



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**Συμβολή της τηλεπισκόπησης στην εκτίμηση της
εδαφικής υγρασίας**

Διπλωματική Εργασία
Μέξης Φίλιππος Δημήτριος

Συμβουλευτική επιτροπή:
Καθηγητής Ιωάννης Τσάνης (Επιβλέπων)
Καθηγητής Γεώργιος Καρατζάς
Δρ. Δημήτριος Αλεξάκης

Χανιά 2015

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον καθηγητή Ιωάννη Τσάνη για την ανάθεση της εργασίας, την επίβλεψη και την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ με το εργαστήριο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον καθηγητή Γεώργιο Καρατζά για τη βοήθεια και τις χρήσιμες παρατηρήσεις του ως μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής καθώς επίσης και τον Δρ. Δημήτρη Αλεξάκη για τη συνεχή βοήθεια και την διαθεσιμότητα του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Δεν θα μπορούσα, βεβαίως, να παραλείψω να ευχαριστήσω το σύνολο των μεταπτυχιακών, διδακτορικών και μεταδιδακτορικών ερευνητών του εργαστηρίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής που με την φιλοξενία τους με έκαναν να νιώσω άνετα από την πρώτη κιόλας στιγμή που ξεκίνησα την διπλωματική εργασία, καθώς και για την παραχώρηση γραφείου και σύγχρονου υπολογιστικού εξοπλισμού εντός του εργαστηρίου για πραγμάτωσή της. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ, Ιωάννη Δαλιακόπουλο για την παροχή των αισθητήρων μέτρησης υγρασίας εδάφους καθώς και τους Δρ. Εμμανουήλ Γρυλλάκη, Σωτήρη Τσιτσιλώνη και Ιωάννα Παναγέα για τη βοήθεια τους στην εγκατάσταση των αισθητήρων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το πρόσωπο που στάθηκε δίπλα μου όλο το χρονικό διάστημα της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, τους φίλους μου καθώς και τους γονείς μου.

Περίληψη:

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια ανάλυσης και ερμηνείας των μετρήσεων του προσφάτως εκτοξευμένου δορυφόρου Sentinel 1 τεχνολογίας radar έτσι ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση της υγρασίας του εδάφους. Η ανάλυση έλαβε χώρα μέσω της παλινδρόμησης επίγειων μετρήσεων πεδίου και των αντίστοιχων δορυφορικών δεδομένων με την εφαρμογή κλασσικών μεθόδων

στατιστικής παλινδρόμησης αλλά και με την χρήση νευρωνικών δικτύων προσαρμογής συνάρτησης.

Στην προσπάθεια βελτίωσης των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν και δεδομένα του δορυφόρου Landsat 8 που ανήκει στην κατηγορία της παθητικής τηλεπισκόπησης. Με την χρήση του δεδομένων του Landsat 8 δημιουργήθηκαν χάρτες βλάστησης για την περιοχή μελέτης, οι τιμές των οποίων συγχωνεύτηκαν στην παλινδρόμηση για την βελτίωση των αποτελεσμάτων.

Μεγάλο κομμάτι της εργασίας αποτελεί η προεπεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων τόσο του Sentinel 1, όσο και του Landsat 8. Η προεπεξεργασία είναι απαραίτητη καθώς απαλλάσσει τις εικόνες από ατμοσφαιρικές παρεμβολές, πραγματοποιούνται ψηφιακές μετατροπές, εφαρμόζονται ψηφιακά φίλτρα και τις καθιστά κατάλληλες για την λήψη των τιμών των εικονοστοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν στην παλινδρόμηση.

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται εντός του νομού Χανίων και αποτελείται από 4 σημεία στα οποία τοποθετήθηκαν ψηφιακοί αισθητήρες μέτρησης της εδαφικής υγρασίας. Η θέση των σημείων καταγράφηκε με την χρήση GPS για λόγους ακρίβειας κατά την συσχέτισή τους με τα δορυφορικά δεδομένα. Οι μετρήσεις λαμβάνονταν σε σταθερή βάση καταγράφοντας την εδαφική υγρασία σε χρονοσειρές με την βοήθεια καταγραφικών συστημάτων σε κάθε σημείο.

Τέλος, έγινε προσπάθεια ερμηνείας των αποτελεσμάτων και διερευνήθηκαν οι λόγοι για τους οποίους παρουσιάζεται μικρή συσχέτιση των δορυφορικών δεδομένων με τις επίγειες μετρήσεις. Παράλληλα προτάθηκαν τρόποι και ιδέες για περαιτέρω μελέτη του αντικειμένου και την εύρεση του βέλτιστου τρόπου συσχέτισης για την ασφαλή και έγκυρη εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας με την χρήση της δορυφορικής τηλεπισκόπησης.

Abstract:

Soil moisture is a key variable to environments natural cycle, farming, soil quality and, as well, it is related to climate change and meteorological phenomena. Though, the majority of the datasets acquired and available to the scientific community depend on ground measurements which are expensive and time consuming. As a result, soil moisture time series datasets have a low spatial and temporal resolution making it difficult to actualize extensive environmental researches and studies.

Remote sensing has the potential to overcome the limits of ground measurement and to contribute to the almost real time and accurate soil moisture content satellite measurements. There is a plethora of studies on passive remote sensing that accomplishes accurate soil moisture content measurements at global scale, but when it comes to microwave active remote sensing there is a need for further research and optimization.

In this pre-graduate thesis it is held an effort to relate ground measurements of soil moisture content in the area of Chania to satellite backscatter measurement of the active remote sensing Sentinel 1 mission. This was accomplished using classical single and multiple linear regression methods and nonlinear function fitting neural networks. Moreover in the methods described above it was integrated an vegetation index (NDVI) produced by the images of the passive remote sensing Landsat 8 satellite, as it is known that vegetation is one of the major factors that interpolate the microwave signal, when it comes to soil moisture content measurements.

Once the regression was completed and the neural network was trained a validation followed, utilizing measurements that where not integrated in the methods in the first place. Last, the conclusions were discussed and future outlook was given.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη:	2
Abstract:	4
Εισαγωγή.....	13
1.1. Σκοπός εργασίας	13
1.2. Γενικά για τη Δορυφορική Τηλεπισκόπηση	14
1.2.1 Ενεργητική Τηλεπισκόπηση - Τεχνολογία ραδιοεντοπισμού RADAR	16
1.2.2 Παθητική Τηλεπισκόπηση- Πολυφασματικοί Δορυφόροι.....	19
1.2.3 Γενικά Χαρακτηριστικά Ψηφιακών Δορυφορικών Εικόνων	20
1.3 Εδαφική μέτρηση υγρασίας.....	23
1.4 Δορυφορική Τηλεπισκόπηση και μέτρηση υγρασίας	27
1.4.1 Δορυφόρος Sentinel 1	31
1.4.2 Δορυφόρος Landsat 8	33
1.4.3 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)	37
1.4.3 SMOS (Soil Moisture & Ocean Salinity).....	37
1.4.4 Soil Moisture Active Passive (SMAP)	38
1.4.5 ETOP	39
2 Μεθοδολογία	41
2.1 Μεθοδολογία.....	41
2.2 Περιοχή Μελέτης	44
2.3 Δεδομένα.....	48
2.3.1 Επίγειες μετρήσεις	48

2.3.2	Ψηφιακές τιμές εικονοστοιχείων (Digital Numbers).....	51
2.3.3	Μετεωρολογικά Δεδομένα	53
2.3.4	Συνδυαστικά Διαγράμματα	54
3	Επεξεργασία Δορυφορικών εικόνων	58
3.1	Προεπεξεργασία εικόνων Sentinel 1	58
3.1.1	Λήψη.....	58
3.1.2	Ραδιομετρική διόρθωση (Radiometric Calibration).....	59
3.1.3	Τοπογραφική Διόρθωση (Terrain Correction).....	62
3.1.4	Μετατροπή Κλίμακας και Εξαγωγή Εικόνας	64
3.2	Προεπεξεργασία εικόνων Landsat 8.....	67
3.2.1	Λήψη Δορυφορικών Δεδομένων από την εφαρμογή Earth Explorer της USGS (United States Geological Survey).....	67
3.2.2	Συγχώνευση Καναλιών.....	70
3.2.3	Ατμοσφαιρική Διόρθωση	71
3.2.4	Μέθοδος αφαίρεσης σκοτεινού σημείου (Dark Object Subtraction- DOS)	74
3.3	Υπολογισμός δεικτών βλάστησης.....	78
4	Στατιστική ανάλυση.....	82
4.1	Γραμμική Παλινδρόμηση.....	82
4.2	Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση.....	83
4.3	Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης της παλινδρόμησης.....	84
4.3	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks- ANN)	86
4	Αποτελέσματα	88
5.1	Δορυφόρος Sentinel 1	88
5.1.1	Απλή γραμμική παλινδρόμηση	88

5.1.2	Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση	91
5.1.3	Νευρωνικά Δίκτυα	95
5.2	Δορυφόρος Landsat 8.....	103
5.3	Επαλήθευση Μοντέλων	104
5	Συμπεράσματα.....	106
6	Βιβλιογραφία	109
	Ξενόγλωσση	109
	Ελληνική	113

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Κατηγορίες αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπηση (Χρυσουλάκης, 2011)	14
Εικόνα 2. Κατοπτρική και διάχυτη ανάκλασης (Τζωρτζάκης, 2014).....	15
Εικόνα 3. Αρχή Λειτουργίας του RADAR (Βικιπέδια, 2015).....	16
Εικόνα 4. Δορυφορική απεικόνιση Sentinel 1 της πόλης των Χανίων και του Ακρωτηρίου	17
Εικόνα 5. Η καταγραφή της ακτινοβολίας από το radar, όπως αυτή ανακλάται από το έδαφος.....	18
Εικόνα 6. Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας ενός παθητικού συστήματος τηλεπισκόπησης.....	19
Εικόνα 7. Απόκριση μεταβλητών του φυσικού περιβάλλοντος συναρτήσει του εύρους μήκους κύματος (Τζωρτζάκης, 2014)	20
Εικόνα 8. Ψηφιακό Πλέγμα Δορυφορικών Εικόνων (Ποϊραζίδης, Δ., Γ., & Λορίλια, 2013).....	21
Εικόνα 9. Συγκριτική Απεικόνιση Εικόνων με διαφορετική χωρική διακριτική ικανότητα (Τζωρτζάκης, 2014)	22
Εικόνα 10. Κορεσμένες και ακόρεστες ζώνες εδάφους (Seneviratne et al., 2010)	25
Εικόνα 11. Απεικόνιση Συνθηκών εδαφικής υγρασίας (Θεοχάρης, 2015)...	26
Εικόνα 12. Τα πραγματικά (ε') και θεωρητικά (ε'') χαρακτηριστικά της διηλεκτρικής σταθεράς για μία αργιλώδης μίξη σε συνάρτηση με την υγρασία του μίγματος. Η απορρόφηση αυξάνεται με την αύξηση της υγρασίας. Η αντανάκλαση (οπισθοσκέδαση) θα αυξηθεί, αντίστοιχα, με την αύξηση του (ε') (The-Crankshaft Publishing, n.d.)	29
Εικόνα 13. Επίδραση της επιφάνειας και της δομής του εδάφους στην οπισθοσκέδαση της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Courtesy Goodyear Aerospace Corp. (2011)	30

Εικόνα 14 . Συγκριτική Φασματική ανάλυση του δορυφόρου Landsat 8 OLI & TIRS καθώς και του Landsat 7 ETM+ (National Aeronautics and Space Administration, 2015)	34
Εικόνα 15. Αποτέλεσμα δείκτη NDWI & Περιοχές Μελέτης	36
Εικόνα 16. Αλατότητα των ωκεανών (ESA/R. Sabia, 2015)	38
Εικόνα 17. Τρόπος λειτουργίας και καταγραφής του συμβολόμετρου IASI (EUMETSAT, 2015)	40
Εικόνα 18 Άποψη του οικοπέδου κα της ευρύτερης περιοχής στην οποία έχει τοποθετηθεί το υγρασιόμετρο 1 (Περιοχή μελέτης 1)	44
Εικόνα 19. Λήψη δεδομένων από το καταγραφικό στην περιοχή μελέτης 1	44
Εικόνα 20. Καταγραφή της ακριβούς θέσης υγρασιόμετρου περιχοής μελέτης 1 με την χρήση GPS υψηλής ακρίβειας.....	44
Εικόνα 21. Χάρτης της ευρύτερης περιοχής των Χανίων & περιοχές μελέτης	45
Εικόνα 22. Καταγραφή ακριβούς θέσης υγρασιόμετρου στην περιοχή μελέτης 2 με την χρήση GPS	46
Εικόνα 23. Άποψη του οικοπέδου κα της ευρύτερης περιοχής στην οποία έχει τοποθετηθεί το υγρασιόμετρο 2 (Περιοχή μελέτης 2)	46
Εικόνα 24. Άποψη καταγραφικού στην περιοχή μελέτης 3	46
Εικόνα 25. Άποψη του οικοπέδου κα της ευρύτερης περιοχής στην οποία έχει τοποθετηθεί το υγρασιόμετρο 3 (Περιοχή μελέτης 3)	46
Εικόνα 26. Άποψη του οικοπέδου κα της ευρύτερης περιοχής στην οποία έχει τοποθετηθεί το υγρασιόμετρο 4 (Περιοχή μελέτης 4)	47
Εικόνα 27. Καταγραφή ακριβούς θέσης υγρασιόμετρου στην περιοχή μελέτης 3 με την χρήση GPS	47
Εικόνα 28. Αισθητήρας Υγρασίας Εδάφους Decagon EC-5 (DECAGON, 2015)	48
Εικόνα 29. Sentinels Scientific Data Hub.....	58
Εικόνα 30. Οριοθέτηση περιοχής για την αναζήτηση εικόνων Sentinel μέσω του Sentinel 1 Data Hub	58

Εικόνα 31. Απεικόνιση αποτελεσμάτων αναζήτησης δορυφορικών προϊόντων στον ηλεκτρονικό δίαυλο του Sentinel 1	59
Εικόνα 32. Λογότυπο εκκίνησης Sentinel 1 Toolbox	59
Εικόνα 33. Καρτέλα I/O Parameters παραθύρου διαλόγου βαθμονόμηση λογισμικού Sentinel 1 Toolbox.....	61
Εικόνα 34. Παράθυρο διαλόγου βαθμονόμησης περιβάλλοντος λογισμικού Sentinel 1 Toolbox.....	61
Εικόνα 35 Παραμόρφωση απεικονιζόμενων αντικειμένων από αισθητήρες Radar (ESA, 2015c).....	62
Εικόνα 36. Καρτέλα Procesing Parameters του παραθύρου διαλόγου ορθοαναγωγής Range Doppler Terrain Correction	62
Εικόνα 37. Περιβάλλον λογισμικού Sentinel 1 Toolbox, αλλαγή κλίμακας δεδομένων εικόνας από γραμμική κλίμακα σε λογαριθμική (dB)	65
Εικόνα 38. Περιβάλλον λογισμικού Sentinel 1 Toolbox, παράθυρο διαλόγου εξαγωγής και περικοπής εικόνας.	65
Εικόνα 39. Οριοθέτηση περιοχής αναζήτησης για την αναζήτηση δορυφορικών εικόνων Landsat 8 από την εφαρμογή Earth Explorer	67
Εικόνα 40. Επιλογή δεδομένων προς λήψη όπως φαίνεται στο αριστερό παράθυρο της σ εφαρμογής Earth Explorer	68
Εικόνα 41. Διαθέσιμες δορυφορικές εικόνες Landsat 8 προς λήψη στην εφαρμογή Earth Explorer.....	69
Εικόνα 42 . Εύρος συχνοτήτων, είδος χρήσης και χωρική ανάλυση των καναλιών του Landsat 8 OLI & TIRS	70
Εικόνα 43. Παράθυρο διαλόγου εργαλείου συγχώνευσης εικόων του λογισμικού Erdas Imagine.....	71
Εικόνα 44. Περιβάλλον λογισμικού Erdas Image, διάγραμμα ροής αλγορίθμου εφαρμογής ατμοσφαιρικής διόρθωσης σε δορυφορικό προϊόν Landsat 8.	74
Εικόνα 45. Μάσκες λίμνης στο λογισμικό ArcMap.....	76
Εικόνα 46. Παράθυρο διαλόγου εργαλείου Zonal Statistics του λογισμικού ArcMap.....	76

Εικόνα 47. Διάγραμμα ροής του αλγόριθμου για την μέθοδο αφαίρεσης σκοτεινού σημείου	77
Εικόνα 48. Εργαλείο υπολογισμού NDVI στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού ERDAS Imagine	79
Εικόνα 49. Παράθυρο διαλόγου Indices για τον υπολογισμό του NDVI στο ERDAS Imagine	80
Εικόνα 50. Χάρτης Κανονικοποιημένου Δείκτη Βλάστησης.....	81
Εικόνα 51. Διάγραμμα ενός απλού νευρωνικού δικτύου.....	87
Εικόνα 52. Neural Network Training Tool.....	98

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1. Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας	43
Διάγραμμα 2. Διαγραμματική απεικόνιση οπισθοσκέδασης VV, Βροχόπτωσης και δείκτη NDVI για την περιοχή μελέτης 1	55
Διάγραμμα 3. Διαγραμματική απεικόνιση οπισθοσκέδασης VV, Βροχόπτωσης και δείκτη NDVI για την περιοχή μελέτης 2	55
Διάγραμμα 4. Διαγραμματική απεικόνιση οπισθοσκέδασης VV, Βροχόπτωσης και δείκτη NDVI για την περιοχή μελέτης 3	56
Διάγραμμα 5. Διαγραμματική απεικόνιση οπισθοσκέδασης VV, Βροχόπτωσης και δείκτη NDVI για την περιοχή μελέτης 4	56
Διάγραμμα 6.	88
Διάγραμμα 7.	89
Διάγραμμα 8.	90
Διάγραμμα 9. Αποτελέσματα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης	92
Διάγραμμα 10 Αποτελέσματα ενιαίας παλινδρόμησης.....	94
Διάγραμμα 11 Μη εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο προσαρμογής συνάρτησης.....	97
Διάγραμμα 12 Mean Squared Error	99
Διάγραμμα 13. Regression Plot.....	100
Διάγραμμα 14. Ιστόγραμμα Σφαλμάτων	101

Διάγραμμα 15. Αποτελέσματα εκπαίδευσης δικτύου με μεταβλητές εισόδου την οπισθοσκέδαση VH και VV και τον δείκτη βλNDVI.	103
--	-----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Ονομασία και μήκη κύματος των RADAR (Μερτίκας 1999)	18
Πίνακας 2. Βασικά χαρακτηριστικά δορυφορικών προϊόντων αποστολής Sentinel 1 (Torres et al., 2012).....	32
Πίνακας 3. Φασματική & χωρική ανάλυση καναλιών του Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) (United States Geological Survey, 2014)	34
Πίνακας 4 Χαρακτηριστικά αισθητήρα DECAGON EC-5 (DECAGON, 2015) .	49
Πίνακας 5. Ημερομηνία & ώρα λήψης δορυφορικών εικόνων Sentinel 1.....	52
Πίνακας 6. Ημερομηνία & ώρα λήψης δορυφορικών εικόνων Landsat 8	53
Πίνακας 7. Συντελεστές Pearson (Multiple R).....	88
Πίνακας 8. Συντελεστής προσδιορισμού R^2	89
Πίνακας 9 Σφάλμα Παλινδρόμησης	89
Πίνακας 10. Αποτελέσματα πολλαπλής παλινδρόμησης.....	93
Πίνακας 11. P-Values πολλαπλής παλινδρόμησης	93
Πίνακας 12. Αποτελέσματα ενιαίας παλινδρόμησης.....	94
Πίνακας 13 Αποτελέσματα εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων για διάφορους συνδυασμούς μεταβλητών εισόδου	102
Πίνακας 14 .Συντελεστής συσχέτισης R για τις επίγειες μετρήσεις υγρασίας εδάφους και τα αντίστοιχα δεδομένα του Landsat 8.....	103
Πίνακας 15. Επαλήθευση παλινδρομήσεων	104
Πίνακας 16. Αποτελέσματα επαλήθευσης νευρωνικού δικτύου με νέες τιμές	105

Εισαγωγή

1.1. Σκοπός εργασίας

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε με σκοπό την μελέτη της δυνατότητας της εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας, όχι με την κλασσική μέθοδο της εν πεδίω μέτρησης, αλλά μέσω προϊόντων τηλεπισκόπησης όπως είναι οι δορυφορικές εικόνες. Η ανάγκη της παρακολούθησης της μεταβλητότητας της εδαφικής υγρασίας τόσο χωρικά, όσο και χρονικά σε σταθερή βάση είναι αδιαμφισβήτητη, καθώς αποτελεί βασικό παράγοντα εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων και προβλημάτων, σχετίζεται άμεσα με τον υδρολογικό κύκλο, τα καιρικά φαινόμενα και δίνει στοιχεία για την ποιότητα και την δομή του εδάφους. Οι μετρήσεις εδαφικής υγρασίας είναι, επίσης, απαραίτητες για την αγροτική παραγωγή και την σωστή καλλιέργεια και διαχείριση των εδαφικών μέσων αλλά και της αποδοτικής παραγωγής για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών.

