μετά το 1ο σύνολο εφαρμογών του MULESME και την παραπάνω διαπίστωση, χρησιμοποιήθηκαν όλες οι διαθέσιμες εικόνες Sentinel-1 της ηλεκτρονικής πλατφόρμας διάθεσης τους (Copernicus Open Hub), για το σύνολο της εξεταζόμενης περιόδου (04 Ιουλίου έως 18 Σεπτεμβρίου 2018), προκειμένου να γίνει εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας για όλες τις περιόδους, με την επεξεργασία μόνο 1+1 αριθμού εικόνων (μια εικόνα για την εκτίμηση της εξεταζόμενης ημερομηνίας και μια εικόνα της αμέσως προηγούμενης ημερομηνίας λήψης). Ως εκ τούτου, χρησιμοποιήθηκαν 13 εικόνες Sentinel-1 με χρονικό διάστημα λήψεων ανά 6 ημέρες. Τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων της εδαφικής υγρασίας και τα αντίστοιχα αποτελέσματα των επίγειων μετρήσεων, παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα B1, του παραρτήματος Β.

Για την 1η περίοδο, διατίθεται μόνο μια εικόνα Sentinel-1 με ημερομηνία λήψης σε αυτήν την περίοδο, συνεπώς τα αποτελέσματα αυτής της περιόδου για αριθμό επεξεργασίας εικόνων 1+1, είναι ίδια με αυτά της προηγούμενης ενότητας και για λόγους πληρότητας περιέχονται και στον παρακάτω πίνακα. Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ΡΜΤΣ των αποτελεσμάτων της 1ης περιόδου, προέκυψε από πολύ μικρότερο δείγμα, συγκριτικά με τη ΡΜΤΣ των υπόλοιπων δύο περιόδων.

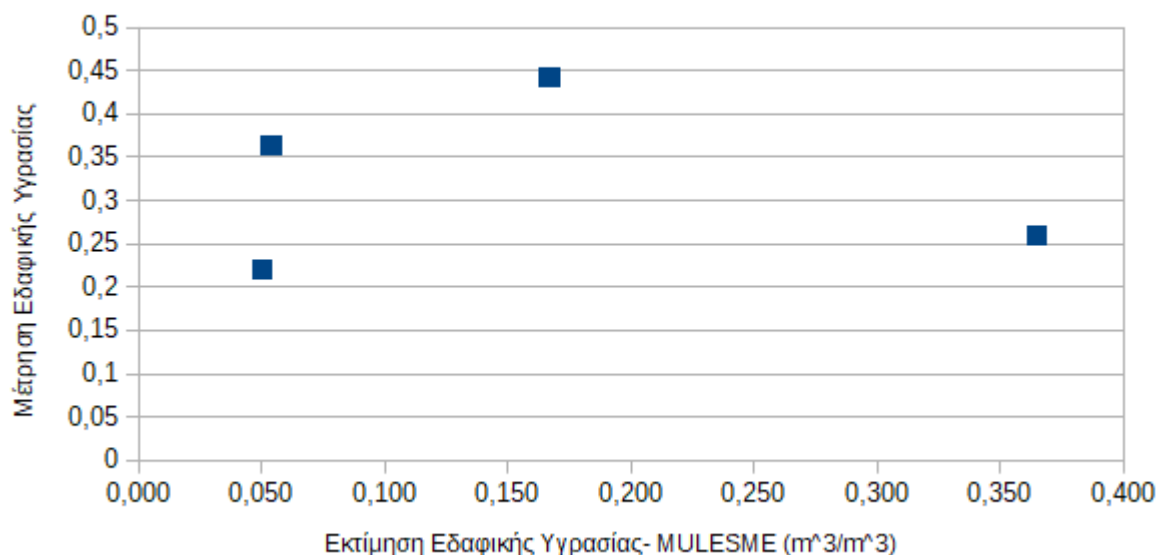
Χρονική Περίοδος	Αριθμός Παρατηρήσεων	Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (m^3/m^3)
1η	4	0,230
2η	22	0,158
3η	56	0,147

Πίνακας 7: Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος, επεξεργασίας 1+1 εικόνων, για το σύνολο της περιόδου.

Σύμφωνα με τον πίνακα 7, με μεγαλύτερο αριθμό παρατηρήσεων πλέον, επιβεβαιώνεται η διαπίστωση της προηγούμενης ενότητας, ότι με επεξεργασία 1+1 αριθμού εικόνων, επιτυγχάνεται ικανοποιητική ακρίβεια κατά την 3η και 2η περίοδο, ενώ η μικρότερη ακρίβεια παρατηρείται κατά την 1η περίοδο. Συνεπώς, ο απαιτούμενος χρόνος για την επεξεργασία μεγαλύτερου του 1+1 αριθμού εικόνων, είναι δυσανάλογος της βελτίωσης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