Δυστυχώς, λόγω των απαιτήσεων των μετρήσεων πεδίου, του μικρού σχετικά αριθμού τους και του αποσπασματικού χαρακτήρα τους δεν υπάρχουν ικανοποιητικές βάσεις δεδομένων ούτε επαρκής χαρτογράφηση της υγρασίας του εδάφους, τουλάχιστον σε ελεύθερο καθεστώς ευρείας διανομής. Κατά συνέπεια, αποτελεί ανάγκη η έγκυρη, άμεση και εύκολη εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας μέσω εναλλακτικών μεθόδων και προσεγγίσεων όπως αυτός της δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Με τον τρόπο αυτό θα είναι εύκολη η συστηματική και άμεση παρακολούθηση της υγρασίας εδαφών που βρίσκονται σε περιοχές υπό προστασία ή σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις, ενώ ο οποιοσδήποτε ενδιαφερόμενος μελετητής θα μπορεί να πραγματοποιεί λήψη δορυφορικών χαρτών εδαφικής υγρασίας για την σύνθεση χρονοσειρών ή την περαιτέρω μελέτη αυτών.

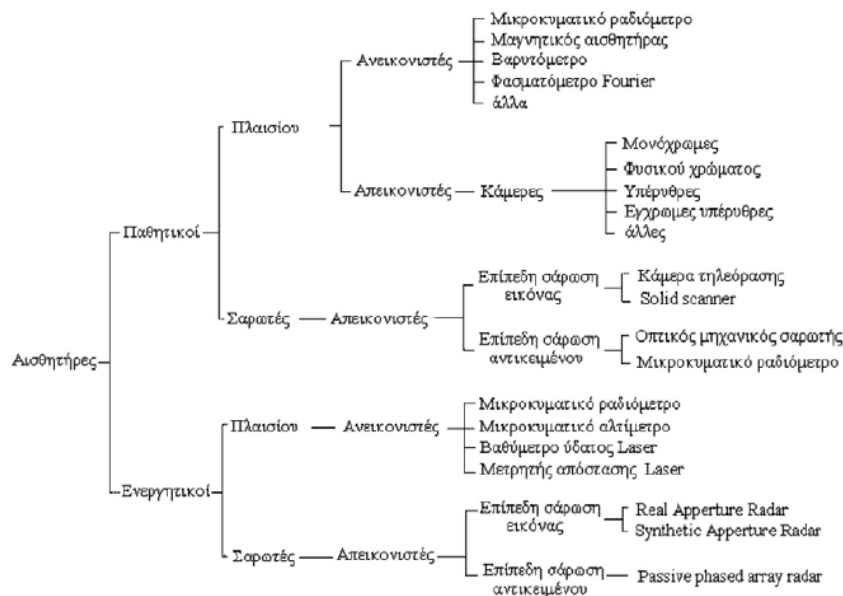
Πράγματι σε αρκετές μελέτες έχει αποδειχθεί ότι η τεχνολογία παθητικής τηλεπισκόπησης, αλλά και η χρήση δορυφορικών ραντάρ συνιστά ένα καλό και εύελκτο εργαλείο για την άμεση και εύκολη παρακολούθηση της υγρασίας στα πρώτα εκατοστά του εδάφους, καθώς και την καταγραφή της χωρικής και χρονικής

της μεταβλητότητας. (Gao et al., 2013; Lobell & Asner, 2002; Nocita, Stevens, Noon, & van Wesemael, 2013; Petropoulos, Ireland, & Barrett, 2015; Santi, Paloscia, Pettinato, & Fontanelli, 2015; Weidong et al., 2002)

1.2. Γενικά για τη Δορυφορική Τηλεπισκόπηση

Τηλεπισκόπηση καλείται η τεχνική συλλογής στοιχείων (δεδομένων) για τον προσδιορισμό της φύσης και των ιδιοτήτων ενός ή και περισσότερων αντικειμένων μιας περιοχής, από απόσταση (από τον αέρα ή το διάστημα), χωρίς τη φυσική επαφή με τα αντικείμενα αυτά (Αστάρας, 2006). Η δορυφορική τηλεπισκόπηση πραγματοποιείται με την χρήση δορυφόρων στους οποίους έχουν ενσωματωθεί αισθητήρες, οι οποίοι συλλέγουν δεδομένα για το προς μελέτη αντικείμενο.

Ανάλογα με τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στους δορυφόρους, καθώς και την φύση των δεδομένων που λαμβάνονται, οι δορυφόροι χωρίζονται σε κατηγορίες (Εικόνα 1) . Έτσι, η τηλεπισκόπηση διακρίνεται σε ενεργητική και παθητική, που αποτελούν τις δύο βασικές κατηγορίες και διακρίνονται με βάση την φύση των ραντάρ και των ραδιομέτρων που ενσωματώνονται στους δορυφόρους.

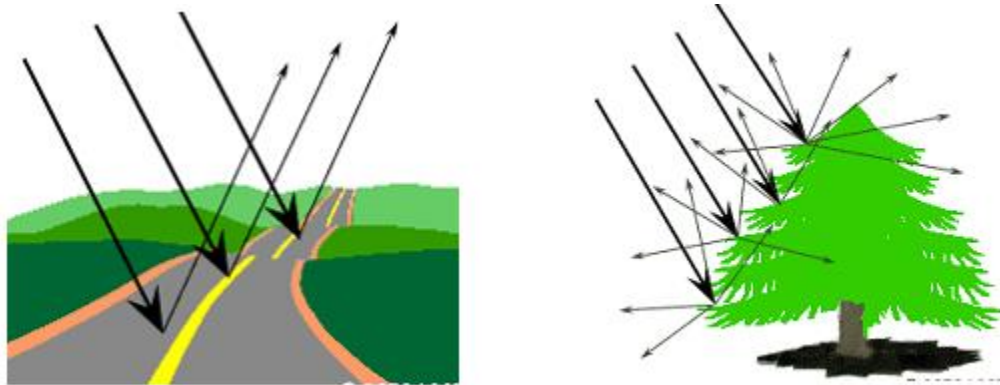


Εικόνα 1. Κατηγορίες αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπηση (Χρυσουλάκης, 2011)

Η ενεργητική τηλεπισκόπηση χρησιμοποιεί ραντάρ τα οποία εκπέμπουν μικροκυματική ακτινοβολία σαρώνοντας την προς μελέτη περιοχή και στη συνέχεια αποδίδουν εικόνα καταγράφοντας τα ανακλώμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται από τους ίδιους τους μικροκυματικούς ανιχνευτές (ραντάρ).

Αντιθέτως, η παθητική τηλεπισκόπηση χρησιμοποιεί ραδιόμετρα σαρώσεως που καταγράφουν την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία . Έτσι, οι εικόνες δημιουργούνται καθώς τα ραδιόμετρα λαμβάνουν την εκπεμπόμενη ηλιακή ακτινοβολία της υπό μελέτης περιοχής δημιουργώντας πολυφασματικές εικόνες δηλαδή διαφορετικές εικόνες για διαφορετικά μικρά εύρη της ανακλώμενης ακτινοβολίας.

Στις δύο παραπάνω περιπτώσεις ο βασικός παράγοντας για την πραγματοποίηση της λήψης των δορυφορικών εικόνων είναι ο τρόπος μετάδοσης και αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα και, κυρίως, στην επιφάνεια της γης. Οι δύο ακραίοι τύποι ανάκλασης της ακτινοβολίας από τα επιφανειακά αντικείμενα είναι η κατοπτρική ανάκλαση και η διάχυση (Εικόνα 2)



Εικόνα 2. Κατοπτρική και διάχυτη ανάκλασης (Τζωρτζάκης, 2014)

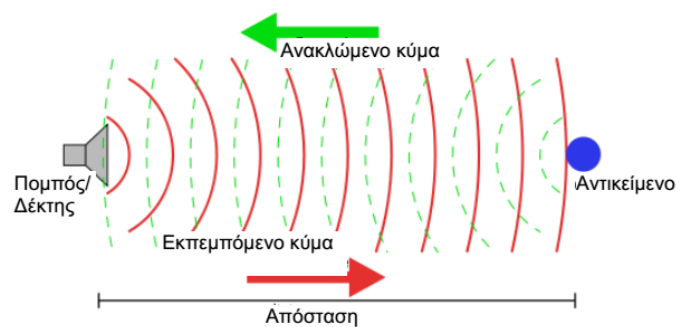
Σε λείες επιφάνειες επικρατεί η κατοπτρική ανάκλαση δηλαδή η ανάκλαση προς μία και μόνο διεύθυνση. Η διάχυση συμβαίνει στην περίπτωση των ανώμαλων επιφανειών και η ακτινοβολία στη περίπτωση αυτή ανακλάται ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις. Ο τρόπος με τον οποίο κάθε αντικείμενο ανακλά την

ακτινοβολία εξαρτάται από την τραχύτητα, και τις φυσικοχημικές ιδιότητες του αντικειμένου σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (Τζωρτζάκης, 2014).

1.2.1 Ενεργητική Τηλεπισκόπηση - Τεχνολογία ραδιοεντοπισμού RADAR

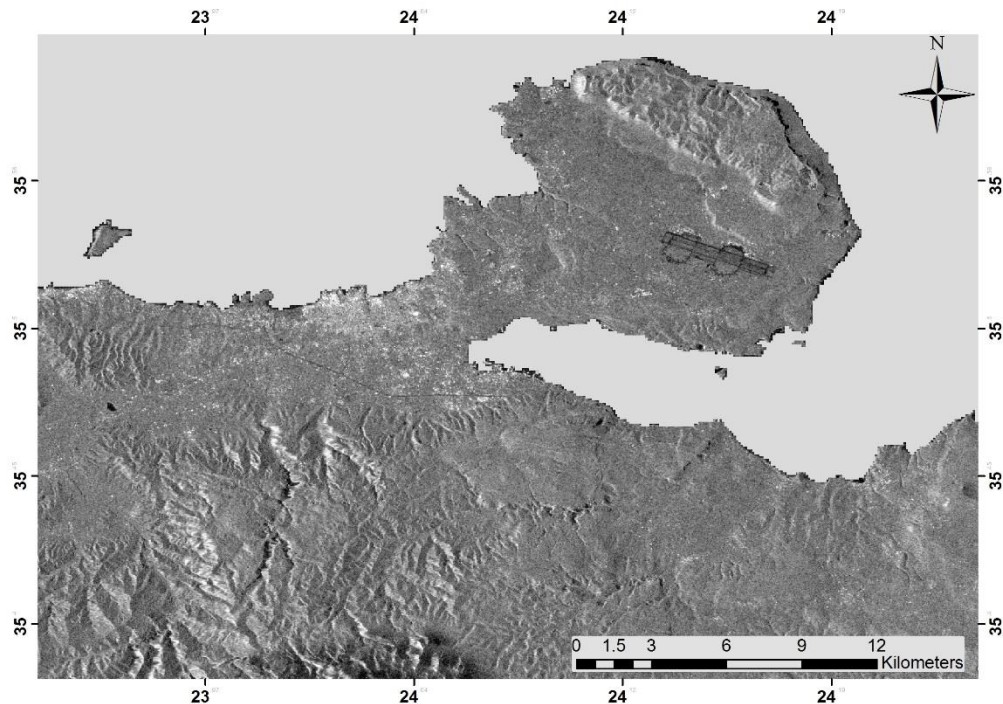
Τα ραντάρ είναι ενεργά συστήματα που εκπέμπουν ακτινοβολία προς την επιφάνεια της γης και μετρούν το σήμα που ανακλάται. Έτσι, μπορούμε να πάρουμε εικόνες ημέρα και νύχτα, εντελώς ανεξάρτητα από το φως του ήλιου (Εικόνα 3). Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, όπου η μεγάλη πολική νύχτα (για τουλάχιστον 6 μήνες το χρόνο) εμποδίζει τους παραδοσιακούς δορυφόρους να πάρουν εικόνες. Επιπλέον, το σήμα ενός ραδιοεντοπιστή διαπερνά εύκολα τα σύννεφα, και επομένως επιτρέπει τη λήψη εικόνων ανεξάρτητα από τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες. (European Space Agency, 2015)

Οι εικόνες που σχηματίζουν οι καταγραφείς των ραντάρ δημιουργούνται με βάση την ανακλώμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από τους διάφορους ανακλαστές που βρίσκονται στην γήινη επιφάνεια. Ανακλαστής θεωρείται οτιδήποτε βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους και ανακλά ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (πέτρες, χώμα, βλάστηση, κτίρια, υδάτινοι όγκοι κ.ο.κ). Η ανακλώμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εξαρτάται από τις γεωμετρικές και διηλεκτρικές ιδιότητες της επιφάνειας ή του όγκου που μελετάται και το φαινόμενο της ανάκλασης ονομάζεται οπισθοσκέδαση. Η οπισθοσκέδαση εξαρτάται από τη τραχύτητα της επιφάνειας, το είδος του υλικού (π.χ. αν είναι σίδηρο, τσιμέντο, ξύλο ή οργανικό υλικό) καθώς και από την υγρασία που περιέχει.



Εικόνα 3. Αρχή Λειτουργίας του RADAR (Βικιπαιδεία, 2015)

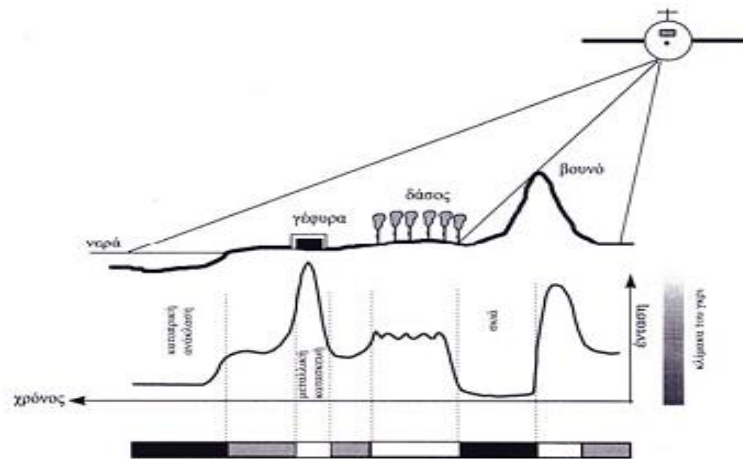
Οι εικόνες ραντάρ δεν έχουν την ίδια μορφολογία με αυτή των εικόνων από οπτικούς καταγραφείς (π.χ. κάμερες). Τα φωτεινά σημεία των εικόνων ραντάρ απεικονίζουν τις περιοχές όπου η ανάκλαση του μικροκυματικού κύματος που εκπέμπεται είναι μεγαλύτερη, ενώ οι εικόνες είναι μονοχρωματικές (Εικόνα 4). Χαρακτηριστικά αναφέρεται πως τα μεταλλικά αντικείμενα, όπως οι γέφυρες και τα πλοία, παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα οπισθοσκέδασης λόγω της γεωμετρίας τους αλλά κυρίως λόγω των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των μετάλλων. Αντιθέτως, οι υδάτινες μάζες καθώς και οι λείες επιφάνειες (ασφαλτικοί τάπητες, επιφάνειες αποξηραμένων λιμνών, διάδρομοι αεροδρομίων, μεγάλοι δρόμοι κ.ο.κ.) ανακλούν το μεγαλύτερο ποσοστό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μακριά από το σύστημα με γωνία ανάκλασης ίση με την γωνία πρόσπτωσης (κατοπτρική ανάκλαση). Έτσι ελάχιστη ενέργεια επιστρέφει στο ραδιόμετρο του ραντάρ και η περιοχή εμφανίζεται ως σκοτεινή.



Εικόνα 4. Δορυφορική απεικόνιση Sentinel 1 της πόλης των Χανίων και του Ακρωτηρίου

Η ικανότητα διείσδυσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας σε βροχοπτώσεις και κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, αυξάνεται με το μήκος κύματος. Κατά

συνέπεια, τα μικροκύματα με μεγάλο μήκος κύματος, όπως τα L και τα P (Πίνακας 1), έχουν την ικανότητα να διαπερνούν σε βάθος, επιφάνειες όπως άμμο, χιόνι και βλάστηση [Μερτίκας,1999]. Η ένταση της οπισθοσκεδαζόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας του ραντάρ σε σχέση με την μορφολογία και την τραχύτητα του εδάφους παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.



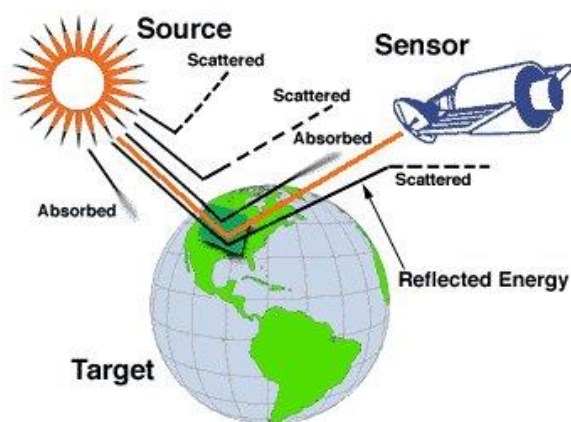
Εικόνα 5. Η καταγραφή της ακτινοβολίας από το radar, όπως αυτή ανακλάται από το έδαφος.

Πίνακας 1. Ονομασία και μήκη κύματος των RADAR (Μερτίκας 1999)

Ονομασία Ζώνης	Συχνότητα (GHz).	Ζώνη μήκους κύματος λ (cm)	Συμβατικές Ζώνες Radar
Ka	26,5 - 40	0,75 - 1,1	0,86 cm
K	18 - 25,5	1,1 - 1,67	
Ku	12,5 - 18	1,7 - 2,4	
X	8 - 12, 5	2,4 - 3,8	3 -3,2 cm
C	4 - 8	3,8 - 7,5	6 cm
S	2 - 4	7,5 - 15,0	
L	1 - 2	15 - 30	23,5 cm 24cm 25 cm
P	0,3 - 1	30 - 100	68 cm

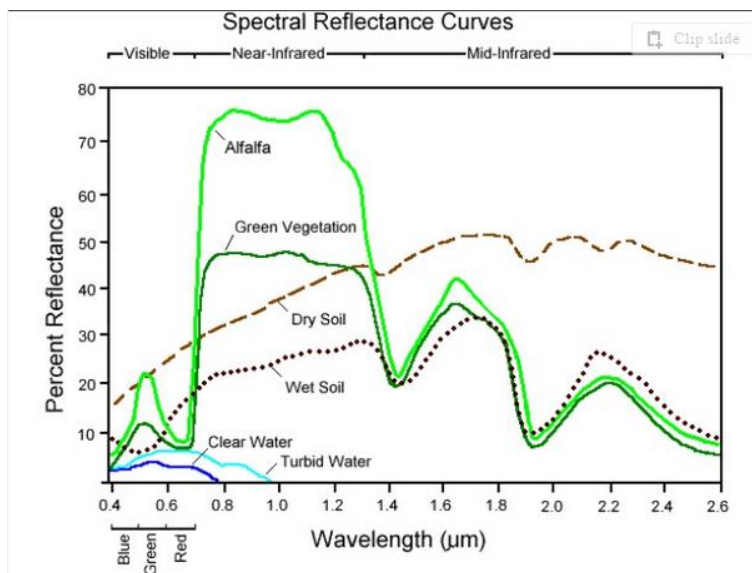
1.2.2 Παθητική Τηλεπισκόπηση- Πολυφασματικοί Δορυφόροι

Η παθητική τηλεπισκόπηση καταγράφει με οπτικά μέσα την ανακλώμενη από την γήινη επιφάνεια ηλιακή ακτινοβολία. (Εικόνα 6) Η ανακλώμενη ακτινοβολία περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων το οποίο καταγράφεται από το ραδιόμετρο του δορυφόρου σε διαφορετικά κανάλια στενού εύρους μήκους κύματος. Το κάθε κανάλι αναφέρεται και ως “μπάντα” (band). Έτσι, ο αισθητήρας καταγράφει πολλές διαφορετικές ψηφιακές εικόνες, μία για κάθε κανάλι, οι οποίες έχουν ληφθεί την ίδια χρονική στιγμή.



Εικόνα 6. Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας ενός παθητικού συστήματος τηλεπισκόπησης

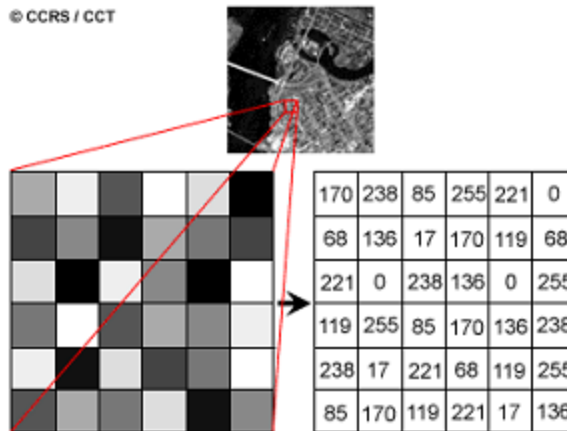
Το εύρος κάθε καναλιού εξαρτάται από το εκάστοτε σύστημα και συνήθως διαμορφώνεται με βάση την απόκριση διάφορων φυσικών παραμέτρων για το κάθε κανάλι. Έτσι π.χ. ένα κανάλι μπορεί να αντιπροσωπεύει την απόκριση της βλάστησης, των υδάτινων μαζών ή των αστικών περιοχών κ.ο.κ. Επιπλέον ο συνδυασμός και οι υπολογιστικές πράξεις μεταξύ δύο ή και περισσότερων καναλιών εξειδικεύει ακόμη περισσότερο το αποτέλεσμα, έτσι ώστε μια δορυφορική εικόνα να μπορεί να αποτυπώσει την διακύμανση μιας συγκεκριμένης μεταβλητής. Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται αναλυτική η φασματική απόκριση διάφορων περιβαλλοντικών παραγόντων συναρτήσει του μήκους κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.