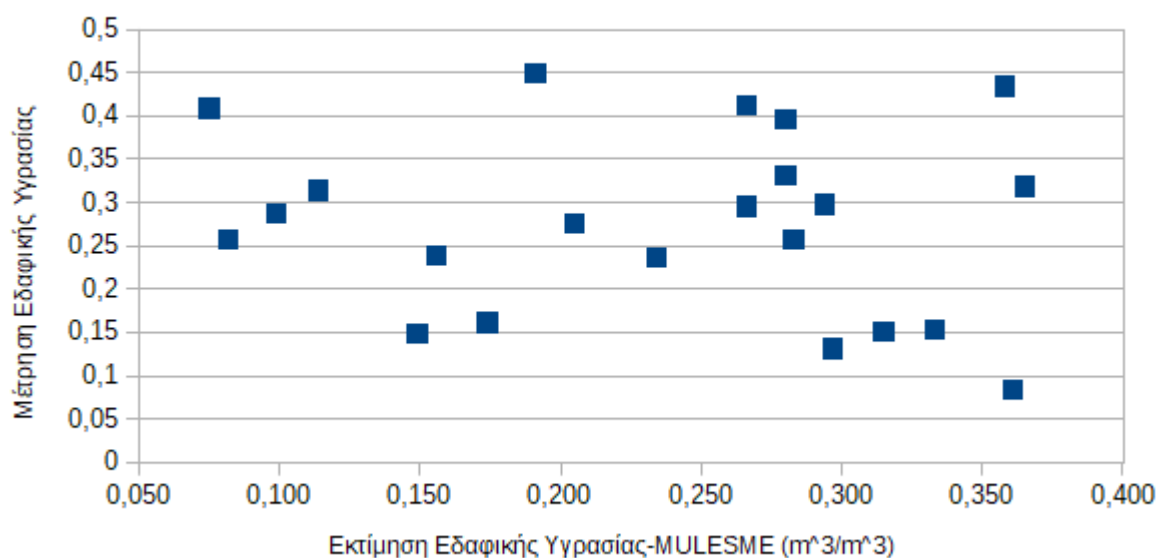
Στη συνέχεια, παρατίθενται διαγράμματα διασποράς, των αποτελεσμάτων μεταξύ εκτιμήσεων εδαφικής υγρασίας και επίγειων μετρήσεων. Κάθε διάγραμμα αφορά τα αποτελέσματα μίας χρονικής περιόδου, με αριθμό εικόνων επεξεργασίας 1+1.

Αποτελέσματα 1ης Περιόδου

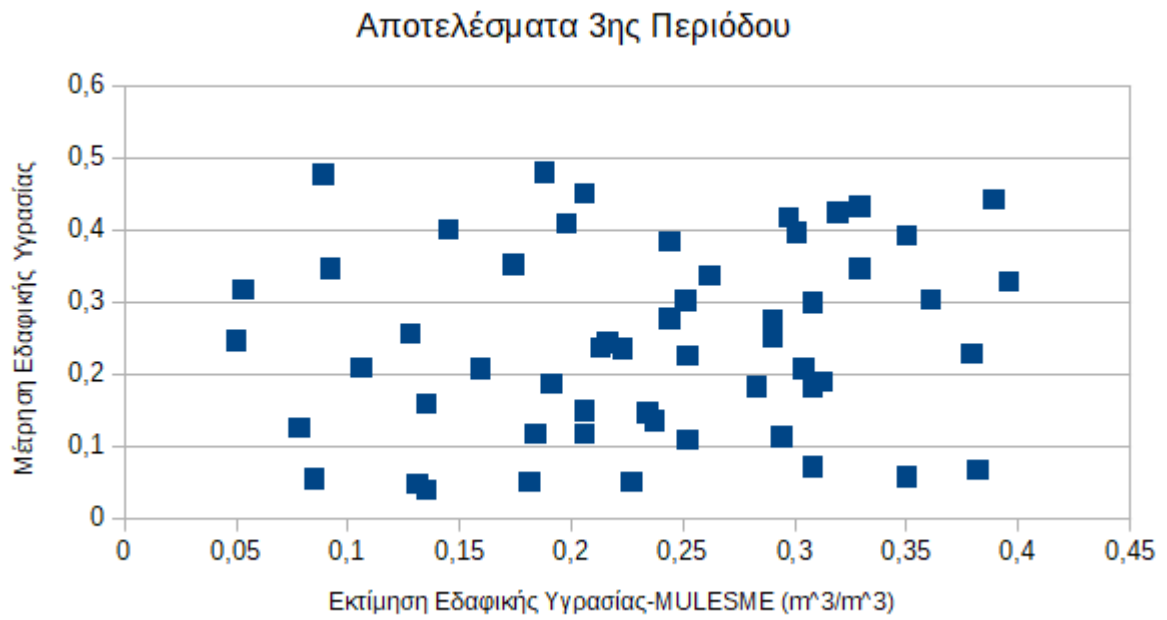


Γράφημα 18: Διασπορά μεταξύ εκτιμήσεων και επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας της 1ης περιόδου, με επεξεργασία 1+1 εικόνων.

Αποτελέσματα 2ης Περιόδου



Γράφημα 19: Διασπορά μεταξύ εκτιμήσεων και επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας της 2ης περιόδου, με επεξεργασία 1+1 εικόνων.