Εικόνα 7. Απόκριση μεταβλητών του φυσικού περιβάλλοντος συναρτήσει του εύρους μήκους κύματος (Τζωρτζάκης, 2014)

1.2.3 Γενικά Χαρακτηριστικά Ψηφιακών Δορυφορικών Εικόνων

Οι ψηφιακές δορυφορικές εικόνες δημιουργούνται από αισθητήρες καταγραφής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (ραδιόμετρα) που καταγράφουν την ενέργεια ως μία σειρά από αριθμούς σε ψηφιακή μορφή. Η ψηφιακές τιμές μετατρέπονται σε εικόνα η οποία αποτελείται από εικονοστοιχεία (pixels) στοιχισμένα σε σειρές και κολώνες σχηματίζοντας ένα πλέγμα Εικόνα 8. Σε κάθε ένα εικονοστοιχείο αποδίδεται ένας ψηφιακός αριθμός (Digital Number, DN) που αντιπροσωπεύει τη σχετική φωτεινότητά του. Έτσι, η ψηφιακή τιμή του κάθε εικονοστοιχείου είναι ανάλογη της ανακλαστικότητας του στόχου που βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους που ορίζει το εικονοστοιχείο, βάση του Γεωγραφικού Συστήματος Αναφοράς.

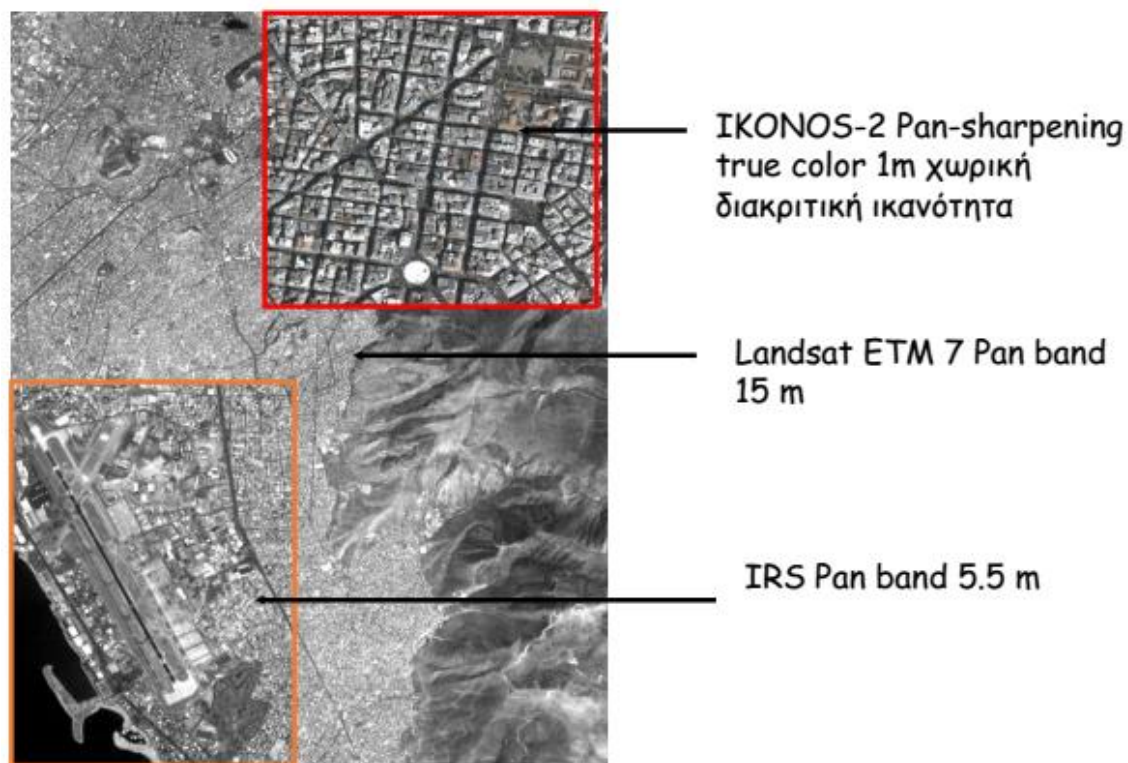


Εικόνα 8. Ψηφιακό Πλέγμα Δορυφορικών Εικόνων (Ποϊραζίδης, Δ., Γ., & Λορίλια, 2013)

Οι δορυφορικές εικόνες κατά κανόνα απεικονίζονται στην κλίμακα του γκρι, ενώ με τον συνδυασμό εικόνων διαφορετικών φασμάτων- καναλιών είναι δυνατόν να γίνει σύνθεση έγχρωμων εικόνων.

Χωρική διακριτική ικανότητα

Η απόσταση μεταξύ της γήινης επιφάνειας και του οργάνου καταγραφής αποτελεί καθοριστικό ρόλο στην λεπτομέρεια της πληροφορίας που καταγράφεται. Η ευδιάκριτη λεπτομέρεια σε μια εικόνα εξαρτάται από την χωρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα και αναφέρεται στο μέγεθος του μικρότερου χαρακτηριστικού που μπορεί να ανιχνευθεί (Εικόνα 9). Συνήθως οι δορυφόροι που βρίσκονται σε πολύ υψηλή τροχιά και καταγράφουν μεγάλες περιοχές έχουν μικρή διακριτική ικανότητα. (Τζωρτζάκης, 2014)



Εικόνα 9. Συγκριτική Απεικόνιση Εικόνων με διαφορετική χωρική διακριτική ικανότητα (Τζωρτζάκης, 2014)

Εάν ένα σύστημα καταγραφής έχει χωρική διακριτική ικανότητα 20m τότε στην αντίστοιχη εικόνα κάθε εικονοστοιχείο αντιπροσωπεύει μία περιοχή επιφάνειας εδάφους ίση με 20m x 20m.

Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα

Τα ραδιομετρικά χαρακτηριστικά περιγράφουν την πραγματική πληροφορία που περιέχεται σε μια εικόνα. Η ευαισθησία του αισθητήρα και κατ' επέκταση της εικόνας στην ένταση της ανακλώμενης ενέργειας καθορίζει την ραδιομετρική ικανότητα. Συνοπτικά, η ραδιομετρική ικανότητα περιγράφει την ικανότητα ενός συστήματος να καταγράφει διαφορές στην ισχύ του σήματος. Τα δεδομένα μια εικόνας αντιπροσωπεύονται από ψηφιακές τιμές που μεταβάλλονται από 0 έως μία τιμή, παράγωγη δύναμη του 2.

Το εύρος αντιστοιχεί σε ένα αριθμό bits που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίησή δε δυαδική μορφή. Ο μέγιστος αριθμός επιπέδων φωτεινότητας

εξαρτάται από τον αριθμό των bits. Π.χ. εάν ένα αισθητήρας χρησιμοποιεί 8 bits για την καταγραφή τότε θα υπάρχουν $2^8=256$ πιθανές ψηφιακές τιμές στην εικόνα, από το 0 έως το 255. (Τζωρτζάκης, 2014).

Φασματική διακριτική ικανότητα

Περιγράφει την ικανότητα του αισθητήρα να καταγράφει διαφορετικά κανάλια μικρού φασματικού εύρους. Με πολυφασματικούς αισθητήρες είναι εξοπλισμένοι, κυρίως, οι δορυφόροι παθητικής τηλεπισκόπησης διότι η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία μεταδίδεται σε μεγάλο εύρος, το οποίο θα πρέπει να καταγραφεί. Έτσι, υπάρχουν παγχρωματικοί αισθητήρες που καταγράφουν σε μία εικόνα ένα μεγάλο εύρος που συμπεριλαμβάνει και το ορατό ($0.4\mu\text{m}-0.7\mu\text{m}$) αλλά και πολυφασματικοί αισθητήρες που καταγράφουν εικόνες σε μικρές ζώνες μηκών κύματος (Τζωρτζάκης, 2014).

Χρονική Διακριτική Ικανότητα

Η χρονική διακριτική ικανότητα σχετίζεται με την τροχιά του δορυφόρου και την συχνότητα λήψης εικόνων για την ίδια περιοχή. Η συνηθέστερη χρονική διακριτική ικανότητα είναι μερικές ημέρες. Υπάρχουν, επίσης, δορυφόροι οι οποίοι επικαλύπτουν την ίδια περιοχή σε δύο διαδοχικές τροχιές με επικάλυψη από 10% έως 30%. Επομένως η χρονική διακριτική ικανότητα είναι συνάρτηση των δυνατοτήτων του συστήματος, της επικάλυψης και του γεωγραφικού μήκους της περιοχής.

1.3 Εδαφική μέτρηση υγρασίας

Το επιφανειακό έδαφος είναι το επιφανειακό στρώμα του στερεού φλοιού της γης στο οποίο στηρίζονται και αναπτύσσονται τα φυτά (35 ως 50 εκατοστά). Το στρώμα κάτω από το επιφανειακό έδαφος λέγεται υπέδαφος. Το υπέδαφος φτάνει στο 1,5m ως 2m., ως εκεί δηλαδή που προχωρούν οι ρίζες των φυτών και μπορεί να γίνει γεωργική εκμετάλλευσή του (Εικόνα 10). (Σφακιανάκη, Μαγαλιού, & Μπότσαρης, 2008)

Υγρασία (moisture content) είναι το σύνολο του νερού που βρίσκεται στο έδαφος και εκφράζεται με το λόγο (%) του βάρους του νερού που περιέχεται προς το ξηρό βάρος του εδαφικού δείγματος (Βουδούρης, 2006):

$$m = (Ww/Ws) \cdot 100$$

όπου: Ww = απώλεια βάρους μετά την ξήρανση στους 110 °C

Ws = βάρος ξηρού δείγματος

Η υγρασία του εδάφους επηρεάζει πολλούς και διαφορετικούς οικολογικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, ο αερισμός, οι δραστηριότητες των μικροοργανισμών, η πρόσληψη των θρεπτικών στοιχείων αλλά και η συγκέντρωση των τοξικών ουσιών. Επίσης, η έλλειψη υγρασίας περιορίζει την ανάπτυξη των φυτών περισσότερο από κάθε άλλο οικολογικό παράγοντα.

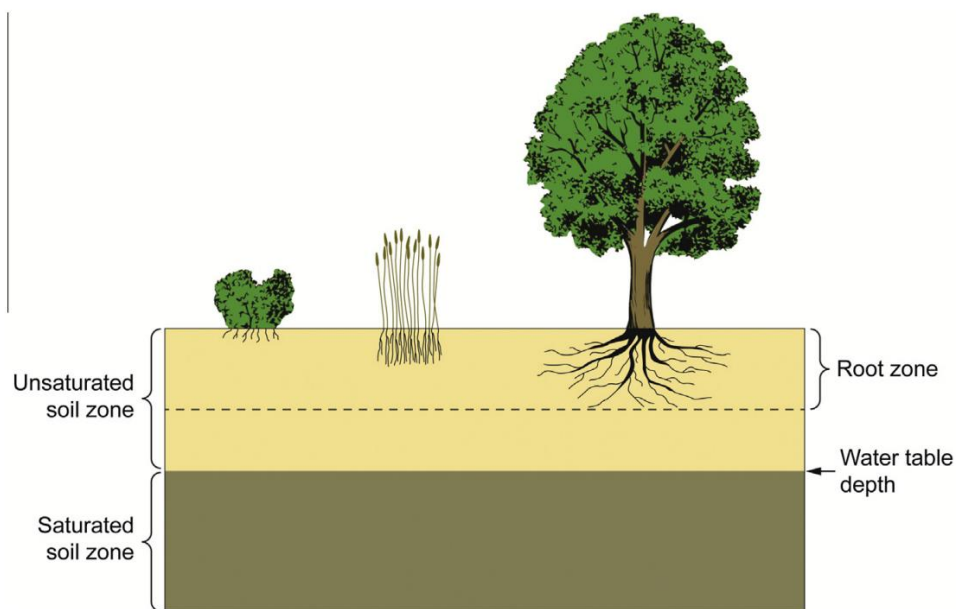
Η υγρασία του εδάφους είναι αποτέλεσμα φυσικών ιδιοτήτων που σχετίζονται με την δομή και την σύστασή του. Η υγρασία είναι συνάρτηση του νερού που κρατείται στο έδαφος υπό διάφορες μορφές, όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

Προσροφημένο νερό: πρόκειται για το ισχυρά προσροφημένο στους κρυσταλλικούς μικροπόρους νερό το οποίο δεν είναι άμεσα διαθέσιμο και δεν μετακινείται, εκτός αν λάβουν χώρα ιοντοεναλλακτικές διεργασίες.

Υγροσκοπικό νερό: είναι προσροφημένο ασθενώς, σε λεπτά στρώματα στην επιφάνεια των κόκκων και μπορεί να μετακινηθεί μόνο μέσω εξάτμισης.

Τριχοειδές νερό: συγκρατείται μέσω δυνάμεων επιφανειακής τάσης ανάμεσα στους κόκκους του εδάφους ή μέσα σε τριχοειδείς πόρους. Αποτελεί την κυρίως πηγή υγρασίας και απορροφάται σταδιακά από τις ρίζες.

Διηθητό νερό: πληρώνει τους μεγάλους πόρους και τους κενούς εν γένει χώρους του εδάφους, δια μέσου των οποίων κινείται ελεύθερα υπό την επίδραση της βαρύτητας ή άλλης επίδρασης. (PROSODOL, 2011)



Εικόνα 10. Κορεσμένες και ακόρεστες ζώνες εδάφους (Seneviratne et al., 2010)

Η διαθέσιμη υγρασία από τα φυτά εξαρτάται από ιδιότητες και χαρακτηριστικά του εδάφους όπως, η υδατοϊκανότητα, η τιμή του νερού κορεσμού, η ισοδύναμη υγρασία και το σημείο μόνιμης μάρανσης(Εικόνα 11). Παρακάτω εξηγούνται συνοπτικά κάθε ένα:

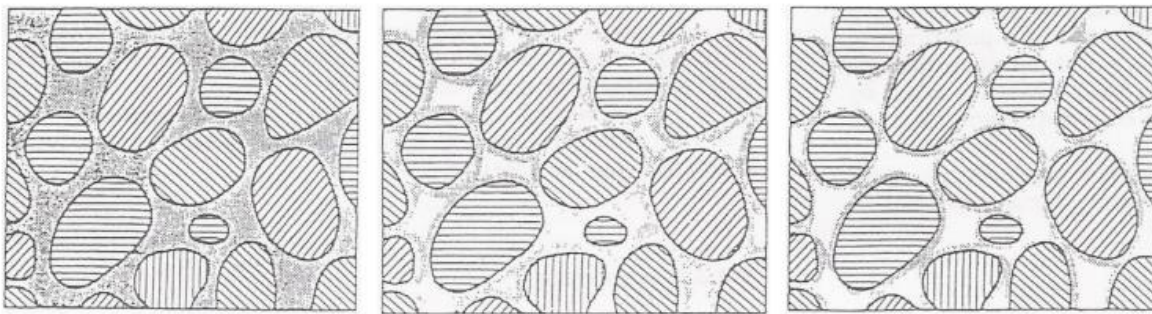
Νερό κορεσμού: Είναι το νερό που βρίσκεται στο έδαφος με μηδενική τάση και γεμίζει όλους του μεγάλους πόρους και μικροπόρους από του οποίους έχει διώξει τον εδαφικό αέρα.

Υδατοϊκανότητα: Είναι η μεγαλύτερη ποσότητα νερού που μπορεί να συγκρατήσει ένα έδαφος στη φυσική του κατάσταση, δηλαδή είναι η ποσότητα του νερού που συγκρατεί ένα έδαφος 2 έως 3 ημέρες μετά από την διαβροχή του και όταν η ελεύθερη στράγγιση του είναι μηδενική.

Ισοδύναμη Υγρασία: Είναι η ποσότητα του νερού που συγκρατείται από δείγμα εδάφους πάχους 1 cm το οποίο προηγουμένως έχει κορεστεί με νερό, και στη συνέχεια υποβάλλεται κατάλληλα σε φυγόκεντρο δύναμη 100πλάσια της βαρύτητας για 30 λεπτά της ώρας.

Σημείο μόνιμης μάρανσης: Είναι το ποσό του νερού το οποίο συγκρατείται από το έδαφος τόσο ισχυρά, ώστε τα φυτά δεν μπορούν αν προσλάβουν την ποσότητα νερού για να εξισορροπήσουν τη διαπνοή, με αποτέλεσμα να μαραίνονται μόνιμα. (Λαζαρίδου - Αθανασιάδου, 2012)

Διαθέσιμη υγρασία: είναι η ποσότητα του νερού που μπορούν να αξιοποιήσουν τα φυτά για τις ανάγκες τους. Αποτελεί τη διαφορά μεταξύ της υδατοϊκανότητας και του σημείου μόνιμης μάρανσης. Εξαρτάται από τη μηχανική σύσταση, τη δομή, το πορώδες και την οργανική ουσία του εδάφους.



Εικόνα 11. Απεικόνιση Συνθηκών εδαφικής υγρασίας (Θεοχάρης, 2015)

Η μέτρηση της υγρασίας του εδάφους είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με ποικίλους τρόπους όπως η μέθοδος της σταθμικής ανάλυση (ξηράνση- βαρομετρική μέθοδος), με τασίμετρα ή τενσιόμετρα καθώς και με συσκευή νετρονίων (ραδιερνεργός μέθοδος) ακόμα και με την θερμική αγωγιμότητα.

Κατά τη βαρομετρική μέθοδο συλλέγεται δείγμα εδάφους, ζυγίζεται πριν και μετά την ξήρανσή του και υπολογίζεται η υγρασία του (Αρσένη - Παπαδημητρίου, n.d.). Η διαφορά σε βάρος οφείλεται στην απώλεια νερού και διαιρείται με το βάρος ξηρού εδάφους για να δώσει το ποσοστό εδαφικής υγρασίας, εκφρασμένο στα % ξηρού βάρους εδάφους (Θεοχάρης, 2015)

Η υγρασία υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\% WC = 100 \cdot (B - A) / (B - \text{βάρος κάψας})$$

όπου B βάρος του δείγματος μαζί με την κάψα πριν την ξήρανση, A βάρος δείγματος μαζί με την κάψα μετά την ξήρανση και K το βάρος της κάψας (Χαραλαμπίδης, 2010).

Άλλες μέθοδοι είναι η μέτρηση με την μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης, όπου η ηλεκτρική αντίσταση ενός σώματος από πορώδες υλικό, το οποίο βρίσκεται σε υγρομετρική ισορροπία με το έδαφος μέσα στο οποίο έχει τοποθετηθεί, μπορεί να αποτελέσει ένα μέτρο για τον προσδιορισμό της υγρασίας του εδάφους. Υπάρχει επίσης, η μέτρηση με τενσιόμετρα, όπου η εδαφική υγρασία μετριέται έμμεσα, μέσω της τάσης του νερού που βρίσκεται σε μία κεραμική κάψα συναρτήσει της υγρασίας του εδάφους γύρω από αυτήν. (Αρσένη - Παπαδημητρίου, n.d.) Ακόμη, μια πιο σύγχρονη, πρακτική και ταχεία μέθοδος είναι η μέτρηση με συσκευή ηλεκτρονίων, όμως αποτελεί ακριβή λύση και βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο καθώς υπάρχουν αρκετές προοπτικές βελτίωσης. Τέλος, ο προσδιορισμός της υγρασίας του εδάφους γίνεται και με βάση την θερμική αγωγιμότητα του, δεδομένου ότι τα μεγέθη αυτά βρίσκονται σε άμεση εξάρτηση. Έτσι, υπάρχουν συσκευές μέτρησης της εδαφικής υγρασίας που αποτελούνται από πορώδες υλικό, μέσα στο οποίο ενσωματώνεται ένα όργανο πολύ ευαίσθητο στις μεταβολές των θερμικών ιδιοτήτων. (Θεοχάρης, 2015)

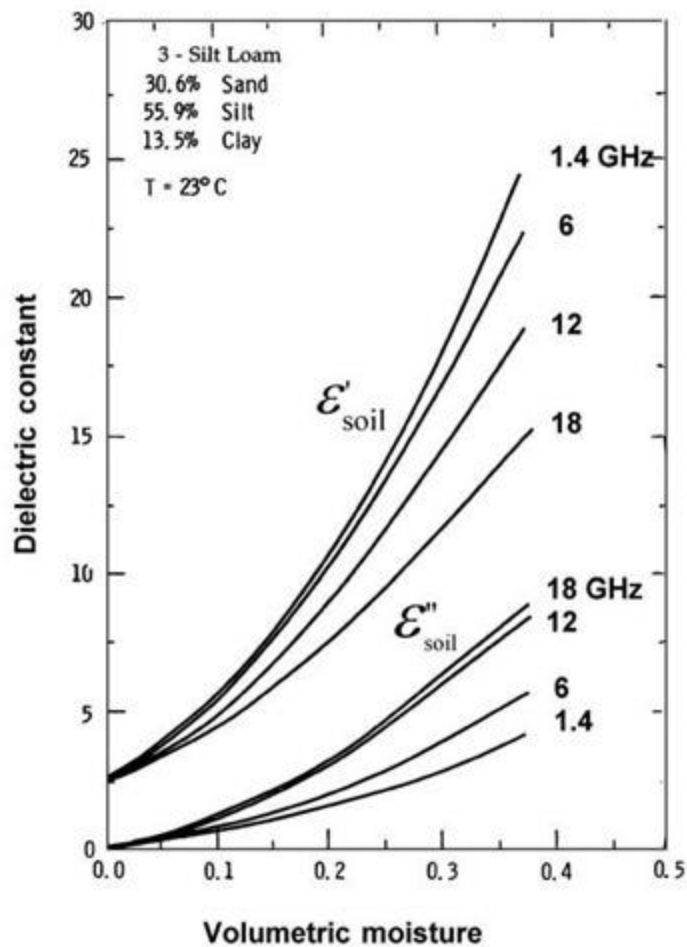
1.4 Δορυφορική Τηλεπισκόπηση και μέτρηση υγρασίας

Η εκτίμηση της υγρασίας του εδάφους από δορυφορικά δεδομένα αποτελεί αντικείμενο ερευνητικής μελέτης εδώ και αρκετές δεκαετίες, ενώ η έρευνα συνεχίζεται ακόμη και σήμερα. Η υγρασία του εδάφους αποτελεί πολύ σημαντικό περιβαλλοντικό παράγοντα που βοηθά στην κατανόηση και ερμηνεία της επιφανειακής υδρολογίας μιας περιοχής, την δυναμική συσχετιζόμενων οικοσυστημάτων και των βιοχημικών κύκλων τους, ενώ παράλληλα αποτελεί διεπαφή μεταξύ του γήινου εδάφους με την ατμόσφαιρα.