Γράφημα 20: Διασπορά μεταξύ εκτιμήσεων και επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας της 3ης περιόδου, με επεξεργασία 1+1 εικόνων.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σύμφωνα με την αξιολόγηση της προηγούμενης ενότητας, χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο αριθμό εικόνων για κάθε περίοδο, είναι δυνατή η επίτευξη ρίζας μέσου τετραγωνικού σφάλματος, της τάξης των $0,14 \text{ m}^3/\text{m}^3$, το οποίο κρίνεται ικανοποιητικό συγκριτικά με το αντίστοιχο αποτέλεσμα των $0,12 \text{ m}^3/\text{m}^3$, το οποίο επιτεύχθηκε κατά την αξιολόγηση του MULESME (ενότητα 6.4.1). Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται, λαμβάνοντας υπόψιν ότι τα μοντέλα οπισθοσκέδασης του καναλιού C, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ικανοποιητική εκτίμηση εδαφικής υγρασίας, σε βάθος εδάφους μικρότερο των 5 cm, ενώ για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εργασίας, είχαμε στη διάθεση μας, επίγειες μετρήσεις εδαφικής υγρασίας σε βάθος 10 cm. Η αξιολόγηση του αλγορίθμου στο μέλλον, με την αξιοποίηση επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας σε βάθος μικρότερο των 5 cm, εκτιμάται ότι θα βελτιώσει τα αποτελέσματα της αξιολόγησης.

Η δυναμική αύξηση της βιομάζας των φυτών (κατά την περίοδο ανάπτυξης τους), φαίνεται ότι επηρεάζει τις τιμές οπισθοσκέδασης, σε βαθμό που δεν μπορεί να διορθωθεί επιτυχώς από τα ημι-εμπειρικά μοντέλα διόρθωσης λόγω βλάστησης, που χρησιμοποιούνται από το MULESME. Με την πολυ-χρονική (multitemporal) προσέγγιση του αλγορίθμου, εισέρχονται στο μοντέλο οι μη διορθωμένες τιμές οπισθοσκέδασης προηγούμενων χρονικών στιγμών, λόγω της παρουσίας βλάστησης, μειώνοντας την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της ελαχιστοποίησης της συνάρτησης κόστους (ενότητα 6.1.1). Σε επιβεβαίωση αυτού του σκεπτικού, τα αποτελέσματα της 1ης περιόδου όπου η βιομάζα των φυτών είναι μικρή και δεν απαιτείται διόρθωση λόγω βλάστησης, τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων βελτιώνονται καθώς αυξάνει ο αριθμός των εικόνων επεξεργασίας προηγούμενων χρονικών στιγμών. Οι μεταβολές στις τιμές οπισθοσκέδασης μεταξύ των χρονικών στιγμών, σε αυτή την περίπτωση, αντιστοιχούν σε μεταβολές της εδαφικής υγρασίας και όχι σε μεταβολές της βιομάζας των φυτών. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε ως βέλτιστος αριθμός επεξεργασίας εικόνων, ο αριθμός 1+1, σε περιπτώσεις όπου η βιομάζα των φυτών αυξάνεται δυναμικά ή παραμένει αυξημένη (2η και 3η περίοδος, αντίστοιχα). Η επιλογή διαφορετικών μοντέλων διόρθωσης λόγω βλάστησης ή ακόμα και η ανάπτυξη νέων μοντέλων στο μέλλον, τα οποία θα προσαρμόζονται περισσότερο στις ιδιαιτερότητες του βαμβακόφυτου και στα στάδια ανάπτυξης του, εκτιμάται ότι μπορεί επίσης να βελτιώσει τα αποτελέσματα του αλγορίθμου.

Τέλος, η χρονική διακριτική ικανότητα των εικόνων Landsat (16 ημέρες), πιθανώς δεν επαρκεί για την αποτελεσματική ανίχνευση των δυναμικών μεταβολών του συγκεκριμένου είδους βλάστησης και την εφαρμογή κατάλληλων διορθώσεων στις τιμές οπισθοσκέδασης. Συνεπώς, η χρήση στο μέλλον των οπτικών πολυφασματικών εικόνων των δορυφόρων MODIS και Sentinel-2, επιπλέον των εικόνων Landsat 8, για τη βελτίωση της χρονικής διακριτικής ικανότητας των οπτικών εικόνων, εκτιμάται ότι θα βελτιώσει περαιτέρω την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΡΘΡΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

Καραθανάση Βασιλεία, Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης, 2012

Καρτάλης Κωνσταντίνος και Φείδας Χαράλαμπος, Αρχές και Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2013.

Ποϊραζίδης, Βούλγαρης, Κεφαλάς, Λορίλια, Βασικές Αρχές της Τηλεπισκόπησης, ΑΤΕΙ Ιονίων Νήσων-Τμήμα Τεχνολογίας Περιβάλλοντος και Οικολογίας.

Ισαάκ Παρχαρίδης, Αρχές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης- Θεωρία και Εφαρμογές, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.

Γεώργιος Κούκης και Νικόλαος Σαμπατακάκης, Τεχνική Γεωλογία, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2002.