Έτσι, έχουν γίνει αρκετές μελέτες (Engman & Chauhan, 1995; Hossain & Greg, 2009; Petropoulos et al., 2015) και προσπάθειες εκπόνησης μοντέλων της εδαφικής υγρασίας σε σχέση με την απόκριση οργάνων σε υπάρχοντες δορυφόρους

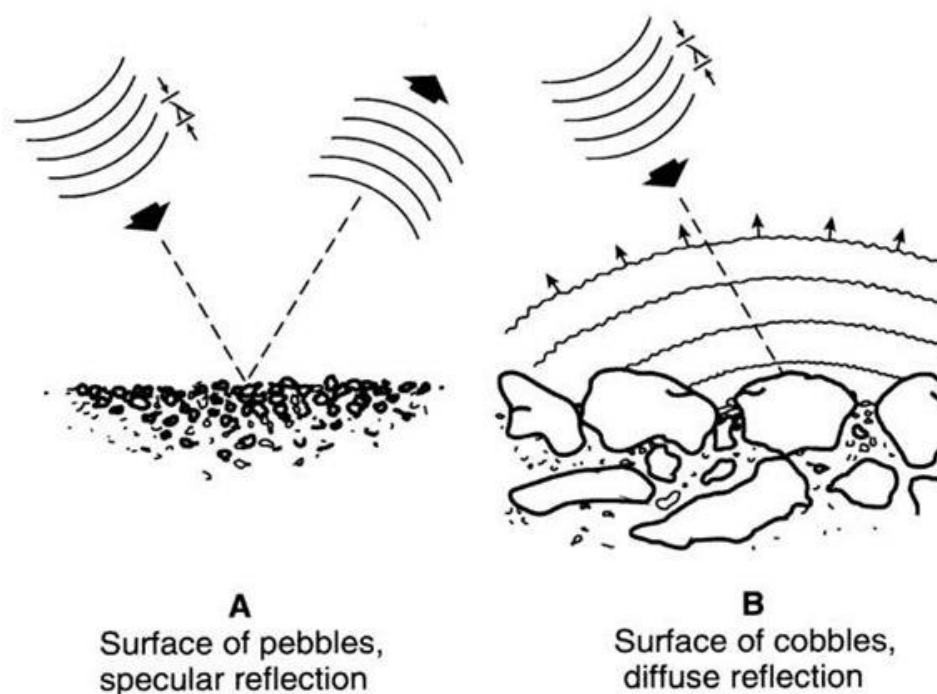
(Gao et al., 2013; Justice et al., 2002; Wagner, Sabel, Doubkova, Bartsch, & Pathe, 2009), αλλά επίσης έχουν δρομολογηθεί και δορυφορικές αποστολές για τον σκοπό αυτό (Soil Moisture Active Passive-SMAP, Soil Moisture & Ocean Salinity - SMOS) . Η υγρασία του εδάφους δεν είναι δύσκολο να μετρηθεί τοπικά για μια χρονική στιγμή, αλλά η συστηματική και χωρικά ολοκληρωμένη καταγραφή της εδαφικής υγρασίας αποτελεί ένα πραγματικά δύσκολο στόχο που, όμως, είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την χρήση της δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι η υγρασία του εδάφους είναι μία μεταβλητή με πολύ μεγάλη χωρική και χρονική μεταβλητότητα για να μπορεί να καταγραφεί ολοκληρωμένα με την χρήση άμεσων επίγειων μετρήσεων έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές γεωεπιστημών.

Η βασική αρχή για την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας μέσω της τηλεπισκόπησης είναι το φαινόμενο της μεγάλης μεταβλητότητας της διηλεκτρικής σταθεράς τους εδάφους σε συνάρτηση με την υγρασία του. Το νερό, ως γνωστόν, έχει μεγάλη διηλεκτρική σταθερά εντός ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, χάρις στην γεωμετρία των μορίων του και του ηλεκτρικού δίπολου που σχηματίζουν. Για παράδειγμα, σε μία συχνότητα καναλιού L η διηλεκτρική σταθερά του νερού είναι κατά προσέγγιση 80, σε σχέση με ένα ξηρό έδαφος, το οποίο κυμαίνεται στο 3-5. (Edwin T. Engman et. al, 1995) Έτσι, όσο αυξάνεται η υγρασία του εδάφους, τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς μπορεί να αυξηθεί σε τιμές γύρω στο 20 ή και μεγαλύτερες. (Schmugge, 1983) .



Εικόνα 12. Τα πραγματικά (ϵ') και θεωρητικά (ϵ'') χαρακτηριστικά της διηλεκτρικής σταθεράς για μία αργιλώδη μίξη σε συνάρτηση με την υγρασία του μίγματος. Η απορρόφηση αυξάνεται με την αύξηση της υγρασίας. Η αντανάκλαση (οπισθοσκέδαση) θα αυξηθεί, αντίστοιχα, με την αύξηση του (ϵ') (The-Crankshaft Publishing, n.d.)

Η μικροκυματική ακτινοβολία που εκπέμπει το ραντάρ έχει την ιδιότητα να εισέρχεται στο έδαφος και στη συνέχεια να απορροφάται, να ανακλάται ή να διαχέεται αναλόγως με την δομή του εδάφους, την περιεκτικότητα σε υγρασία και την γεωμορφολογία (Εικόνα 12).



Εικόνα 13. Επίδραση της επιφάνειας και της δομής του εδάφους στην οπισθοσκέδαση της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Courtesy Goodyear Aerospace Corp. (2011)

Αξίζει να σημειωθεί ότι τραχύτητα του εδάφους στις επιστήμες της τηλεπισκόπησης δεν εξαρτάται μονάχα από την σύσταση και την δομή του, αλλά είναι συνάρτηση του μήκους κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Π.χ. ένας συμπαγής τοίχος θεωρείται λεία επιφάνεια (ανακλαστική) για ένα ραντάρ, ενώ η βλάστηση θεωρείται τραχύτερη επιφάνεια καθώς διαχέει την μικροκυματική ακτινοβολία. Σε γενικές γραμμές όσο πιο τραχειά είναι μια επιφάνεια τόσο πιο φωτεινή είναι η περιοχή της εικόνας που την απεικονίζει. Αυτό συμβαίνει διότι οι λείες επιφάνειες ανακλούν την ακτινοβολία με γωνία ανάκλασης ίση με την γωνία πρόσπτωσης, αλλάζοντας την κατεύθυνση διάδοσης και δεν την διαχέουν, με αποτέλεσμα μηδενικό ποσοστό ακτινοβολίας (ειδικά στις περιπτώσεις μικρής γωνίας πρόσπτωσης) να επιστρέφει στο καταγραφικό σύστημα.

Μικρότερου μήκους ακτινοβολία διεισδύει π.χ. στα κενά ενός κροκαλώδους εδάφους και στη συνέχεια διαχέεται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13. Στο ίδιο έδαφος, μια ακτινοβολία μεγαλύτερου μήκους κύματος θα ανακλώταν και δεν θα

διαχεόταν, όπως θα συνέβαινε σε μία λεία επιφάνεια. Έτσι, μία εδαφική επιφάνεια είναι δυνατόν να είναι λεία για μία μικροκυματική ακτινοβολία καναλιού L μήκους κύματος 21 cm (1.4 GHz), ενώ να θεωρείται τραχειά για ακτινοβολία καναλιού C μήκους κύματος 6cm (4,9 GHz) ή για ακτινοβολία X μήκους κύματος 2,8 cm (10.7 GHz) (Engman & Chauhan, 1995). Το παραπάνω φαινόμενο επηρεάζει την συσχέτιση ενός μικροκυματικού σήματος με την εδαφική υγρασία διότι η επίδραση της τραχύτητας αυξάνει τον συντελεστή εκπομπής με αποτέλεσμα να μειώνεται η ευαισθησία του σήματος στην υγρασία (Newton & Rouse, 1980).

1.4.1 Δορυφόρος Sentinel 1

Η αποστολή Sentinel 1 υποστηρίζεται από το πρόγραμμα της ESA, Copernicus και αποτελείται από 2 δορυφόρους ενεργητικής τηλεπισκόπησης, σε αντίθετες τροχιές 180°, εξοπλισμένους με radar ακτινοβολίας καναλιού C. Οι δύο δορυφόροι, λειτουργώντας συνεργιστικά καταγράφουν ολόκληρη την επιφάνεια της γης κάθε 6 μέρες.

Τα δορυφορικά προϊόντα της αποστολής αναμένεται να χρησιμοποιηθούν σε πλήθος εφαρμογών και περιβαλλοντικών μελετών όπως η παρακολούθηση των πάγων της Αρκτικής και του διαθέσιμου πάγου στους ωκεανούς, καταγραφή ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδων καθώς και εντοπισμός πλοίων για την ναυτική ασφάλεια. Επίσης τα δεδομένα του Sentinel 1 είναι χρήσιμα στην ανάλυση επικινδυνότητας σεισμικών φαινομένων, στην χαρτογράφηση των δασών και την χαρτογράφηση και διαχείριση εδάφους και ύδατος για την κάλυψη αναγκών και την αντιμετώπιση ανθρωπιστικών κρίσεων. (ESA, 2015a)

Αποτελεί κοινό τόπο ότι οι δορυφόροι με αισθητήρες radar έχουν εν δυνάμει πολλές δυνατότητες στην έγκαιρη και άμεση εκτίμηση της υγρασίας του εδάφους, (Santi et al., 2015; Wagner et al., 2009) με μόνη τροχοπέδη την εκτενή μελέτη της επιρροής της οπισθοσκέδασης των ραντάρ από διάφορες περιβαλλοντικές παραμέτρους που αποσυσχετίζουν το σήμα.

Οι αισθητήρες radar που ενσωματώνονται στους δορυφόρους της αποστολής Sentinel 1 εξάγουν δορυφορικά προϊόντα με διαφορετικές φυσικές και ψηφιακές παραμέτρους. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα προϊόντα τύπου συμβολομετρίας ευρείας λωρίδας (IW) το οποίο υποστηρίζει την καταγραφή ανακλώμενων σημάτων σύνθετων πολώσεων (VH -Vertical Horizontal & VV -Vertical Vertical) ενώ ταυτόχρονα έχει καλή χωρική ανάλυση (5 X 20 m). Η πόλωση αναφέρεται στην κατεύθυνση της γραμμικής πόλωση του σήματος κατά την εκπομπή αλλά και την λήψη. Έτσι, εάν ο δορυφόρος εκπέμπει και λαμβάνει σήμα με κάθετη γραμμική πόλωση, το προϊόν συμβολίζεται ως VV (Vertical Vertical) όπως αντίστοιχα και για την οριζόντια πόλωση (HH- Horizontal Horizontal). Επίσης, για την εκτενέστερη ερμηνεία του σήματος υπάρχουν αισθητήρες σύνθετης πολώσεως, όπως αυτός του Sentinel 1, που εκπέμπουν ακτινοβολία σε μια συγκεκριμένη πόλωση και καταγράφουν το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα σε μια άλλη. Οι διάφοροι συνδυασμοί σύνθετης πόλωσης συμβολίζονται με δύο κεφαλαία γράμματα, που συμβολίζουν την πόλωση κατά την εκπομπή και την πόλωση κατά την καταγραφή όπως π.χ. ο συνδυασμός VH (Vertical Horizontal) & ο HV (Horizontal Vertical).

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών προϊόντων του δορυφόρου Sentinel 1.

Πίνακας 2. Βασικά χαρακτηριστικά δορυφορικών προϊόντων αποστολής Sentinel 1 (Torres et al., 2012)

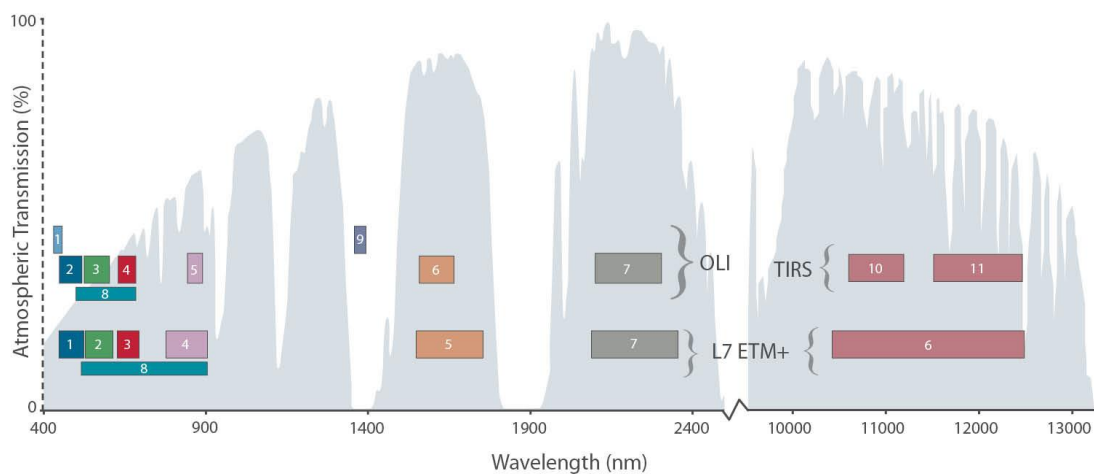
Parameter	Interferometric Wide-swath mode (IW)	Wave mode (WV)	Strip Map mode (SM)	Extra Wide-swath mode (EW)
Polarisation	Dual (HH + HV, VV + VH)	Single (HH, VV)	Dual (HH + HV, VV + VH)	Dual (HH + HV, VV + VH)
Access (incidence angles)	31°–46°	23°–37° (mid incidence angle)	20°–47°	20°–47°
Azimuth resolution	< 20 m	< 5 m	< 5 m	< 40 m
Ground range resolution	< 5 m	< 5 m	< 5 m	< 20 m
Azimuth and range looks	Single	Single	Single	Single
Swath	> 250 km	Vignette	> 80 km	> 410 km

		20 × 20 km		
Maximum NESZ	– 22 dB	– 22 dB	– 22 dB	– 22 dB
Radiometric stability	0.5 dB (3σ)	0.5 dB (3σ)	0.5 dB (3σ)	0.5 dB (3σ)
Radiometric accuracy	1 dB (3σ)	1 dB (3σ)	1 dB (3σ)	1 dB (3σ)
Phase error	5°	5°	5°	5°

1.4.2 Δορυφόρος Landsat 8

Το Πρόγραμμα LANDSAT είναι η επιχείρηση με την μακρύτερη λειτουργία για την απόκτηση εικόνων της γης από το διάστημα. Ο πρώτος δορυφόρος LANDSAT ξεκίνησε από τη NASA (National Aeronautics and Space Administration) το 1972 με το όνομα ERTS-A (Earth Resources Technology Satellite) και στην συνέχεια ακολούθησαν αρκετές αποστολές με σημαντικότερο τον δορυφόρο Landsat 5 ο οποίος ξεπέρασε την εκτιμώμενη διάρκεια ζωής των 3 ετών, συλλέγοντας εικόνες για 27 χρόνια, μέχρι το 2013 που τέθηκε εκτός λειτουργίας. Εν των μεταξύ, μέχρι το 2013 εκτοξεύθηκαν άλλοι 3 δορυφόροι με τελευταίο τον Landsat 8 που είναι και ο πιο σύγχρονος (εκτόξευση 11 Φεβρουαρίου 2013). (USGS, 2015).

Για την ερμηνεία των εικόνων του ραδιομέτρου του Landsat 8 χρησιμοποιείται η μέθοδος της φασματικής δειγματοληψίας. Η φασματική δειγματοληψία ενός καταγραφικού συστήματος αναφέρεται στον τρόπο (σε ποια κανάλια-ζώνες) με τον οποίο καταγράφεται η ανακλώμενη ακτινοβολία-ενέργεια. Στην Εικόνα 14 απεικονίζονται τα εύρη των 11 καναλιών του θεματικού χαρτογράφου στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα συναρτήσει του μήκους κύματος και της ατμοσφαιρικής μετάδοσης.



Εικόνα 14 . Συγκριτική Φασματική ανάλυση του δορυφόρου Landsat 8 OLI & TIRS καθώς και του Landsat 7 ETM+ (National Aeronautics and Space Administration, 2015)

Το ποιες περιοχές του φάσματος θα καταγραφούν καθώς και το εύρος τους, έχει σχέση με τις εφαρμογές για τις οποίες έχει σχεδιασθεί το συγκεκριμένο καταγραφικό σύστημα. Όσο πιο πολλές και πιο “στενές” είναι οι ζώνες, με τόσο πιο μεγάλη ακρίβεια καταγράφεται η καμπύλη φασματικής απόκρισης και τόσο μεγαλύτερη είναι η φασματική διακριτική ικανότητα του συστήματος (Μηλιαρέσης, 2003). Στον πίνακα (Πίνακας 3), παρουσιάζονται τα 11 κανάλια του θεματικού χαρτογράφου του Landsat 8 με το αντίστοιχο εύρος και την χωρική ανάλυση τους.

Πίνακας 3. Φασματική & χωρική ανάλυση καναλιών του Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) (United States Geological Survey, 2014)

Κανάλια	Μήκος Κύματος (μm)	Χωρική Ανάλυση (m)
Κανάλι 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
Κανάλι 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
Κανάλι 3 - Green	0.53 - 0.59	30
Κανάλι 4 - Red	0.64 - 0.67	30
Κανάλι 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30

Κανάλι 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
Κανάλι 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
Κανάλι 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
Κανάλι 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
Κανάλι 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100 * (30)
Κανάλι 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100 * (30)

Το κάθε κανάλι αποτελεί απεικόνιση της ανάκλασης και της διάχυσης ενός μικρού εύρους συχνοτήτων το οποίο μπορεί να συσχετιστεί με την απόκριση συγκεκριμένων υλικών και αντικειμένων που βρίσκονται επάνω στην επιφάνεια της γης. Συνεπώς, συνδυάζοντας τα κανάλια του Landsat 8 είναι δυνατόν να δημιουργηθούν έγχρωμες απεικονίσεις σε πραγματικό εύρος χρωμάτων αλλά κυρίως να παραχθούν εικόνες οι οποίες χαρτογραφούν και ποσοτικοποιούν τον υπό μελέτη στόχο, εφ' όσον είναι γνωστή η φασματική του απόκριση στην ηλιακή Η/Μ ακτινοβολία.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για τα επιφανειακά ύδατα έχει μελετηθεί η φασματική απόκριση τους και είναι δυνατόν να υπολογιστούν δείκτες όπως ο κανονικοποιημένος δείκτης ύδατος ο οποίος δίνει τιμές οι οποίες χρησιμεύουν στον προσδιορισμό των υδάτινων μαζών σε μια περιοχή (McFEETERS, 1996). Ο δείκτης NDWI (Normalized Difference Water Index) υπολογίζεται με βάση τον τύπο:

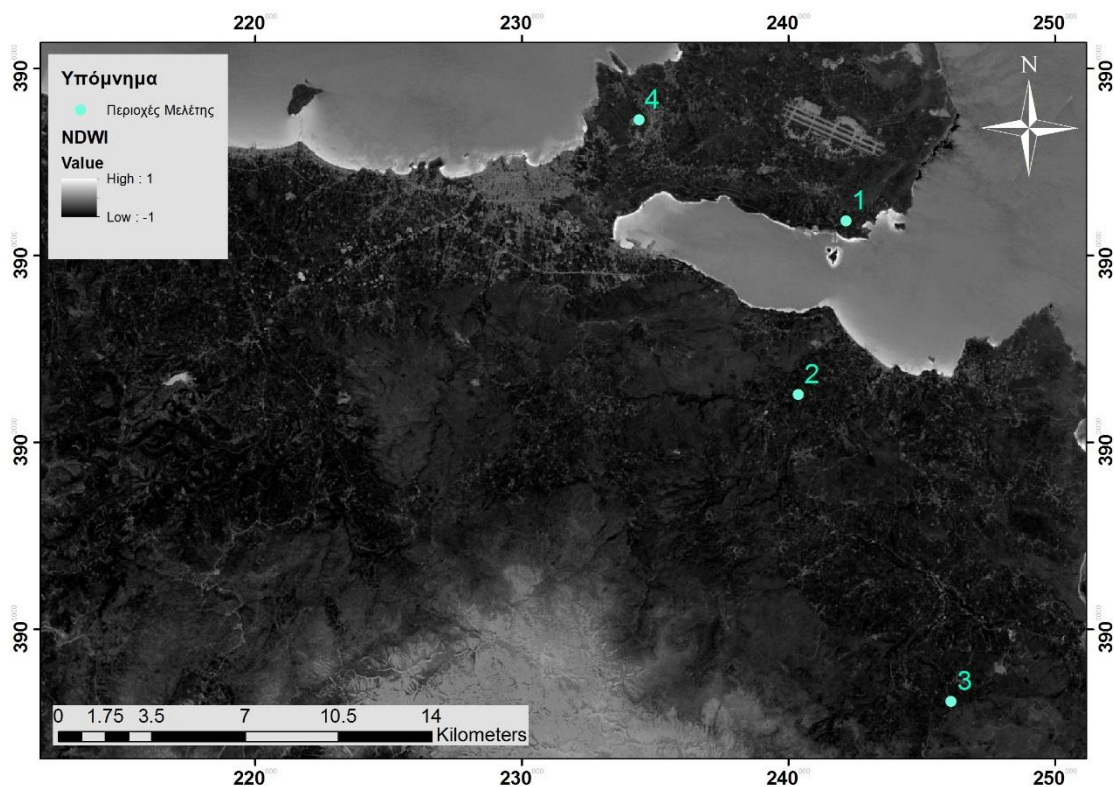
$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

Όπου *Green* το κανάλι που αντιπροσωπεύει την ανακλώμενη ακτινοβολία πράσινου χρώματος. (στον Landsat 8 αντιστοιχεί το κανάλι 3), και όπου *NIR* είναι το κανάλι του εγγύ υπέρυθρου (Near InfraRed) που αντιστοιχεί στο κανάλι 5.