Δημήτριος Μπαξεβάνος, Βαμβάκι-Ένας σύγχρονος οδηγός διαχείρισης της καλλιέργειας, Εκδόσεις ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ, Delta & Pine Land Hellas ΕΠΕ, 2000.

Άγγελος Μπαλαμπάνης, Διπλωματική εργασία, Μελέτη Κοστολόγησης της Καλλιέργειας του Βαμβακιού στο Νομό Αιτωλοακαρνανίας, Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων Αγροτικών Προϊόντων και Τροφίμων, 2017.

Δελτίο Τύπου, Έρευνα Διάρθρωσης Γεωργικών και Κτηνοτροφικών Εκμεταλλεύσεων, Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2016.

Γαλανοπούλου-Σενδούκα Σ., Οικολογική καλλιέργεια βαμβακιού, 1995

Γαλανοπούλου-Σενδούκα Σ., Βιομηχανικά φυτά-Βαμβάκι και υπόλοιπα Κλωστικά-Ελαιοδοτικά-Ζαχαρότευτλα-Καπνός, Εκδόσεις Σταμούλης, 2002

Ξενόγλωσση

Aliihsan Sekertekin, Aycan Murat Marangoz, Saygin Abdikan, Soil Moisture Mapping Using Sentinel-1A Synthetic Aperture Radar, International Journal of Environment and Geoinformatics, 2016.

R.A.M de Jeu, W. Wagner, T.R.H Holmes, A.J. Dolman, N.C van de Giesen, J. Friesen, Global Soil Moisture Patterns Observed by Space Borne Microwave Radiometers and Scatterometers, p.399-420, 2007.

H. Laur, P. Bally, P. Meadows, J. Sanchez, B. Schaettler, E. Lopinto, D. Esteban, Derivation of the Backscattering Coefficient σ_0 in ESA ERS SAR PRI Products, ESA, 2004.

Sabina Esch, Wolfgang Korres, Tim G. Reichenau, Karl Schneider, Soil moisture index from ERS-SAR and its applications to the analysis of spatial patterns in agricultural areas, 2018.

Andrea Celentano, ERS/ENVISAT ASAR Data Products and Services

- Carsten Pathe, Wolfgang Wagner, Senior Member, IEEE, Daniel Sabel, Marcela Doubkova and Jeffrey B. Basara, Using ENVISAT ASAR Global Mode Data for Surface Soil Moisture Retrieval Over Oklahoma, USA, 2009, p. 468-480,
- Simonetta Paloscia, Paolo Pampaloni, Simone Pettinato, Pietro Poggi and Emanuele Santi, The Retrieval of Soil Moisture From ENVISAT/ASAR DATA, Institute of Applied Physics 'Carrara, p.44-50, 2005
- Alessandra Moneris and Thomas Schumge, Soil moisture estimation using L-band radiometry, 2009.
- L. Pulvirenti, G. Squicciarino, L. Cenci, G. Boni, N. Pierdicca, M. Chini, C. Versace, P. Campanella, A surface soil moisture mapping service at national (Italian) scale based on Sentinel-1 data, Environmental Modeling & Software 102 (2018), 2017, p. 13-28.
- Y. Oh, Quantitative retrieval of soil moisture content and surface roughness from multipolarized radar observations of bare soil surfaces, Geosci. Rem. Sens. 42, 2004, p. 596-601.
- Kim S.B., Tsang L., Johnson J.T., Huang S., Van Zyl J.J., Njoku E.G. Soil moisture retrieval using time-series radar observations over bare surfaces. Geosci. Rem. Sens. 50, 2012, p.1853-1863.
- Pierdicca N., Pulvirenti L., Bignami C., Ticconi F. Monitoring soil moisture in an agricultural test site using SAR data: design and test of a pre-operational procedure. J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Rem. Sens. 6, 2013.
- Pierdicca N., Pulvirenti L., Pace G. A prototype software package to retrieve soil moisture from Sentinel-1 data by using a bayesian multitemporal algorithm. J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Rem. Sens. 7, 2014
- Y. Oh, K. Sarabandi, and F. T. Ulaby, Semi-empirical model of the ensemble-averaged differential Mueller matrix for microwave backscattering from bare soil surfaces, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 40, June 2002, pp. 1348–1355.
- Y. Du, F. T. Ulaby, and M. C. Dobson, Sensitivity to soil moisture by active and passive microwave sensors, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 38, Jan. 2002, pp. 105–113.
- F. T. Ulaby, M. K. Moore, and A. K. Fung, Microwave Remote Sensing, Active and Passive. Norwood, MA: Artech House, vol. 2, 1982.
- Balenzano A., Mattia F., Satalino G., Pauwels V., Snoeij P., SMOSAR algorithm for soil moisture retrieval using Sentinel-1 data. In Proceedings of the 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Munich, Germany, 22–27 July 2012; pp. 1200–1203.
- A. Balenzano, et al., Dense temporal series of C- and L-band SAR data for soil moisture retrieval over agricultural crops, IEEE J-STARS, vol. 4, no.2, June, 2011, pp. 439-450.

S.Khabazan, M.Motagh, M.Hosseini, Evaluation of Radar Backscattering Models IEM, OH, and Dubois using L and C-Bands SAR Data over different vegetation canopy covers and soil depths, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W3, Tehran, Iran, 2013

N. Baghdadi, M. Zribi, Evaluation of radar backscatter models IEM, OH and Dubois using experimental observations, International Journal of Remote Sensing, Vol.27, No. 18, September 2006, p. 3831-3852.

G. Macelloni, S. Paloscia, P. Pampaloni, F. Marliani, M. Gai, The relationship between the backscattering coefficient and the biomass of narrow and broad leaf crops. IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 39, 2001, p. 873-884.

R. Bindlish, A.P. Barros, Parameterization of vegetation backscatter in radarbased, soil moisture estimation. Rem. Sens. Environ. 76, 2001, p.130-137.

A.T Joseph, R. van der Velde, P.E O'Neill, R.E Lang, T. Gish, Effects of corn on C- and L-band radar backscatter: a correction method for soil moisture retrieval. Rem. Sens. Environ, 114, 2010, p. 2417-2430.

G. Satalino, A. Balenzano, F. Mattia, M.W.J Davidson, C-band SAR data for mapping crops dominated by surface or volume scattering. IEEE Geosci. Rem. Sens. Lett. 11, 2014, p. 384-388.

J. Richards, Remote Sensing with Imaging Radar, 2009.

T. Weiß, sar-pre-processing Documentation, 2018

Πηγές στο διαδίκτυο

https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3964/1/02_chapter_4.pdf

<https://landsat.gsfc.nasa.gov>

<https://earth.esa.int>

<https://sentinel.esa.int>

<https://www.stevenswater.com>

<https://www.carbonbrief.org>

<http://www.ipgrb.gr>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας Α1: Αποτελέσματα εκτίμησης εδαφικής υγρασίας της 06 Ιουλίου 2018, της περιόδου ανάπτυξης των φυτών « Εμφάνιση ανθοφόρων-βλαστοφόρων βλαστών»

Ημερομηνία	Αριθμός εικόνων επεξεργασίας	Ημερομηνίες εικόνων επεξεργασίας	Ημερομηνία οπτικής εικόνας	First zero Doppler azimuth time (Local time)	Last zero Doppler azimuth time (Local time)	Σταθμός	Στάδιο ανάπτυξης φυτού	Εκτίμηση εδαφικής υγρασίας (m ³ /m ³)	Αβεβαιότητα Εκτίμησης	Μέτρηση εδαφικής υγρασίας στις 19:00 στα 10cm (m ³ /m ³)	Διαφορά μετρημένης εδαφικής υγρασίας με εκτιμώμενη (m ³ /m ³)
06_07_2018	1+1	06_07_2018 30_06_2018	08_06_2018	19:15:52	19:16:17	1	-	0,106	2	-	-
						2	-	0,269	2	-	-
						3	Εμφάνιση των χτενιών στον 6ο κόμβο 40 – 50 ημ. από το φυτόρωμα	0,167	2	0,442	0,275
						4	Εμφάνιση ανθοφόρων-βλαστοφόρων βλαστών	0,365	2	0,26	-0,105
						5	Εμφάνιση ανθοφόρων-βλαστοφόρων βλαστών	0,354	2	-	-
						6	Εμφάνιση ανθοφόρων-βλαστοφόρων βλαστών	0,050	2	0,22	0,170
						7	Άνθηση	0,054	2	0,364	0,310

						8	-	0,241	2	-	-
06_07_2018	1+2	06_07_2018 30_06_2018 24_06_2018	08_06_2018	19:15:52	19:16:17	1	-	0,297	1	-	-
						2	-	0,110	2	-	-
						3	Εμφάνιση των χτενιών στον 6ο κόμβο 40 – 50 ημ. από το φύτρωμα	0,075	2	0,442	0,367
						4	Εμφάνιση ανθοφόρων-βλαστοφόρων βλαστών	0,365	1	0,26	-0,105
						5	Εμφάνιση ανθοφόρων-βλαστοφόρων βλαστών	0,354	1	-	-
						6	Εμφάνιση ανθοφόρων-βλαστοφόρων βλαστών	0,092	2	0,220	0,128
						7	Άνθηση	0,181	2	0,364	0,183
						8	-	0,241	1	-	-
						06_07_2018	1+3	06_07_2018 30_06_2018 24_06_2018 18_06_2018	08_06_2018	19:15:52	19:16:17
2	-	0,184	2	-	-						
3	Εμφάνιση των χτενιών στον 6ο κόμβο 40 – 50 ημ. από το φύτρωμα	0,075	1	0,042	0,367						
4	Εμφάνιση ανθοφόρων-βλαστοφόρων βλαστών	0,258	1	0,26	0,002						