Η εφαρμογή του παραπάνω δείκτη παράγει μία ψηφιακή εικόνα της οποίας οι τιμές έχουν εύρος από -1 έως 1. Οι θετικές τιμές προσδιορίζουν υπαίθριες

υδάτινες μάζες (λίμνες, ποτάμια, ανοιχτές δεξαμενές κ.ο.κ.), ενώ οι αρνητικές τιμές φανερώνουν μη υδατικές περιοχές (εδάφη, καλλιέργειες, αστικές περιοχές). Ο δείκτης χρησιμοποιείται κυρίως για εύρεση μαζών ύδατος και έχει ιδιαίτερη εφαρμογή στην καταγραφή πλημμυρικών φαινομένων (United States Geological Survey, 2013).

Παρακάτω παρουσιάζεται μία εικόνα κανονικοποιημένου δείκτη ύδατος (Εικόνα 15). Στην εικόνα οι χερσαίες εκτάσεις συμβολίζονται με σκοτεινούς τόνους, ενώ αντιθέτως οι λίμνες παρουσιάζονται με χρώματα κοντά στο λευκό.



Εικόνα 15. Αποτέλεσμα δείκτη NDWI & Περιοχές Μελέτης

Ακολουθεί μια σύντομη αναφορά από αποστολές δορυφόρων που είχαν ως κύριο στόχο ή έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας.

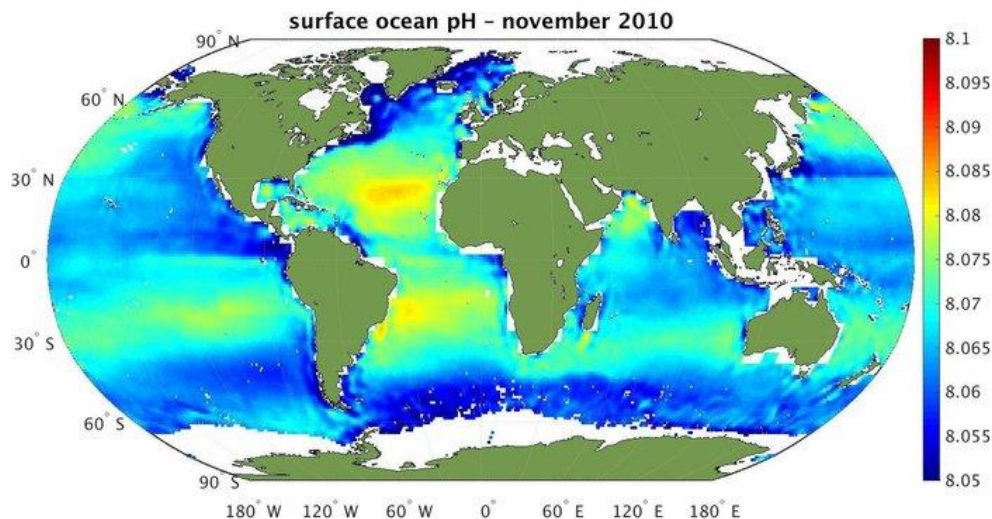
1.4.3 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

Οι αισθητήρες MODIS εξοπλίζουν τους δορυφόρους Terra και Aqua και λαμβάνουν δεδομένα σε 36 οπτικά/ υπέρυθρα κανάλια παρέχοντας στο σύνολο 44 προϊόντα καθημερινά με χωρική ανάλυση 1 km. (Justice et al., 2002) Για την ερμηνεία των προϊόντων των αισθητήρων χρησιμοποιούνται αρκετοί αλγόριθμοι όπως ο NDVI (Tucker, 1979) , (Myneni, Hall, Sellers, & Marshak, 1995), ο LAI (Leaf Area Index).

1.4.3 SMOS (Soil Moisture & Ocean Salinity)

Η SMOS είναι μία ευρωπαϊκή αποστολή της ESA (European Space Agency) η οποία παρακολουθεί την ποσότητα του νερού που συγκρατείται στα επιφανειακά στρώματα του εδάφους και τη συγκέντρωση του άλατος στο ανώτερο στρώμα του θαλασσινού νερού (Εικόνα 16). Η αποστολή SMOS ξεκίνησε στις 2 Νοεμβρίου 2009 και αποτελεί την δεύτερη μεγαλύτερη αποστολή της ESA για την εξερεύνηση της γήινης επιφάνειας (Earth Explorer Opportunity Mission).

Ο δορυφόρος SMOS φέρει ένα καινοτόμο αισθητήρα μικροκυμάτων που εκπέμπει σε L-band για να συλλαμβάνει τις εικόνες της "φωτεινότητας της θερμοκρασίας" έτσι ώστε να αντλήσει πληροφορίες σχετικά με την υγρασία του εδάφους, αλλά και την αλατότητα του εδάφους. (Wikipedia, 2014) Το άνοιγμά του είναι συνθετικό, τύπου MIRAS (Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis) και καταγράφει εικόνες με χωρική ανάλυση 35 km (ESA, 2013) Επίσης, η τροχιά του δορυφόρου του δίνει την δυνατότητα να περνά από το ίδιο σημείο κάθε 1 με 2 ημέρες.



Εικόνα 16. Αλατότητα των ωκεανών (ESA/R. Sabia, 2015)

1.4.4 Soil Moisture Active Passive (SMAP)

Ο Δορυφόρος SMAP είναι ένας νέος δορυφόρος της NASA (National Aeronautics and Space Administration) , που εκτοξεύθηκε πρόσφατα στις 29 Ιανουαρίου 2015 με σκοπό την καταγραφή δεδομένων σχετικά με την υγρασία και την κατάσταση του εδάφους. Ο δορυφόρος αποτελεί ένα πρωτοποριακό συνδυασμό ενεργητικής και παθητικής τηλεπισκόπησης καθώς χρησιμοποιεί ραντάρ το οποίο εκπέμπει ακτινοβολία πολύ μικρού μήκος καθώς και ένα ραδιόμετρο το οποίο μετράει την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία.

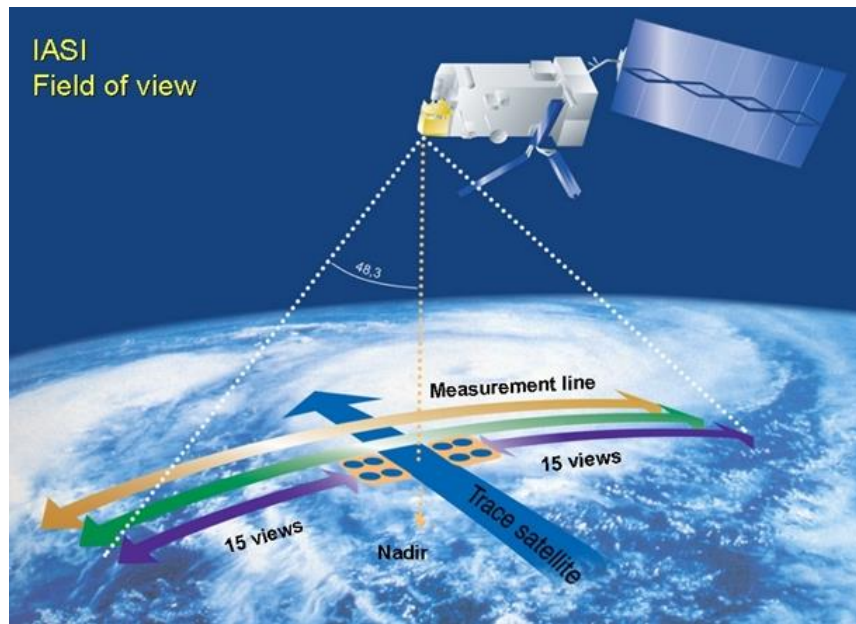
Συνδυάζοντας τις μετρήσεις της ανακλώμενης ακτινοβολίας (backscattering) και των δύο οργάνων παράγονται αποτελέσματα για την περιεκτικότητα της υγρασίας του εδάφους, τον κύκλο άνθρακα αλλά ταυτόχρονα ανιχνεύει και περιοχές οι οποίες μπορεί να είναι παγωμένες ή σε κατάσταση τήξης. Έτσι είναι δυνατό να προσδιοριστεί αν οι εν λόγω περιοχές βρίσκονται κατά της διάρκεια του ανοιξιάτικου λιώσιμου των πάγων ή της φθινοπωρινής δημιουργίας τους. Τα δεδομένα του SMAP έχουν διαφορετική χωρική ανάλυση για το κάθε είδος προϊόντος, η οποία κυμαίνεται από τα 36km έως και το 1km. (NASA, 2014)

1.4.5 ETOP

Το διαστημικό πρόγραμμα ETOP αποτελείται από 3 δορυφόρους πολικής τροχιάς, τον Metop-A, B και C. (EUMETSAT, 2015). Οι τρεις δορυφόροι εκτοξευθήκαν σταδιακά μέσα σε διάστημα 14 χρόνων και έχουν χαμηλή ως προς την γη τροχιά ενώ είναι εξοπλισμένοι με όργανα καταγραφής τελευταίας τεχνολογίας που προσφέρουν βελτιωμένες δυνατότητες τηλεπισκόπησης τόσο για μετεωρολογικές όσο και για κλιματολογικές έρευνες.

Η τεχνολογία των οργάνων που ενσωματώνουν οι δορυφόροι METOP είναι αποτέλεσμα της σύμπραξης IJPS (Joint Polar-Orbiting Operational Satellite System) των οργανισμών EUMETSAT, NOAA σε συνεργασία της ESA (European Space Agency) και της CNES (Centre National d'Etudes Spatiales).

Τα όργανα που ενσωματώνονται στους δορυφόρους του προγράμματος METOP είναι 12, το καθένα βασισμένο σε ξεχωριστή τεχνολογία τηλεπισκόπησης και συμβολομετρίας, ενώ αρκετά από αυτά συνδυάζουν διαφορετικές τεχνολογίες μαζί. Το κάθε ένα από τα όργανα έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά χωρικής κ ραδιομετρικής ανάλυσης, συχνότητας λήψης και εκπομπής και ως αποτέλεσμα τα δεδομένα του κάθε οργάνου ή συνδυασμού αυτών χρησιμεύουν σε διαφορετικές εφαρμογές και πεδία μελέτης. Οι τεχνολογίες που αξίζει να σημειωθούν είναι η IASI (INFRARED ATMOSPHERIC SOUNDING INTERFEROMETER) που είναι ένα υπέρυθρο συμβολόμετρο Michelson για την ηχητική μέτρηση της θερμοκρασίας, των υδρατμών και την παρακολούθηση της στοιβάδας του όζοντος Εικόνα 17. Το IASI καλύπτει φασματικό εύρος από 3,62-15,5 μm , το πλάτος της κάθε λωρίδας είναι 2112 km με ανάλυση 12 km στο κατώτατο σημείο (ναδίρ). Ακόμη το MHS (Microwave Humidity Sounder) αποτελεί ένα αυτοβαθμονομούμενο διασταυρωτή σάρωσης, μικροκυματικό ραδιόμετρο 5 καναλιών που λειτουργεί από τα 89 έως τα 190 GHz έτσι ώστε να είναι σε θέση να παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ατμοσφαιρική υγρασία και τους υδρατμούς.



Εικόνα 17. Τρόπος λειτουργίας και καταγραφής του συμβολόμετρου IASI (EUMETSAT, 2015)

2 Μεθοδολογία

2.1 Μεθοδολογία

την παρούσα παράγραφο γίνεται μια σύντομη αναφορά στις μεθόδους, τις διαδικασίες καθώς και τα μαθηματικά και προγραμματιστικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Τα παραπάνω αναλύονται διεξοδικά στα επιμέρους κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

Το αρχικό στάδιο περιλαμβάνει την λήψη και την προεπεξεργασία των δορυφορικών εικόνων για την συγκέντρωση των δεδομένων οπισθοσκέδασης στα σημεία μελέτης. Παράλληλα πραγματοποιείται η ανάκτηση της χρονοσειράς με τιμές της εδαφικής υγρασίας που βρίσκεται στα καταγραφικά συστήματα των περιοχών μελέτης.

Η προεπεξεργασία των δορυφορικών εικόνων σε γενικές γραμμές περιλαμβάνει την συγχώνευση των καναλιών σε μοναδικό αρχείο, την βαθμονόμηση, την ατμοσφαιρική διόρθωση, την τοπογραφική διόρθωση και την εξαγωγή του τελικού αρχείου. Η προεπεξεργασία για το προϊόν του κάθε δορυφόρου πραγματοποιείται με διακριτά λογισμικά και σε κάθε περίπτωση ακολουθείται ξεχωριστή μεθοδολογία και βήματα, λόγω της διαφορετικής τεχνολογίας των δορυφορικών προϊόντων που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Για τις εικόνες του δορυφόρου Sentinel 1 χρησιμοποιείται το λογισμικό-εργαλειοθήκη που παρέχεται από την ESA υπό την ονομασία Sentinel-1 toolbox. Η διαδικασία περιλαμβάνει ραδιομετρική βαθμονόμηση, τοπογραφική διόρθωση, μετατροπή της αριθμητικής κλίμακας της εικόνας και την εξαγωγή του τελικού προϊόντος σε μορφή GeoTiff.

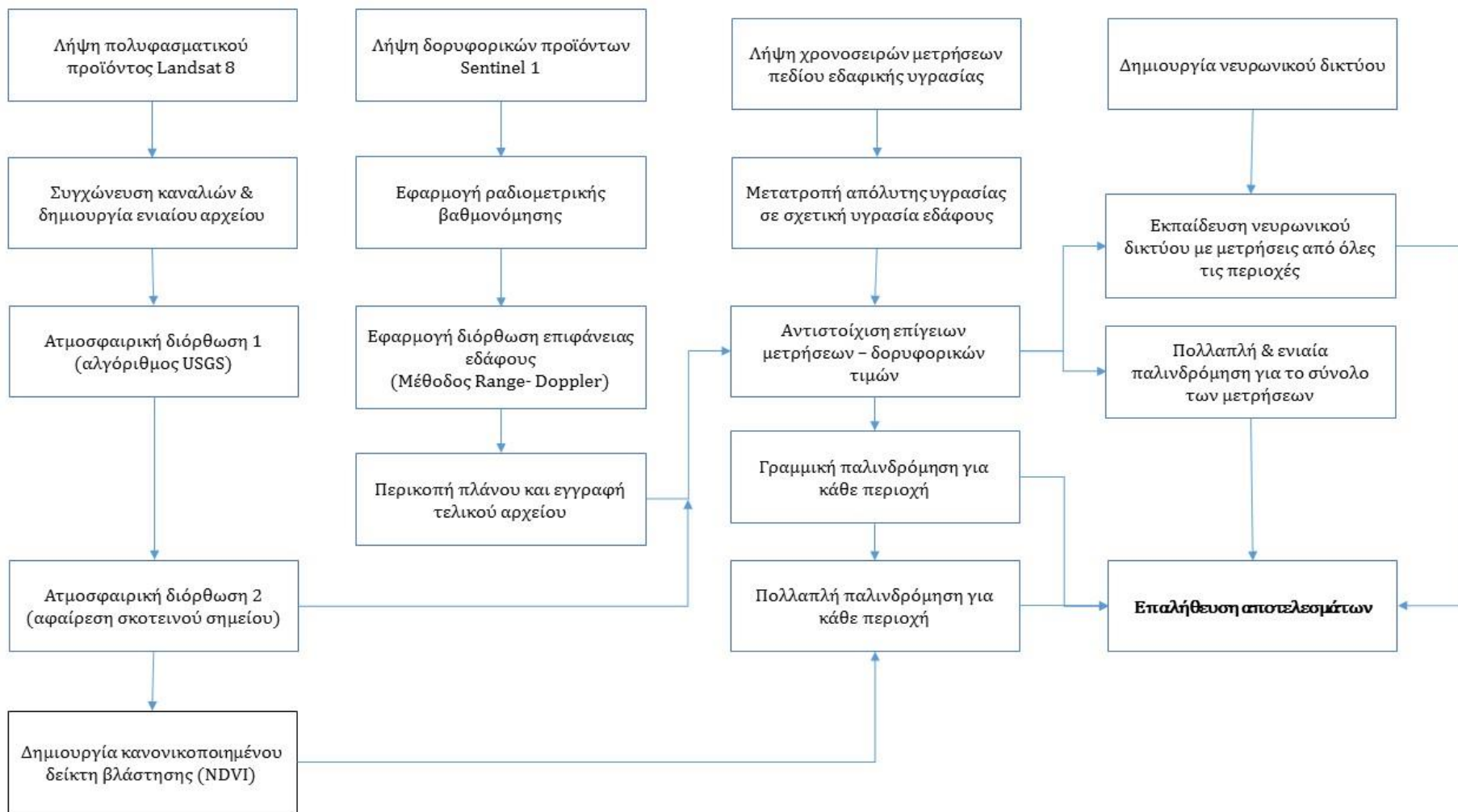
Τα προϊόντα του δορυφόρου Landsat 8 επεξεργάζονται με κλασσικά λογισμικά τηλεπισκόπησης τα οποία περιλαμβάνουν πληθώρα εργαλείων και αλγορίθμων για την αξιοποίηση των δορυφορικών προϊόντων σε ποικίλους τύπους εφαρμογών. Αρχικά, πραγματοποιείται η συγχώνευση των καναλιών που είναι

εγγεγραμμένα σε αυτόνομα αρχεία GeoTiff, με την χρήση του λογισμικού ERDAS Imagine 2015. Ύστερα ακολουθεί η ατμοσφαιρική διόρθωση που περιλαμβάνει δύο σκέλη. Στο πρώτο σκέλος χρησιμοποιείται έτοιμο script στο ERDAS Imagine που εφαρμόζει αλγόριθμο που παρέχει η NASA (National Aeronautics and Space Administration), ενώ στο δεύτερο σκέλος πραγματοποιείται η μέθοδος αφαίρεσης σκοτεινού σημείου. Για την μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται, σε πρώτο στάδιο, το λογισμικό Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών Arcmap για την συγκέντρωση των απαραίτητων δεδομένων και ολοκληρώνεται στο λογισμικό ERDAS Imagine με την χρήση script που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την ανάκτηση των τιμών οπισθοσκέδασης από τις δορυφορικές εικόνες για τις περιοχές μελέτης. Η διαδικασία γίνεται με τον ίδιο τρόπο και για τους δύο τύπους δορυφορικών προϊόντων (Landsat 8 & Sentinel 1) με την βοήθεια του λογισμικού Arcmap. Οι τιμές οπισθοσκέδασης συγκεντρώνονται σε πίνακες μαζί με τις επίγειες μετρήσεις εδαφικής υγρασίας για την διευκόλυνση της μετέπειτα ανάλυσης των δεδομένων. Οι τιμές αξιολογούνται σχετικά με το ποσοστό στατιστική τους συσχέτισης.

Στη συνέχεια η στατιστική ανάλυση των δεδομένων περιλαμβάνει την γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ της οπισθοσκέδασης που καταγράφεται από τον δορυφόρο Sentinel 1 και της υγρασίας του εδάφους, την αντίστοιχη παλινδρόμηση για τα δεδομένα από τον δορυφόρο Landsat 8, καθώς και μια πολλαπλή παλινδρόμηση μεταξύ μεταβλητών και των δύο δορυφόρων και της επίγειας υγρασίας.

Επιπροσθέτως, με τα διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα και τις αντίστοιχες επίγειες μετρήσεις έγινε εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου προσαρμογής συνάρτησης με σκοπό την βελτίωση των αποτελεσμάτων συσχέτισης επίγειων και δορυφορικών δεδομένων. Η δημιουργία και η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου έγινε με την βοήθεια του λογισμικού της Matlab. Στο τελικό στάδιο πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζεται συνοπτικά η μεθοδολογία.



Διάγραμμα 1. Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας

2.2 Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει τα σημεία στα οποία έχουν τοποθετηθεί τα υγρασιόμετρα και τα οποία λαμβάνεται η τιμή της οπισθοσκέδασης των δορυφορικών εικόνων.

Στην

Εικόνα 21 παρουσιάζεται η θέση των περιοχών μελέτης στην ευρύτερη περιοχή των Χανίων.