						5	Εμφάνιση ανθοφόρων- βλαστοφόρων βλαστών	0,216	1	-	-
						6	Εμφάνιση ανθοφόρων- βλαστοφόρων βλαστών	0,092	1	0,220	0,128
						7	Άνθηση	0,280	1	0,364	0,084
						8	-	0,241	1	-	-
06_07_2018	1+4	06_07_2018 30_06_2018 24_06_2018 18_06_2018 12_06_2018	08_06_2018	19:15:52	19:16:17	1	-	0,297	1	-	-
						2	-	0,184	1	-	-
						3	Εμφάνιση των χτενιών στον 6ο κόμβο 40 – 50 ημ. από το φύτρωμα	0,202	1	0,042	0,240
						4	Εμφάνιση ανθοφόρων- βλαστοφόρων βλαστών	0,258	1	0,26	0,002
						5	Εμφάνιση ανθοφόρων- βλαστοφόρων βλαστών	0,216	1	-	-
						6	Εμφάνιση ανθοφόρων- βλαστοφόρων βλαστών	0,092	1	0,220	0,128
						7	Άνθηση	0,28	1	0,364	0,084
						8	-	0,34	1	-	-

Πίνακας Α2: Αποτελέσματα εκτίμησης εδαφικής υγρασίας της 30 Ιουλίου 2018, της περιόδου ανάπτυξης των φυτών « Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας»

Ημερομηνία	Αριθμός εικόνων επεξεργασίας	Ημερομηνίες εικόνων επεξεργασίας	Ημερομηνία οπτικής εικόνας	First zero Doppler azimuth time (Local Time)	Last zero Doppler azimuth time (Local Time)	Σταθμός	Στάδιο ανάπτυξης φυτού	Εκτίμηση εδαφικής υγρασίας (m ³ /m ³)	Αβεβαιότητα Εκτίμησης	Μέτρηση εδαφικής υγρασίας στις 19:00 στα 10cm (m ³ /m ³)	Διαφορά μετρημένης εδαφικής υγρασίας με εκτιμώμενη (m ³ /m ³)
30_07_2018	1+1	30_07_2018 24_07_2018	10_07_2018	19:15:53	19:16:18	1	-	0,35	3	-	-
						2	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,174	3	0,161	-0,013
						3	Δέσιμο καψών (καρυδιών)	0,191	3	0,450	0,259
						4	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,082	3	0,257	0,175
						5	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,358	2	0,434	0,076
						6	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,280	3	0,396	0,116
						7	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και	0,266	3	0,412	0,146

							ανθοφορίας				
						8	Δέσιμο καψών (καρυδιών)	0,234	3	0,237	0,003
30_07_2018	1+2	30_07_2018 24_07_2018 18_07_2018	10_07_2018	19:15:53	19:16:18	1	-	0,326	3	-	-
						2	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,315	3	0,161	-0,154
						3	Δέσιμο καψών (καρυδιών)	0,326	3	0,450	0,124
						4	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,082	2	0,257	0,175
						5	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,358	2	0,434	0,076
						6	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,280	3	0,396	0,116
						7	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,266	2	0,412	0,146
						8	Δέσιμο καψών (καρυδιών)	0,326	3	0,237	-0,089
30_07_2018	1+3	30_07_2018 24_07_2018 18_07_2018 12_07_2018	10_07_2018	19:15:53	19:16:18	1	-	0,315	2	-	-
						2	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,315	3	0,161	-0,154
						3	Δέσιμο καψών	0,191	2	0,450	0,259

							(καρυδιών)				
						4	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,082	2	0,257	0,175
						5	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,358	1	0,434	0,076
						6	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,280	3	0,396	0,116
						7	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,266	2	0,412	0,146
						8	Δέσιμο καψών (καρυδιών)	0,326	3	0,237	-0,089
30_07_2018	1+4	30_07_2018 24_07_2018 18_07_2018 12_07_2018 06_07_2018	10_07_2018	19:15:53	19:16:18	1	-	0,315	2	-	-
						2	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,315	3	0,161	-0,154
						3	Δέσιμο καψών (καρυδιών)	0,191	2	0,450	0,259
						4	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,230	2	0,257	0,027
						5	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,358	1	0,434	0,076

						6	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,280	3	0,396	0,116
						7	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,266	2	0,412	0,146
						8	Δέσιμο καψών (καρυδιών)	0,326	3	0,237	-,0089

Πίνακας Α3: Αποτελέσματα εκτίμησης εδαφικής υγρασίας της 04 Σεπτεμβρίου 2018, της περιόδου ανάπτυξης των φυτών « Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων».

Ημερομηνία	Αριθμός εικόνων επεξεργασίας	Ημερομηνίες εικόνων επεξεργασίας	Ημερομηνία οπτικής εικόνας	First zero Doppler azimuth time (Local time)	Last zero Doppler azimuth time (Local Time)	Σταθμός	Στάδιο ανάπτυξης φυτού	Εκτίμηση εδαφικής υγρασίας (m ³ /m ³)	Αβεβαιότητα Εκτίμησης	Μέτρηση εδαφικής υγρασίας στις 19:00 στα 10cm (m ³ /m ³)	Διαφορά μετρημένης εδαφικής υγρασίας με εκτιμώμενη (m ³ /m ³)
04_09_2018	1+1	04_09_2018 29_08_2018	27_08_2018	19:15:56	19:16:21	1	-	0,396	3	-	-
						2	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,181	3	0,05	-0,131
						3	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,053	2	0,317	0,264
						4	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,050	2	0,246	0,196
						5	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,319	2	0,424	0,105