Εικόνα 18 Άποψη του οικοπέδου κα της ευρύτερης περιοχής στην οποία έχει τοποθετηθεί το υγρασιόμετρο 1 (Περιοχή μελέτης 1)

Το υγρασιόμετρο 1 έχει τοποθετηθεί σε οικόπεδο νοτιοανατολικά της περιοχής του Ακρωτηρίου σε υψόμετρο 52 m. Το οικόπεδο δεν παρουσιάζει υψηλά επίπεδα βλάστησης ούτε απότομη κλίση εδάφους (Εικόνα 18). Για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης τοποθέτησης των υγρασιομέτρων και του καταγραφικού (Εικόνα 19) έγινε λήψη των συντεταγμένων με GPS υψηλής ακρίβειας (Εικόνα 20).



Εικόνα 19. Λήψη δεδομένων από το καταγραφικό στην περιοχή μελέτης 1



Εικόνα 20. Καταγραφή της ακριβούς θέσης υγρασιομέτρου περιοχής μελέτης 1 με την χρήση GPS υψηλής ακρίβειας.



Εικόνα 21. Χάρτης της ευρύτερης περιοχής των Χανίων & περιοχές μελέτης



Εικόνα 22. Καταγραφή ακριβούς θέσης υγρασιόμετρου στην περιοχή μελέτης 2 με την χρήση GPS



Εικόνα 23. Άποψη του οικοπέδου κα της ευρύτερης περιοχής στην οποία έχει τοποθετηθεί το υγρασιόμετρο 2 (Περιοχή μελέτης 2)

Το υγρασιόμετρο 2 είναι τοποθετημένο σε οικόπεδο κοντά στο Νέο Χωριό (Αποκόρωνας) σε υψόμετρο 36 m. Η περιοχή παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές στην βλάστηση, ενώ στα γύρω οικόπεδα βρίσκονται καλλιέργειες και δασικές εκτάσεις με ψηλά δέντρα (Εικόνα 22, Εικόνα 23).



Εικόνα 24. Άποψη καταγραφικού στην περιοχή μελέτης 3



Εικόνα 25. Άποψη του οικοπέδου κα της ευρύτερης περιοχής στην οποία έχει τοποθετηθεί το υγρασιόμετρο 3 (Περιοχή μελέτης 3)



Εικόνα 26. Άποψη του οικοπέδου κα της ευρύτερης περιοχής στην οποία έχει τοποθετηθεί το υγρασιόμετρο 4 (Περιοχή μελέτης 4)



Εικόνα 27. Καταγραφή ακριβούς θέσης υγρασιόμετρου στην περιοχή μελέτης 3 με την χρήση GPS

Το υγρασιόμετρο 3 είναι τοποθετημένο σε οικόπεδο φυτεμένο με αμπέλια, δίπλα στο χωριό Αλικάμπος, σε υψόμετρο 398 m (Εικόνα 27, Εικόνα 25, Εικόνα 24).

Το υγρασιόμετρο 4 είναι τοποθετημένο εντός της Πολυτεχνειούπολης (Εικόνα 26), στο χώρο που βρίσκεται ο μετεωρολογικός σταθμός όπου συγκεντρώνονται δεδομένα υψηλής χρονικής ανάλυσης όχι μόνο για την υγρασία του εδάφους, αλλά για όλες τις μετεωρολογικές παραμέτρους.

Σε γενικές γραμμές η ευρύτερη περιοχή μελέτης (επαρχία Χανίων) παρουσιάζει ήπιο μεσογειακό κλίμα με ξηρά καλοκαίρια και υγρούς χειμώνες, που συνηθίζονται οι βροχοπτώσεις. Ο νομός Χανίων έχει παρουσιάζει μεγαλύτερα επίπεδα βλάστησης σε σχέση με την υπόλοιπη Κρήτη, λόγω της ύπαρξης υπόγειων νερών και τις συχνές βροχοπτώσεις κατά την διάρκεια του χειμώνα, ενώ σχετικά με την χρήση γης παρατηρείται μεγάλο ποσοστό καλλιεργειών, λιβαδιών αλλά και εκτάσεις μικτών δασών.

2.3 Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: οι επίγειες μετρήσεις των υγρασιομέτρων, οι τιμές των εικονοστοιχείων των δορυφορικών εικόνων καθώς και τα μετεωρολογικά δεδομένα.

2.3.1 Επίγειες μετρήσεις

Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύονται από το καταγραφικό της κάθε τοποθεσίας και στη συνέχεια μεταφέρονται με την χρήση υπολογιστή σε μορφή χρονοσειράς σε αρχείο Excel. Το καταγραφικό σύστημα για τις περιοχές 1, 2 & 3 έχει χρονική ανάλυση 15 λεπτών, ενώ το καταγραφικό σύστημα στην περιοχή 4 καταγράφει κάθε 1 ώρα.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι Decagon EC-5 (Εικόνα 28) που υπολογίζουν την περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους μετρώντας την μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού του αισθητήρα με την χρήση δεδομένων για την ηλεκτροχωρητικότητα/ συχνότητα του υλικού.

Η συχνότητα είναι συγχρονισμένη στα 70MHz έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί τις επιδράσεις της αλατότητας και της υφής τους εδάφους. Έτσι, ο εν λόγω αισθητήρας μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά σχεδόν σε οποιοδήποτε εδαφικό μέσο, καθώς συνοδεύεται και από εργοστασιακές βαθμονομήσεις που είναι κατάλληλες για μετρήσεις σε πληθώρα εδαφών όπως τα ανόργανα εδάφη, εδάφη καλλιεργειών, εδάφη rockwool και περλίτη. (DECAGON, 2015)



Εικόνα 28. Αισθητήρας Υγρασίας Εδάφους Decagon EC-5 (DECAGON, 2015)

Το μήκος του αισθητήρα είναι 5cm και η ευαισθησία του περιορίζεται σε όγκο εδάφους ~0.2 L (Πίνακας 4).

Πίνακας 4 Χαρακτηριστικά αισθητήρα DECAGON EC-5 (DECAGON, 2015)

ACCURACY	Mineral Soil: ±3% VWC, most mineral soils, up to 8 dS/m ±1-2% VWC with soil specific calibration Rockwool: ±3% VWC, 0.5 to 8 dS/m Potting Soil: ±3% VWC, 3 to 14 dS/m
RESOLUTION	0.1% VWC (mineral soil) 0.25% VWC (rockwool)
RANGE	calibration dependant; up to 0-100% VWC with polynomial equation
DIMENSIONS	8.9 x 1.8 x 0.7 cm
CABLE LENGTH	Sensors come standard with 5 m cable. Custom cable lengths available. Maximum cable length of 40 m. Please contact Decagon if you need longer cable lengths.
MEASUREMENT TIME	10 ms
POWER	2.5 - 3.6 V DC @ 10 mA. Output proportional to input voltage. 2.5 V and 3 V excitations supported with calibration equations
OUTPUT	Voltage, correlated linearly (soil) or polynomially (growing media) with VWC
TEMPERATURE	-40°C to +50°C
CONNECTOR TYPES	3.5 mm "stereo" plug or stripped and tinned lead wires (3)
DATALOGGER COMPATIBILITY (NOT EXCLUSIVE)	Decagon Em50 series, ProCheck, Campbell Scientific
WARRANTY	One year, parts and labor

Τα υγρασιόμετρα σε κάθε περιοχή μελέτης τοποθετήθηκαν σε βάθος 5cm & 15cm για την κάλυψη των αναγκών ποικίλων μελετών, αλλά για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις των επιφανειακών αισθητήρων υπολογίζοντας την μέση τιμή τους. Αυτό δικαιολογείται καθώς μελέτες (Gherboudj, Magagi, Berg, & Toth, 2011) έχουν δείξει ότι η μικροκυματική ακτινοβολία C band που εκπέμπει ο δορυφόρος Sentinel 1 δεν εισχωρεί σε βάθος μεγαλύτερο των 5cm.

Οι τιμές αποτελούν ποσοστό περιεχόμενου ύδατος σε m³ ανά m³ εδάφους το οποίο προκύπτει από τις επεξεργασία των τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αισθητήρα και λαμβάνει χώρα στο καταγραφικό σύστημα. Η μετατροπή της μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε ποσοστό υγρασίας εδάφους

πραγματοποιείται από καμπύλες βαθμονόμησης για κάθε είδους εδάφους που παρέχει η εταιρεία κατασκευής του αισθητήρα. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας η καμπύλη που επιλέχθηκε είναι η γενική προεπιλεγμένη καμπύλη του καταγραφικού που προσαρμόζεται με τον βέλτιστο τρόπο για πληθώρα εδαφών που δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα ακραία χαρακτηριστικά.

Μετά από αυτό, οι καταγεγραμμένες μετρήσεις ογκομετρικής απόλυτης εδαφικής υγρασίας (m^3/m^3) μετατράπηκαν σε σχετική υγρασία εδάφους επί τοις εκατό (%) αφενός για να έχουν κοινή βάση και να είναι εύκολα συγκρίσιμες και αφετέρου να είναι δυνατόν να συνδυαστούν οι μετρήσεις από τις διαφορετικά σημεία μελέτης σε μία ενιαία παλινδρόμηση με σκοπό την βελτίωση της παλινδρόμησης.

Η κλασσική μέθοδος για την μετατροπή της απόλυτης υγρασίας σε σχετική γίνεται μέσω της ανάλυσης του εδαφικού μέσου και εξαγωγής συντελεστών που καθορίζουν την μετατροπή. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, καθώς οι εδαφικές αναλύσεις προϋποθέτουν επιπρόσθετο εξοπλισμό ή την συνεργασία με άλλα εργαστήρια, χρησιμοποιήθηκε ένας εναλλακτικός τρόπος μετατροπής με χαμηλότερη ακρίβεια αποτελέσματος. Η διαδικασία βασίζεται στην παραδοχή ότι μετά από φαινόμενα έντονη και διαρκούς βροχόπτωσης το έδαφος προσεγγίζει το 100% της υγρασίας που είναι σε θέση να κατακρατήσει. Αντίστοιχα θεωρείται ότι, εφόσον δεν υπάρχει καμία πηγή εμπλουτισμού του επιφανειακού εδάφους με νερό, η μέτρηση της εδαφικής υγρασίας μετά από διαρκής ξηρασία και έντονη θερμοκρασία αποτελεί την ελάχιστη υγρασία που συναντάται στο υπό μελέτη εδαφικό μέσο. Έτσι, βρέθηκε για κάθε σημείο μελέτης η μεγαλύτερη καταγεγραμμένη τιμή μετά από πολυήμερη έντονη βροχόπτωση και η μικρότερη τιμή κατά την καλοκαιρινή περίοδο που επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες και ξηρασία. Με βάση τις προαναφερθέντες τιμές έγινε βαθμονόμηση των μετρήσεων και υπολογίστηκε η σχετική υγρασία του εδάφους. Ο υπολογισμός έγινε με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$\text{σχετική υγρασία} = \left(\frac{\text{απόλυτη υγρασία} - \text{μέγιστη τιμή}}{\text{μέγιστη τιμή} - \text{ελάχιστη τιμή}} \cdot \text{μέγιστη τιμή} \right) \cdot 100\%$$

Η χρονοσειρά των μετρήσεων της εδαφικής υγρασίας από τα συστήματα καταγραφής έχει βήμα μισής ώρα (30min). Έτσι, η τιμή της εδαφικής υγρασίας που αντιστοιχεί σε κάθε δορυφορική εικόνα θεωρήθηκε ότι είναι η τιμή που καταγράφηκε στο μικρότερο δυνατό χρονικό διάστημα από ή πριν την στιγμή λήψης της δορυφορικής εικόνας. Για την αντιστοίχιση των επίγειων μετρήσεων με τις δορυφορικές εικόνες πρέπει να μετατραπεί η ώρα λήψης της εικόνας από παγκόσμια ώρα (UTC) σε GTM +2 ή GTM +3 ανάλογα την ζώνη ώρας. Επίσης, τα συστήματα καταγραφής δεν πραγματοποιούν αυτόματη αλλαγή ζώνης ώρας, με αποτέλεσμα η ζώνη να αλλάζει με την αμέσως επόμενη σύνδεση σε Η/Υ μετά την αλλαγή. Ως αποτέλεσμα, οι τιμές που έχουν καταγραφεί από την 29^η Μαρτίου 2015 03:00 π.μ. που άλλαξε η ζώνη ώρας μέχρι και την 22^η Απριλίου 2015 10:00 π.μ. που πραγματοποιήθηκε σύνδεση σε υπολογιστή για την λήψη δεδομένων, θα πρέπει να διορθωθούν και να μετατοπιστούν 1 ώρα μπροστά.

Άλλη μία επεξεργασία που λαμβάνει χώρα στις μετρήσεις της εδαφικής υγρασίας είναι η μετατροπή τους σε ποσοστιαίες μονάδες (%). Η διαδικασία περιλαμβάνει την βαθμονόμηση των μετρήσεων για το εδαφικό μέσο και την περίοδο καταγραφής των τιμών. Έτσι, βρέθηκε η χαμηλότερη καταγεγραμμένη τιμή υγρασίας μετά από περίοδο ξηρασίας εντός της διαθέσιμης χρονοσειράς, η οποία αντιστοιχεί στην ελάχιστη περιεκτικότητα σε υγρασία που δύναται να υφίσταται στο εδαφικό μέσο του κάθε σημείου μελέτης. Αντίστοιχα, βρέθηκε και η μέγιστη καταγεγραμμένη υγρασία μετά από βροχόπτωση. Με βάση τα παραπάνω ορίστηκε η ελάχιστη καταγεγραμμένη τιμή ως το 0% υγρασίας εδάφους, ενώ η μέγιστη το 100%.

2.3.2 Ψηφιακές τιμές εικονοστοιχείων (Digital Numbers)

Οι ψηφιακές τιμές λαμβάνονται από τις δορυφορικές εικόνες αφού προηγηθεί η επεξεργασία που αναλύεται στα επιμέρους κεφάλαια της παρούσας εργασίας. Τα δεδομένα αποτελούνται από τις ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν στα σημεία που βρίσκεται το υγρασιόμετρο και βρίσκονται σε διαφορετική κλίμακα για τον κάθε δορυφόρο.

Για τον δορυφόρο Landsat 8, στις επεξεργασμένες τελικές εικόνες οι τιμές των εικονοστοιχείων βρίσκονται σε γραμμική κλίμακα (Double-precision floating-point format) ενώ τα εικονοστοιχεία του Sentinel 1 είναι κωδικοποιημένα σε λογαριθμική κλίμακα dB.

Οι διαθέσιμες δορυφορικές εικόνες στο διάστημα μελέτης της παρούσας εργασίας για τον δορυφόρο Sentinel 1 είναι 30 (Πίνακας 5) , ενώ αντίστοιχα για τον δορυφόρο Landsat 8 ο αριθμός τους ανέρχεται σε 8 (Πίνακας 6). Για τον δορυφόρο Landsat 8 υπάρχουν αισθητά λιγότερα δεδομένα, καθώς κατά το διάστημα της εκπόνησης της παρούσας εργασίας και της συλλογής των δεδομένων σημειώθηκαν πολύ συχνές νεφώσεις και βροχοπτώσεις πάνω από τα σημεία μελέτης. Αποτέλεσμα ήταν αρκετές εικόνες που ελήφθησαν από τον Landsat 8 να μην είναι αξιοποιήσιμες λόγω της έντονης νεφοκάλυψης.

Οι δορυφορικές εικόνες που παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 5 & Πίνακας 6) δεν χρησιμοποιήθηκαν όλες και στις 4 περιοχές μελέτης, καθώς σε μερικές περιοχές (π.χ. στην περιοχή 3) λόγω τεχνικού προβλήματος οι επίγειες μετρήσεις που αντιστοιχούσαν στις δορυφορικές εικόνες ήταν λιγότερες ή αντίστροφα (π.χ. στην περιοχή 4) υπήρχαν περισσότερες μετρήσεις επίγειες μετρήσεις σε σχέση με τις άλλες περιοχές λόγω της ευκολίας λήψης των δεδομένων. Το ίδιο ισχύει και για τις εικόνες του δορυφόρου Landsat 8.

Πίνακας 5. Ημερομηνία & ώρα λήψης δορυφορικών εικόνων Sentinel 1

A/A	Ημερομηνία λήψης εικόνας	Ώρα λήψης εικόνας GTM = +2/+3
1	16/1/2015	18:22:19
2	17/1/2015	6:23:49
3	9/2/2015	18:22:28
4	10/2/2015	6:23:51
5	21/2/2015	18:22:26
6	22/2/2015	6:23:52
7	6/3/2015	6:23:55
8	17/3/2015	18:22:19
9	18/3/2015	6:23:55

10	29/3/2015	19:22:29
11	30/3/2015	7:23:55
12	10/4/2015	19:22:29
13	11/4/2015	7:23:56
14	22/4/2015	19:22:20
15	23/4/2015	7:23:56
16	3/5/2015	18:22:19
17	4/5/2015	19:22:11
18	5/5/2015	7:23:57
19	16/5/2015	19:22:31
20	17/5/2015	7:23:58
21	28/5/2015	19:22:32
22	29/5/2015	7:23:59
23	9/6/2015	19:22:23
24	21/6/2015	19:22:24
25	22/6/2015	7:24:00
26	3/7/2015	19:22:24
27	4/7/2015	7:24:00
28	15/7/2015	19:22:24
29	27/7/2015	17:22:34
30	28/7/2015	7:24:01

Πίνακας 6. Ημερομηνία & ώρα λήψης δορυφορικών εικόνων Landsat 8

+2/+3		
1	12/6/2014	10:59
2	2/8/2015	10:59
3	13/4/2015	11:58
4	29/4/2015	11:58
5	15/5/2015	11:58
6	31/5/2015	11:58
7	16/6/2015	11:58
8	18/7/2015	11:58

2.3.3 Μετεωρολογικά Δεδομένα

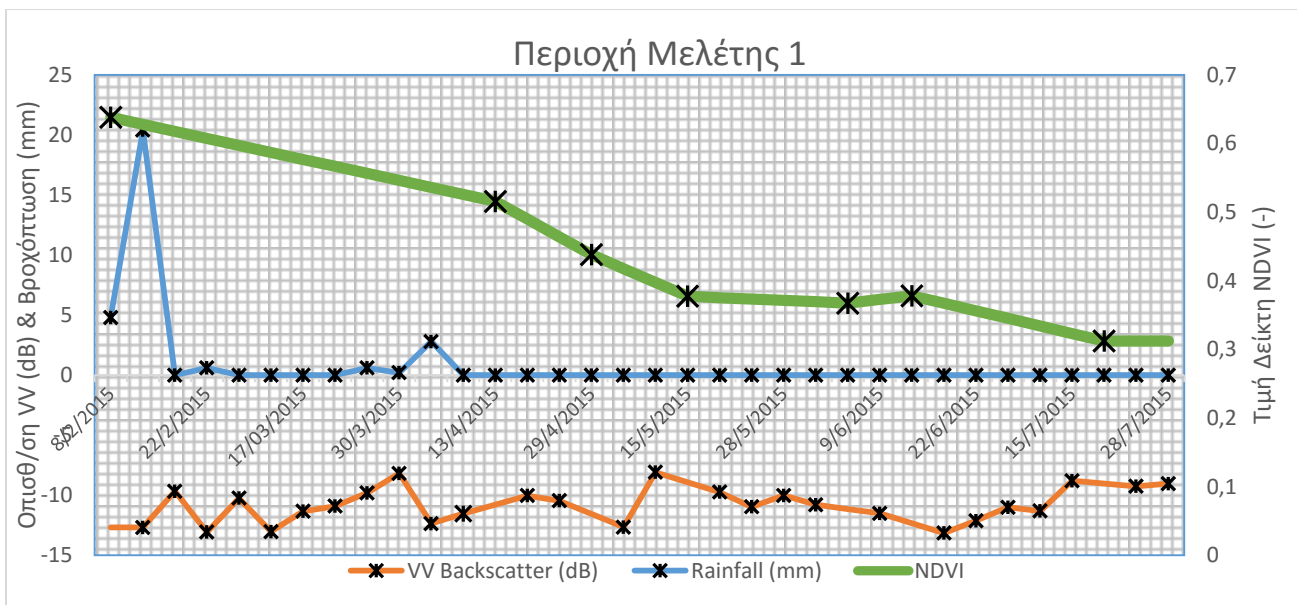
Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αφορούσαν στην βροχόπτωση με τα οποία, μετά την ολοκλήρωση των παλινδρομήσεων, κατασκευάστηκαν συνδυαστικά διαγράμματα βροχόπτωσης, δείκτη NDVI &

οπισθοσκέδασης VV (2.3.4 Συνδυαστικά Διαγράμματα, σελ. 54) με σκοπό την καλύτερη κατανόηση και μελέτη των διακυμάνσεων των εξαρτώμενων μεταβλητών μεταξύ τους αλλά την εξάρτησή τους από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

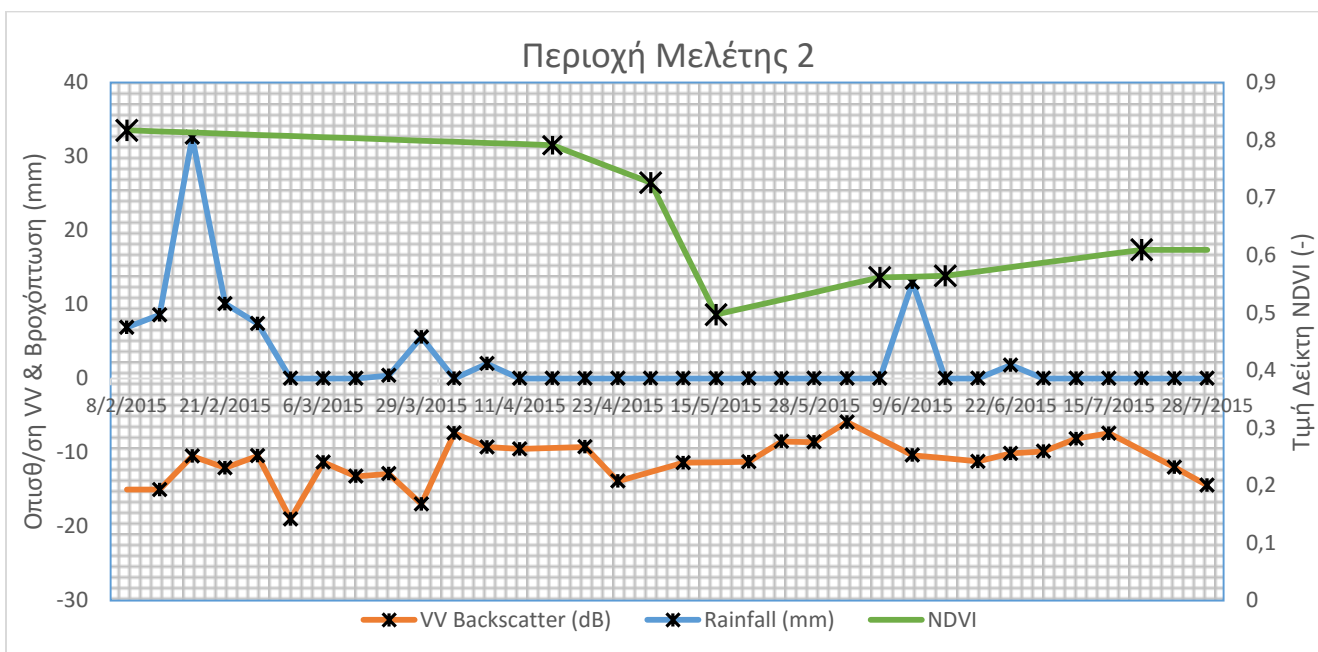
Η λήψη των δεδομένων έγινε από την ηλεκτρονική βάση δεδομένων της ιστοσελίδας meteo.gr με την μορφή χρονοσειράς χρονικής ανάλυσης μίας μέρας, ενώ ομαδοποίηση γίνεται σε ανεξάρτητα μηνιαία αρχεία. Οι διαθέσιμοι μετεωρολογικοί σταθμοί που καλύπτουν τα σημεία μελέτης είναι ο σταθμός του Πολυτεχνείου & ο σταθμός των Βρυσών. Καθώς δεν υπήρχαν άλλοι διαθέσιμοι σταθμοί, τα σημεία ομαδοποιήθηκαν στους δύο προαναφερθέντες με την παραδοχή ότι η βροχόπτωση έχει μικρή απόκλιση από το ένα σημείο στο άλλο. Έτσι στα σημεία μελέτης 1 (Μαράθι) & 4 (Πολυτεχνείο) αντιστοιχήθηκαν οι τιμές βροχόπτωσης από τον σταθμό του Πολυτεχνείου, ενώ στα σημεία μελέτης 2 (Νέο Χωριό) & 3 (Οινοποιείο Ντουράκη) αντιστοιχήθηκαν τα δεδομένα από τον μετεωρολογικό σταθμό των Βρυσών.