						6	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,290	2	0,276	-0,014
						7	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,283	2	0,182	-0,101
						8	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,361	2	0,304	-0,057
04_09_2018	1+3	04_09_2018 29_08_2018 23_08_2018 17_08_2018	27_08_2018	19:15:56	19:16:21	1	-	0,333	2	-	-
						2	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,343	2	0,05	-0.293
						3	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,117	2	0,317	0.200
						4	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,114	2	0,246	0.132

						5	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,258	2	0,424	0.166
						6	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,124	2	0,276	0.152
						7	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,283	2	0,182	-0,101
						8	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,389	2	0,304	-0,085
04_09_2018	1+4	04_09_2018 29_08_2018 23_08_2018 11_08_2018	27_08_2018	19:15:56	19:16:21	1	-		2	-	-
						2	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων		2	0,05	-0.293
						3	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων		2	0,317	0.200

						4	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων		2	0,246	0.132
						5	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων		2	0,424	0.166
						6	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων		2	0,276	0.152
						7	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων		2	0,182	-0,101
						8	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων		2	0,304	-0,085
04_09_2018	1+3	04_09_2018 29_08_2018 23_08_2018	27_08_2018	19:15:56	19:16:21	1	-	0,333	2	-	-
						2	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,379	2	0,05	-0,329

						3	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,054	2	0,317	0,263
						4	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,114	2	0,246	0,132
						5	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,258	2	0,424	0,166
						6	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,343	1	0,276	-0,067
						7	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,382	2	0,182	-0,200
						8	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,389	2	0,304	-0,085

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πίνακας Β1: Αποτελέσματα εκτίμησης εδαφικής υγρασίας της όλης περιόδου (06 Ιουλίου έως 16 Σεπτεμβρίου 2018), με αριθμό εικόνων επεξεργασίας 1+1.

Ημερομηνία	Αριθμός εικόνων επεξεργασίας	Ημερομηνίες εικόνων επεξεργασίας	Ημερομηνία οπτικής εικόνας	First zero Doppler azimuth time (Local time)	Last zero Doppler azimuth time (Local Time)	Σταθμός	Στάδιο ανάπτυξης φυτού	Εκτίμηση εδαφικής υγρασίας (m ³ /m ³)	Αβεβαιότητα Εκτίμησης	Μέτρηση εδαφικής υγρασίας στις 19:00 στα 10cm (m ³ /m ³)	Διαφορά μετρημένης εδαφικής υγρασίας με εκτιμώμενη (m ³ /m ³)
06_07_2018	1+1	06_07_2018 30_06_2018	08_06_2018	19:15:52	19:16:17	1	-	0,106	2	-	-
						2	-	0,269	2	-	-
						3	Εμφάνιση των χτενιών στον 6ο κόμβο 40 – 50 ημ. από το φύτρωμα	0,167	2	0,042	0,275
						4	Εμφάνιση ανθοφόρων-βλαστοφόρων βλαστών	0,365	2	0,260	-0,105
						5	Εμφάνιση ανθοφόρων-βλαστοφόρων βλαστών	0,354	2	-	-
						6	Εμφάνιση ανθοφόρων-βλαστοφόρων βλαστών	0,050	2	0,220	0,170
						7	Άνθηση	0,054	2	0,364	0,310
						8	-	0,241	2	-	-

12_07_2018	1+1	12_07_2018 06_07_2018	10_07_2018	19:15:08	19:15:33	1	-	0,082	2	-	-
						2	Άνθηση	0,297	3	0,131	-0,166
						3	Εμφάνιση ανθοφόρων- βλαστοφόρων βλαστών	0,114	2	0,314	0,200
						4	Άνθηση	0,280	2	0,331	0,051
						5	-	0,124	2	-	-
						6	Άνθηση	0,333	3	0,153	-0,180
						7	Γονιμοποίηση	0,365	2	0,319	-0,046
						8	-	0,121	3	-	-
18_07_2018	1+1	18_07_2018 12_07_2018	10_07_2018	19:15:53	19:16:18	1	-	0,276	2	-	
						2	Γονιμοποίηση	0,361	3	0,084	-0,277
						3	Άνθηση	0,283	2	0,258	-0,025
						4	Γονιμοποίηση	0,266	2	0,296	0,030 -0,206 0,000 0,004
						5	-	0,206	2	-	-0,206
						6	Γονιμοποίηση	0,149	3	0,149	0,000
						7	Δέσιμο καψών (καρυδιών)	0,294	2	0,298	0,004
						8	-	0,308	3		-
24_07_2018	1+1	24_07_2018 18_07_2018	10_07_2018	19:15:09	19:15:34	1	-	0,333	3	-	-
						2	Δέσιμο καψών (καρυδιών)	0,315	3	0,151	-0,164
						3	Γονιμοποίηση	0,205	3	0,276	0,071
						4	Δέσιμο καψών (καρυδιών)	0,156	2	0,239	0,083
						5	-	0,350	2	-	-