2.3.4 Συνδυαστικά Διαγράμματα

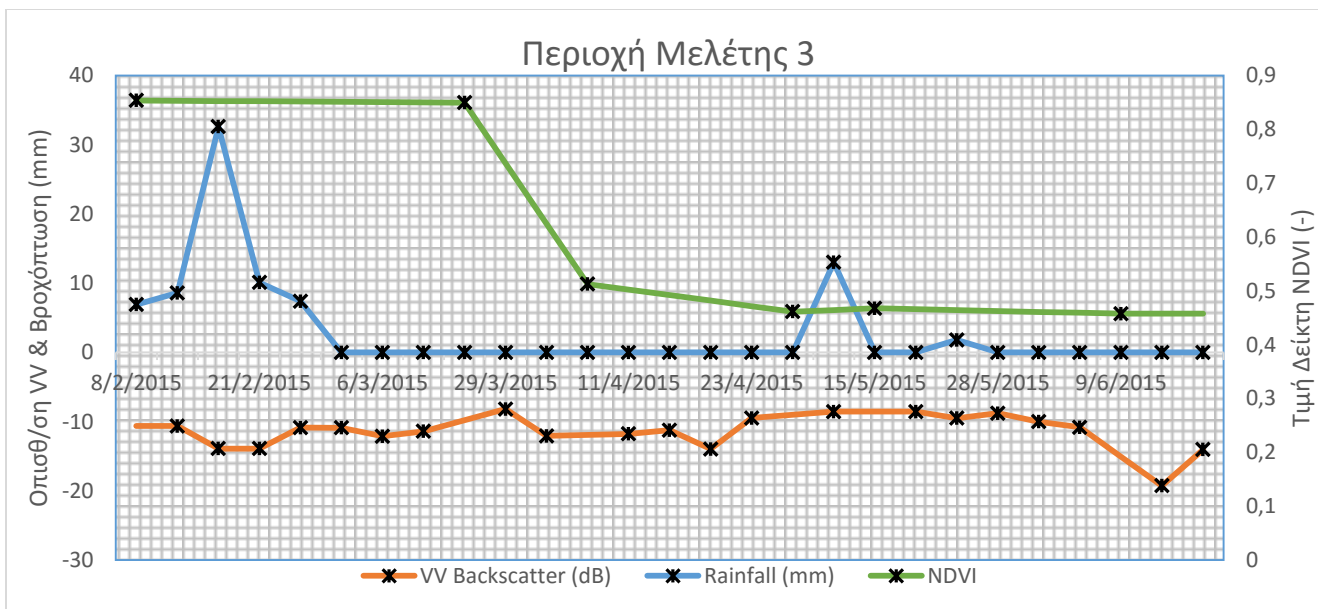
Στα συνδυαστικά διαγράμματα παρατηρείται η μεταβολή της οπισθοσκέδασης του ραντάρ και η μεταβολή της βλάστησης συναρτήσει περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως η βροχόπτωση. Η ακριβής συσχέτιση των μεταβλητών θα αναλυθεί σε επιμέρους κεφάλαια της παρούσας εργασίας.



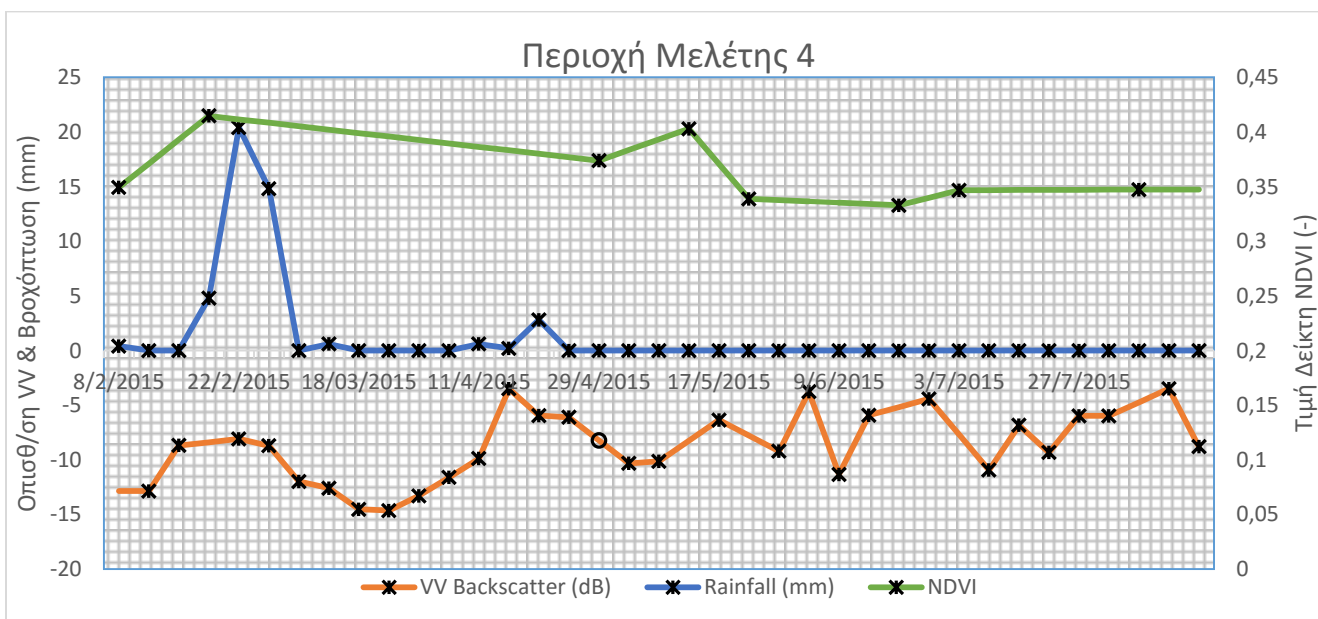
Διάγραμμα 2. Διαγραμματική απεικόνιση οπισθοσκέδασης VV, Βροχόπτωσης και δείκτη NDVI για την περιοχή μελέτης 1



Διάγραμμα 3. Διαγραμματική απεικόνιση οπισθοσκέδασης VV, Βροχόπτωσης και δείκτη NDVI για την περιοχή μελέτης 2



Διάγραμμα 4. Διαγραμματική απεικόνιση οπισθοσκέδασης VV, Βροχόπτωσης και δείκτη NDVI για την περιοχή μελέτης 3



Διάγραμμα 5. Διαγραμματική απεικόνιση οπισθοσκέδασης VV, Βροχόπτωσης και δείκτη NDVI για την περιοχή μελέτης 4

Όπως φαίνεται στα Διαγράμματα 1,2,3,4,5 η βλάστηση επηρεάζεται άμεσα από την βροχόπτωση, κάτι που είναι αναμενόμενο. Για την οπισθοσκέδαση του ραντάρ, από τα παραπάνω διαγράμματα δεν είναι δυνατόν να γίνει κάποια αρχική

εκτίμηση, καθώς η μεταβολή δεν ακολουθεί κάποιο κανόνα. Η μελέτη της συσχέτισης, γραμμικής ή όχι θα γίνει σε επιμέρους κεφάλαια.

3 Επεξεργασία Δορυφορικών εικόνων

3.1 Προεπεξεργασία εικόνων Sentinel 1

3.1.1 Λήψη

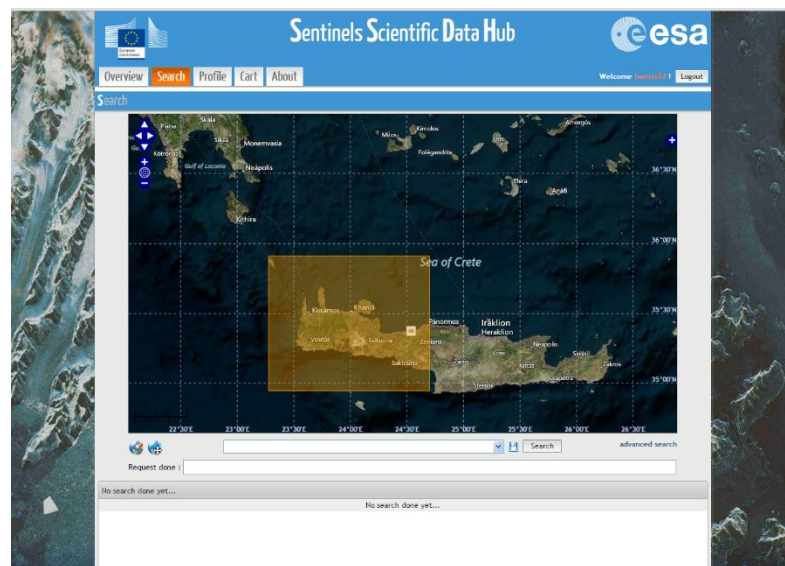
Αρχικά, η λήψη των εικόνων Sentinel 1 γίνεται από αντίστοιχη ιστοσελίδα της ESA (Εικόνα 29), που αποτελεί τον δίαυλο παροχής δεδομένων του δορυφόρου (<https://scihub.esa.int/>).



Εικόνα 29. Sentinels Scientific Data Hub

Εισερχόμενοι στον δίαυλο, μπορούμε να αναζητήσουμε τις εικόνες επιλέγοντας την περιοχή στον χάρτη, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 30. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, οι εικόνες που χρειάζονται είναι οι εικόνες τύπου GRD (Ground Range Detected). Ο δίαυλος παρέχει, επίσης, εικόνες τύπου RAW, SLC (Single Look Complex).

Μετά την αναζήτηση εμφανίζονται όλες οι διαθέσιμες εικόνες της



Εικόνα 30. Οριοθέτηση περιοχής για την αναζήτηση εικόνων Sentinel μέσω του Sentinel 1 Data Hub

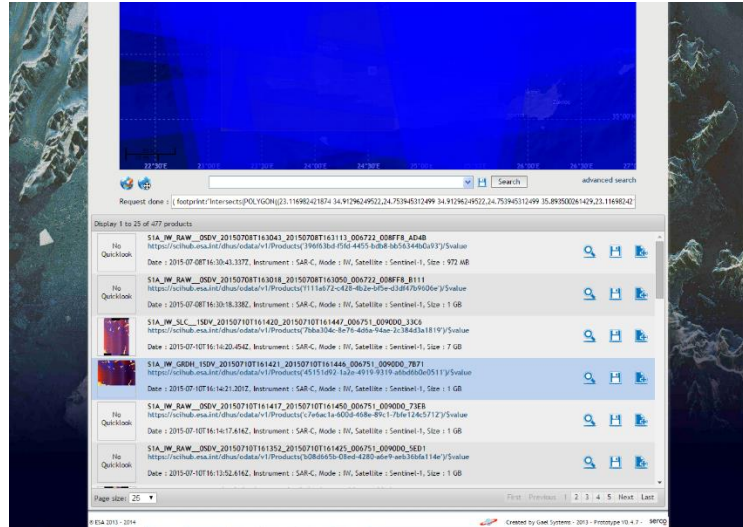
επιλεγμένης περιοχής με κατάταξη κατά ημερομηνία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 31. Στην αναζήτηση είναι δυνατόν να γίνει εφαρμογή φίλτρου στα αποτελέσματα ως προς το χρονικό εύρος, τον τύπο της εικόνας, τον τύπο πόλωσης κ.α.

Οι εικόνες που λαμβάνονται χρειάζονται προεπεξεργασία για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν. Στις διαδικασίες που πρέπει να εκτελεστούν συμπεριλαμβάνονται η βαθμονόμηση, η τοπογραφική διόρθωση καθώς και η μετατροπή της κλίμακας των τιμών των εικονοστοιχείων από γραμμική (τύπου Sigma) σε λογαριθμική (dB).

Οι παραπάνω διεργασίες πραγματοποιούνται εύκολα με την χρήση του προγραμματιστικού εργαλείου που διανέμει δωρεάν η ESA για την αξιοποίηση των εικόνων του δορυφόρου Sentinel 1 (Εικόνα 32). Το λογισμικό ονομάζεται Sentinel-1 Toolbox και είναι διαθέσιμο προς λήψη στην ιστοσελίδα της ESA για τον Sentinel-1 (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>).

3.1.2 Ραδιομετρική διόρθωση (Radiometric Calibration)

Κατά την τυπική επεξεργασία



Εικόνα 31. Απεικόνιση αποτελεσμάτων αναζήτησης δορυφορικών προϊόντων στον ηλεκτρονικό δίαυλο του Sentinel 1.



Εικόνα 32. Λογότυπο εκκίνησης Sentinel 1 Toolbox

SAR (Synthetic Aperture Radar) των δεδομένων, από την οποία προκύπτει το προϊόν 1^{ου} επιπέδου, δεν πραγματοποιούνται ραδιομετρικές διορθώσεις με αποτέλεσμα να παραμένει ενσωματωμένο στις τιμές των εικονοστοιχείων το ραδιομετρικό σφάλμα. Έτσι, το αρχικό προϊόν των εικόνων χρειάζεται ραδιομετρική βαθμονόμηση, μετά το πέρας των οποίων, οι τιμές των εικονοστοιχείων θα αντιπροσωπεύουν την τιμή της οπισθοσκέδασης του ραντάρ από την ανακλώμενη επιφάνεια. Οι μη διορθωμένες εικόνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή μόνο ποιοτικών συμπερασμάτων, αλλά για την εξαγωγή ποσοτικών μετρήσεων απαιτούνται ραδιομετρικά βαθμονομημένες εικόνες, τα εικονοστοιχεία των οποίων θα έχουν άμεση συσχέτιση με την οπισθοσκέδαση (ESA, 2015c).

Το λογισμικό του Sentinel είναι σε θέση να πραγματοποιήσει ραδιομετρικές διορθώσεις για πληθώρα προϊόντων δορυφόρων ραντάρ, ανάμεσα στα οποία βρίσκονται όλοι οι τύποι των προϊόντων του Sentinel-1, του ASAR, του ERS και του Radarsat-2.

Για την βαθμονόμηση των εικόνων του Sentinel-1, όλες οι απαραίτητες πληροφορίες βρίσκονται στο αρχικό προϊόν που λαμβάνεται από την ιστοσελίδα της ESA. Ο αλγόριθμος αναιρεί την αρχική βαθμονόμηση και εφαρμόζει μια επιθυμητή, η οποία μπορεί να δώσει τεσσάρων διαφορετικών τύπων αποτελέσματα. Τα δεδομένα για την βαθμονόμηση βρίσκονται σε πίνακες (Look Up Tables - LUTs) στο αρχικό προϊόν και υποστηρίζουν τους τύπους δεδομένων Βήτα (β^0_i), Σίγμα (σ^0_i), Γάμμα (γ_i) ή σε ψηφιακή τιμή (Digital Number (DN)). Η αύξηση των τιμών των εικόνων κατά τη βαθμονόμηση διαφέρει ανάλογα το εύρος και γίνεται με βάση τους πίνακες LUTs, ενώ συμβάλλει καθολικά η απόλυτη σταθερά βαθμονόμησης. Η εξίσωση βαθμονόμησης, για τα προϊόντα του Sentinel-1 έχει ως εξής (ESA, 2015c) :

$$value(i) = \frac{|DN_i|^2}{A_i^2}$$

Όπου, ανάλογα με τον επιλεγόμενο LUT,

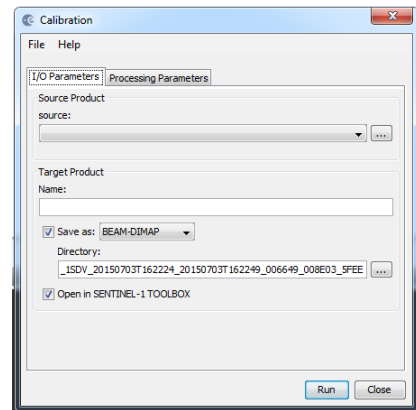
$$value(i): \beta_i^0, \sigma_i^0, \gamma_i^0 \text{ ή } DN_i$$

$$A_i: betaNought(i), \quad sigmaNought(i), \quad gamma(i) \text{ ή } DN(i)$$

*για εικονοστοιχεία που βρίσκονται ενδιάμεσα από τα σημεία των LUTs, χρησιμοποιείται η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής.

Το παράθυρο διαλόγου του λογισμικού για την εφαρμογή της βαθμονόμησης φαίνεται στην Εικόνα 33. Στην καρτέλα I/O Parameters επιλέγονται η τοποθεσία του αρχικού προϊόντος, η τοποθεσία αποθήκευσης του βαθμονομημένου προϊόντος και ο τύπος αποθήκευσης του αρχείου.

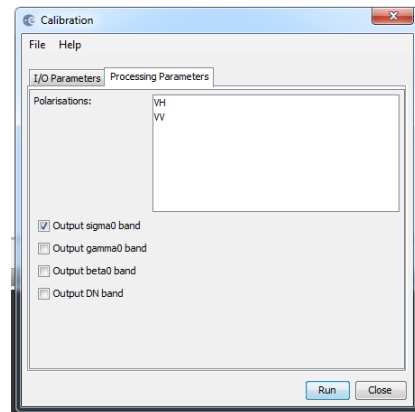
Στην παρούσα ενδιάμεση φάση επιλέγεται ο τύπος BEAM-DIMAP, ο οποίος αποτελεί την προεπιλογή του προγραμματιστικού εργαλείου του Sentinel-1.



Εικόνα 33. Καρτέλα I/O Parameters παραθύρου διαλόγου βαθμονόμηση λογισμικού Sentinel 1 Toolbox

Στην καρτέλα Processing Parameters, όπως φαίνεται στην Εικόνα 34, επιλέγονται οι επιθυμητοί τύποι πόλωσης, και οι επιθυμητοί τύποι δεδομένων των βαθμονομημένων εικόνων.

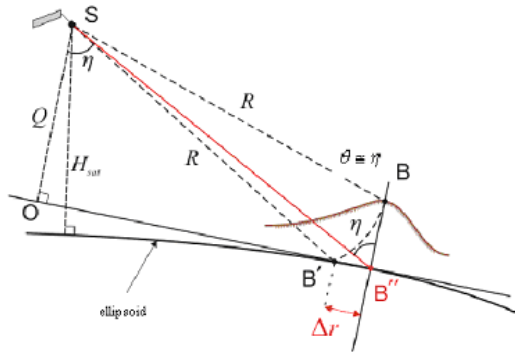
Με την επιλογή “Run” εκκινείται η διαδικασία της βαθμονόμησης.



Εικόνα 34. Παράθυρο διαλόγου βαθμονόμησης περιβάλλοντος λογισμικού Sentinel 1 Toolbox

3.1.3 Τοπογραφική Διόρθωση (Terrain Correction)

Η τοπογραφική διόρθωση είναι απαραίτητη για την απεικόνιση του ανάγλυφου της μελετώμενης περιοχής με ρεαλιστικό τρόπο. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται η μέθοδος Range-Doppler.