						6	Δέσιμο καψών (καρυδιών)	0,099	3	0,287	0,188
						7	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,075	2	0,409	0,334
						8	-	0,234	3	-	-
30_07_2018	1+1	30_07_2018 24_07_2018	10_07_2018	19:15:53	19:16:18	1	-	0,35	3	-	-
						2	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,174	3	0,161	-0,013
						3	Δέσιμο καψών (καρυδιών)	0,191	3	0,450	0,259
						4	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,082	3	0,257	0,175
						5	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,358	2	0,434	0,076
						6	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,280	3	0,396	0,116
						7	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,266	3	0,412	0,146
						8	Δέσιμο καψών (καρυδιών)	0,234	3	0,237	0,003

5_08_2018	1+1	5_08_2018 30_07_2018	10_07_2018	19:15:10	19:15:35	1	-	0,099	2	-	-
						2	Ανάπτυξη καψών	0,145	3	0,4	0,255
						3	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,128	2	0,256	0,128
						4	Ανάπτυξη καψών	0,184	2	0,117	-0,067
						5	Ανάπτυξη καψών	0,092	2	-	-0,092
						6	Ανάπτυξη καψών	0,174	3	0,352	0,178
						7	Ανάπτυξη καψών	0,329	2	0,346	0,017
						8	Ολοκλήρωση βλαστικής ανάπτυξης και ανθοφορίας	0,078	3	0,126	0,048
11_08_2018	1+1	11_08_2018 05_08_2018	11_08_2018	19:15:54	19:16:19	1	-	0,389	2	-	-
						2	Ανάπτυξη καψών	0,297	3	0,417	0,120
						3	Ανάπτυξη καψών	0,206	2	0,117	-0,089
						4	Ανάπτυξη καψών	0,308	2	0,071	-0,237
						5	Ανάπτυξη καψών	0,389	2	0,442	0,053
						6	Ανάπτυξη καψών	0,223	3	0,235	0,012
						7	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,244	2	0,384	0,140
						8	Ανάπτυξη καψών	0,308	3	0,182	-0,126
17_08_2018	1+1	17_08_2018 11_08_2018	11_08_2018	19:15:11	19:15:36	1	-	0,365	2	-	-
						2	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού	0,135	3	0,159	0,024

							των φύλλων				
						3	Ανάπτυξη καψών	0,301	2	0,397	0,096
						4	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,106	3	0,209	0,103
						5	Ανάπτυξη καψών	0,308	2	0,299	-0,009
						6	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,329	3	0,433	0,104
						7	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,198	3	0,409	0,211
						8	Ανάπτυξη καψών	0,379	2	0,229	-0,150
23_08_2018	1+1	23_08_2018 17_08_2018	11_08_2018	19:15:55	19:16:20	1	-	0,347	2	-	-
						2	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,382	3	0,067	-0,315
						3	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,188	3	0,48	0,292

						4	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,227	3	0,05	-0,177
						5	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,251	2	0,302	0,051
						6	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,216	3	0,244	0,028
						7	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,159	2	0,208	0,049
						8	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,29	3	0,252	-0,038
29_08_2018	1+1	29_08_2018 23_08_2018	27_08_2018	19:15:11	19:15:36	1	-	0,241	2	-	-
						2	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,35	2	0,058	-0,292
						3	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,089	2	0,477	0,388

						4	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,304	2	0,207	-0,097
						5	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,262	2	0,337	0,075
						6	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,092	2	0,346	0,254
						7	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,35	2	0,392	0,042
						8	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,234	2	0,146	-0,088
04_09_2018	1+1	04_09_2018 29_08_2018	27_08_2018	19:15:56	19:16:21	1	-	0,396	3	-	-
						2	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,181	3	0,05	-0,131
						3	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,053	2	0,317	0,264

						4	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,050	2	0,246	0,196
						5	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,319	2	0,424	0,105
						6	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,290	2	0,276	-0,014
						7	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,283	2	0,182	-0,101
						8	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,361	2	0,304	-0,057
10_09_2018	1+1	10_09_2018 04_09_2018	27_08_2018	19:15:12	19:15:37	1	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,358	2	-	-
						2	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,131	2	0,048	-0,083
						3	Ολοκλήρωση	0,206	2	0,45	0,244

							ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων				
						4	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,252	2	0,109	-0,143
						5	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,213	2	0,236	0,023
						6	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,191	2	0,187	-0,004
						7	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,237	2	0,135	-0,102
						8	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,244	2	0,277	0,033
16_09_2018	1+1	16_09_2018 10_09_2018	27_08_2018	19:15:56	19:16:21	1	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,269	3	-	-
						2	Ολοκλήρωση	0,135	3	0,04	-0,095

							ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων				
						3	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,396	2	0,328	-0,068
						4	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,085	3	0,055	-0,030
						5	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,312	2	0,189	-0,123
						6	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,206	2	0,149	-0,057
						7	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,294	2	0,113	-0,181
						8	Ολοκλήρωση ανάπτυξης καψών. Έναρξη αποχρωματισμού των φύλλων	0,252	3	0,226	-0,026