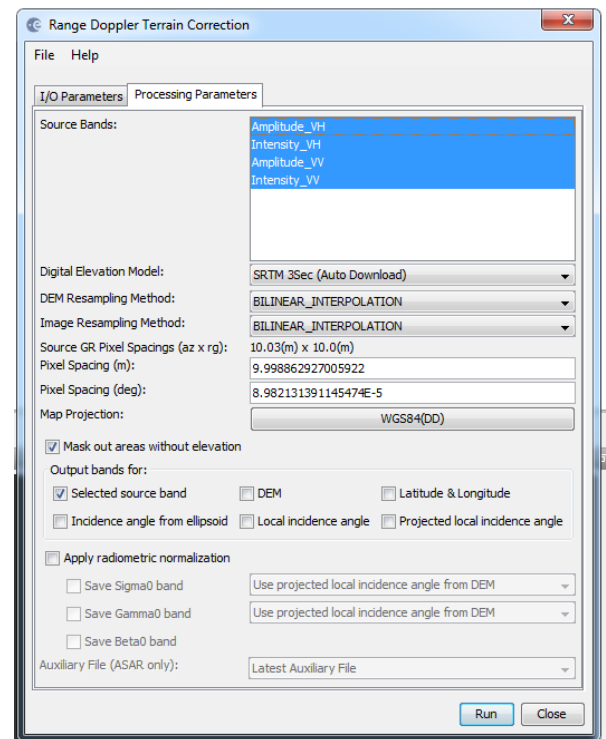


Εικόνα 35 Παραμόρφωση απεικονιζόμενων αντικειμένων από αισθητήρες Radar (ESA, 2015c)

Η διαδικασία είναι σημαντική καθώς, εξαιτίας των ιδιοτήτων του γήινου ανάγλυφου και της κλίσης του δορυφορικού αισθητήρα, οι απεικονιζόμενες αποστάσεις είναι παραμορφωμένες. Το φαινόμενο συναντάται κυρίως στις περιοχές οι οποίες δεν είναι ευθυγραμμισμένες με το σημείο Ναδύρ του αισθητήρα.

Όπως φαίνεται και στην **Error! Reference source not found.** το σημείο B με ανύψωση η πάνω από το ελλειψοειδές απεικονίζεται στο σημείο B' στην εικόνα SAR (Synthetic Aperture Radar), ενώ η πραγματική του θέση είναι η B''. Η μετατόπιση Δr μεταξύ του B' και του B'' αποτελεί το φαινόμενο της τοπογραφικής παραμόρφωσης. (ESA, 2015c)

Η τοπογραφική διόρθωση που πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία βασίζεται στον αλγόριθμο ορθοαναγωγής Range Doppler Terrain Correction. Η λειτουργία Range Doppler Terrain Correction του λογισμικού της ESA εφαρμόζει τη μέθοδο της ορθοαναγωγής έτσι ώστε να γεωκωδικοποιήσει



Εικόνα 36. Καρτέλα Processing Parameters του παραθύρου διαλόγου ορθοαναγωγής Range Doppler Terrain Correction

τις εικόνες SAR (Synthetic Aperture Radar) χρησιμοποιώντας γεωμετρία ραντάρ μονού ψηφιδωτού δύο διαστάσεων (Small & Schubert, 2008). Η λειτουργία αυτή αξιοποιεί, επίσης, τις πληροφορίες του διανύσματος κατάστασης τροχιάς που είναι διαθέσιμο στα μεταδεδομένα των εικόνων, τις χρονικές καταγραφές του ραντάρ, όπως επίσης και τις παραμέτρους μετατροπής κλίσης προς εύρος εδάφους μαζί με τις πληροφορίες αναφοράς DEM (Digital Elevation Model – Μοντέλο Ψηφιακού Αναγλύφου) έτσι ώστε να ανακτήσει την ακριβή γεωτοποθεσία (Εικόνα 36).

Το λογισμικό προς το παρόν υποστηρίζει πλήρως μόνο ψηφιακά ανάγλυφα με γεωγραφικές συντεταγμένες (P_{lat} , P_{lon} , P_h) που συνάδουν με το παγκόσμιο ελλειψοειδές μοντέλο αναφοράς WGS84. Παρ' όλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα Μοντέλα Ψηφιακού Αναγλύφου όπως τα GETASSE30, ASTER, SRTM 3Sec GeoTiff. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο SRTM 3Sec το οποίο ήταν προεπιλεγμένο και δίνεται η επιλογή από το λογισμικό για αυτόματη λήψη.

Διάσταση Εικονοστοιχείου

Η διάσταση του εικονοστοιχείου ορίζεται ως η φυσική επίγεια απόσταση των κέντρων δύο δισδιάστατων εικονοστοιχείων, η οποία ορίζεται με δύο αριθμητικές τιμές. Η πρώτη δηλώνει την διάταξη των γραμμών ή, διαφορετικά, την κάθετη διάταξη σε m που ορίζεται από την απόσταση των δύο κέντρων δύο γειτονικών γραμμών. Αντίστοιχα η δεύτερη τιμή δηλώνει την διάταξη των στηλών ή, αλλιώς, την οριζόντια διάταξη που ορίζεται από την απόσταση δύο γειτονικών στηλών. (Brunold, 2011)

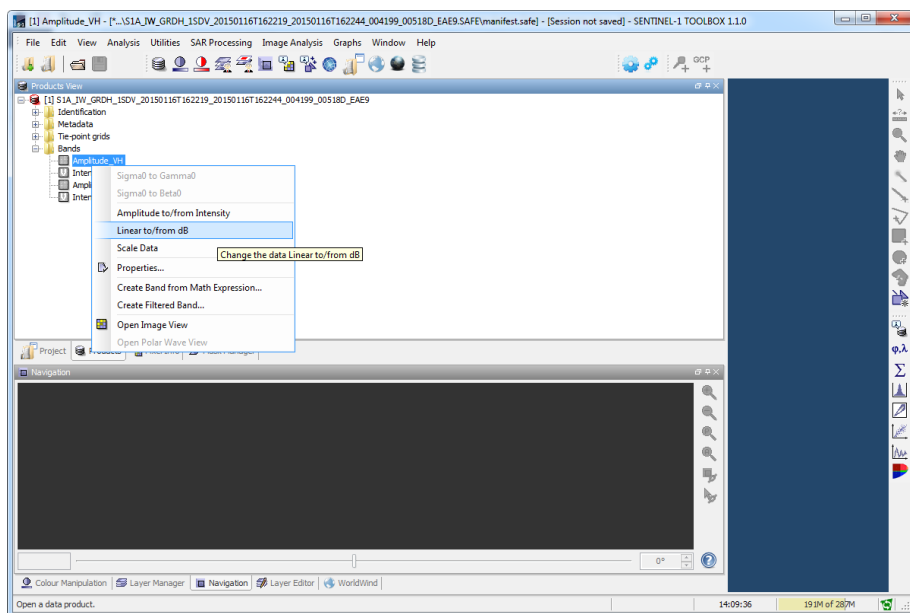
Το λογισμικό παρέχει μια προεπιλογή για την διάσταση του εικονοστοιχείου βασισμένη στα μεταδεδομένα της εικόνας, η οποία στις προς επεξεργασία εικόνες της παρούσας εργασίας δημιούργησε προβλήματα, καθώς ήταν λανθασμένη. Η προεπιλογή ήταν 10x10 m, με την χρήση της οποίας το λογισμικό καθυστερούσε αρκετά την ορθοαναγωγή της εικόνας, ενώ το προϊόν της επεξεργασίας ήταν αδύνατο να φορτωθεί σε άλλα λογισμικά γεωανάλυσης (όπως το ArcGIS). Έτσι,

άλλαξε η διάσταση του εικονοστοιχείου, στην καρτέλα Processing Parameters, σε 25x25 m (ESA, 2015b).

Στην καρτέλα I/O Parameters, επιλέγονται οι θέσεις αποθήκευσης και ο τύπος αρχείων. Στην παρούσα ενδιάμεση φάση επιλέγεται ο τύπος BEAM-DIMAP, ο οποίος αποτελεί την προεπιλογή του προγραμματιστικού εργαλείου του Sentinel-1.

3.1.4 Μετατροπή Κλίμακας και Εξαγωγή Εικόνας

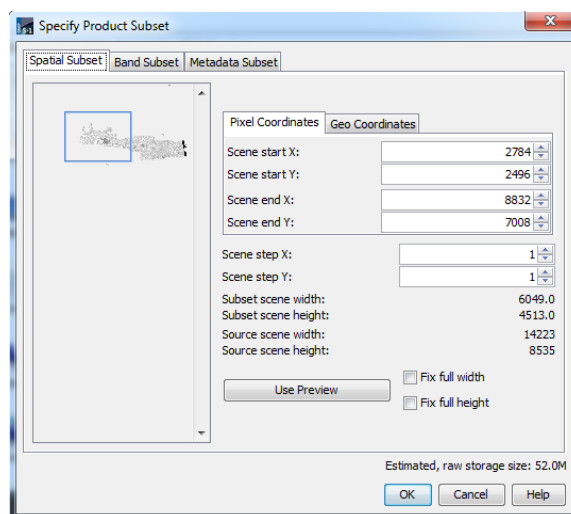
Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο της βαθμονόμησης, οι τιμές των εικονοστοιχείων μιας δορυφορικής εικόνας ανεξάρτητα με τον τύπο του αρχείου αποθήκευσης κωδικοποιούνται με βάση συγκεκριμένες κλίμακες. Στην περίπτωση των εικόνων ραντάρ, αυτές είναι οι *Beta Nought* (β_i^0) που αντιπροσωπεύει την ανακλαστικότητα του ραντάρ στην μοναδιαία επιφάνεια σε κεκλιμένη απόσταση, η σ_i^0 που προκύπτει από την ανακλαστικότητα του ραντάρ προς την μοναδιαία επιφάνεια σε απόσταση εδάφους, η *Gamma Nought* γ_i^0 , η ψηφιακή τιμή εικονοστοιχείου DN_I και η λογαριθμική κλίμακα decibel (dB). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας θα χρησιμοποιηθεί η κλίμακα dB, οπότε είναι απαραίτητο να γίνει και η αντίστοιχη μετατροπή, η οποία πραγματώνεται πολύ εύκολα με την χρήση του Sentinel-1 toolbox, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 37:



Εικόνα 37. Περιβάλλον λογισμικού Sentinel 1 Toolbox, αλλαγή κλίμακας δεδομένων εικόνας από γραμμική κλίμακα σε λογαριθμική (dB)

Επιλέγοντας την λειτουργία μετατροπής Linear to/from dB δημιουργείται ένα καινούριο εικονικό band, όπου οι τιμές των εικονοστοιχείων αντιστοιχούν στην λογαριθμική κλίμακα dB.

Το τελικό στάδιο της επεξεργασίας των εικόνων του δορυφόρου Sentinel-1 είναι η εξαγωγή της εικόνας σε μορφή GeoTiff, η οποία είναι η καταλληλότερη για την μετέπειτα φόρτωση και επεξεργασία της σε τρίτα λογισμικά π.χ Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών όπως το ArcGIS. Η εξαγωγή γίνεται εύκολα με το Sentinel-1 Toolbox, ενώ κατά την προαναφερθείσα διαδικασία εφαρμόζεται περικοπή της εικόνας,



Εικόνα 38. Περιβάλλον λογισμικού Sentinel 1 Toolbox, παράθυρο διαλόγου εξαγωγής και περικοπής εικόνας.

εστιάζοντας δυτικό μέρος της Κρήτης όπου βρίσκεται η περιοχή μελέτης. Η

περικοπή γίνεται για την ελαχιστοποίηση του μεγέθους της εξαγόμενης εικόνας όπως επίσης και για την διευκόλυνση αλλά και την εξοικονόμηση χρόνου (μείωση χρόνου επεξεργασίας-αναμονής) κατά την μετέπειτα επεξεργασία της. Η διαδικασία περικοπής και εξαγωγής παρουσιάζεται στην Εικόνα 38.

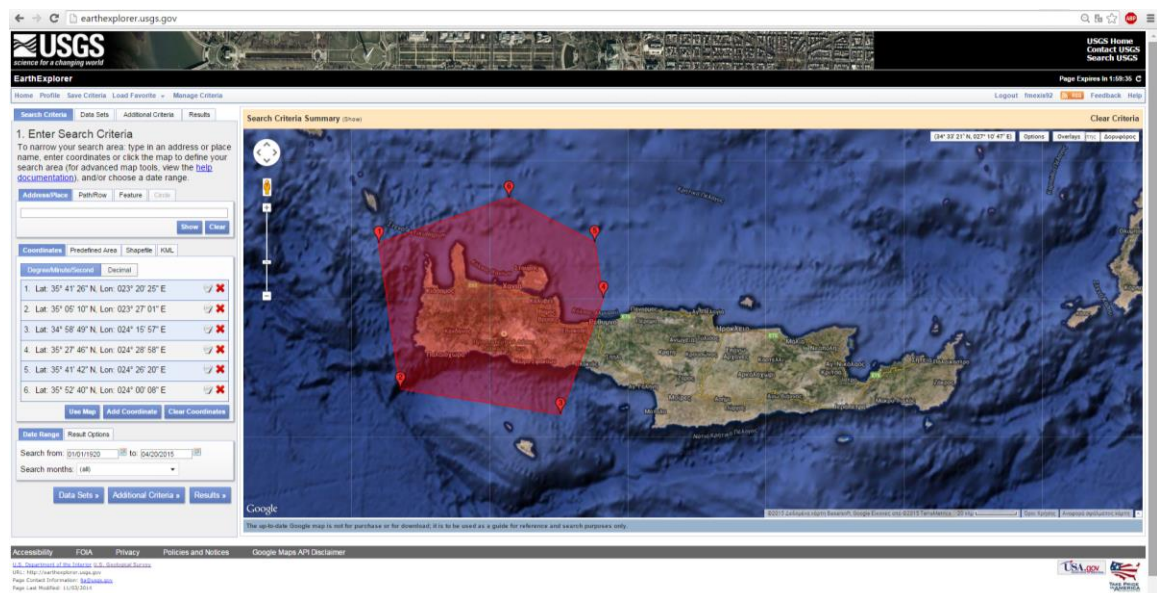
3.2 Προεπεξεργασία εικόνων Landsat 8

Η αρχική λήψη των προϊόντων του δορυφόρου Landsat 8 περιλαμβάνει 12 εικόνες τύπου GeoTiff, μία για το κάθε κανάλι, οι οποίες χρειάζονται συγχώνευση σε ενιαίο αρχείο για την ευκολότερη επεξεργασία τους καθώς και ατμοσφαιρικές διορθώσεις και βαθμονομήσεις έτσι ώστε οι τιμές των εικονοστοιχείων να θεωρούνται αξιόπιστες.

Η λήψη των δορυφορικών εικόνων πραγματοποιείται μέσω της ιστοσελίδας της United States Geological Survey (USGS) με την χρήση της πλατφόρμας Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>).

3.2.1 Λήψη Δορυφορικών Δεδομένων από την εφαρμογή Earth Explorer της USGS (United States Geological Survey)

Αρχικά επιλέγεται η περιοχή αναζήτησης. Η επιλογή γίνεται οριοθετώντας την περιοχή ενδιαφέροντος με σημεία, ενώ ταυτόχρονα η εφαρμογή επισημαίνει οριοθετημένη περιοχή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 39.

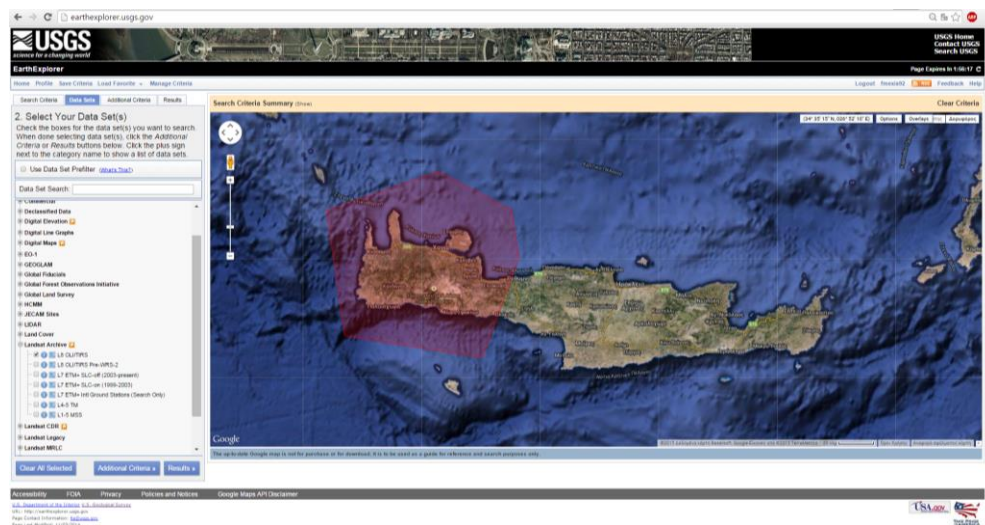


Εικόνα 39. Οριοθέτηση περιοχής αναζήτησης για την αναζήτηση δορυφορικών εικόνων Landsat 8 από την εφαρμογή Earth Explorer

Κατά την παραπάνω διαδικασία, τα σημεία οριοθέτησης εισάγονται στην ενότητα Coordinates της καρτέλας Search Criteria.

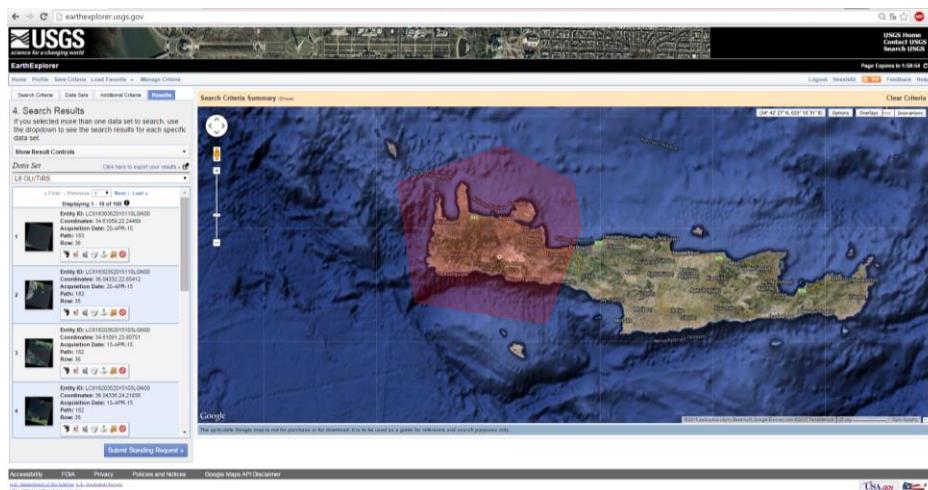
Στη συνέχεια, στην ενότητα Date Range της ίδιας καρτέλας προσδιορίζεται το χρονικό εύρος της αναζήτησης.

Επιλέγεται το πλήκτρο Data Sets και εμφανίζεται η αντίστοιχη καρτέλα, όπου επιλέγεται το Landsat Archive και έπειτα, στο συγχωνευμένο μενού, μαρκάρεται το L8 OLI/TIRS που αντιστοιχεί στα δεδομένα του Landsat 8 (Εικόνα 40).



Εικόνα 40. Επιλογή δεδομένων προς λήψη όπως φαίνεται στο αριστερό παράθυρο της σ εφαρμογής Earth Explorer

Με το πλήκτρο Results ανοίγει η τελευταία καρτέλα όπου εμφανίζονται οι διαθέσιμες δορυφορικές εικόνες.



Εικόνα 41. Διαθέσιμες δορυφορικές εικόνες Landsat 8 προς λήψη στην εφαρμογή Earth Explorer

Η κάθε εικόνα συνοδεύεται από μία “εργαλειοθήκη” με την χρήση της οποίας ο χρήστης μπορεί να προβάλλει την εικόνα πάνω στο χάρτη, να ανοίξει την εικόνα σε αναδυόμενο παράθυρο, και τέλος να την κατεβάσει στην μορφή που επιθυμεί (Εικόνα 41).

Το αρχικό προϊόν των δορυφορικών εικόνων αποτελείται από 12 εικόνες μορφής Tiff, οι οποίες ενσωματώνουν την πληροφορία των εικονοστοιχείων σε κωδικοποίηση ακέραιου αριθμού 16 bit (Unsigned 16-bit), ενώ η γεωαναφορά τους είναι σύμφωνα με το σύστημα WGS 84.

Οι 12 διαφορετικές εικόνες Tiff αποτελούν αποτέλεσμα της ίδιας δορυφορικής λήψης, η κάθε μία όμως αντιπροσωπεύει ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (band). Ο διαχωρισμός των ζωνών συχνοτήτων καθορίζεται ως εξής:

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) Launched February 11, 2013	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
	Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
	Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
	Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
	Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
	Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100 * (30)
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100 * (30)

Εικόνα 42. Εύρος συχνοτήτων, είδος χρήσης και χωρική ανάλυση των καναλιών του Landsat 8 OLI & TIRS

Όπως φαίνεται και παραπάνω, το αρχικό προϊόν αποτελείται από 9 φασματικές ζώνες με χωρική ανάλυση 30 m για τις ζώνες 1-7 & 9. Η 1^η ζώνη του υπερ-μπλε (ultra-blue) είναι κατάλληλη για παράκτιες μελέτες και την μελέτη του θαλάσσιου αεροζόλ, ενώ η 9^η ζώνη προσφέρεται για τον εντοπισμό σύννεφων – νεφελωμάτων). Η επιφάνεια που απεικονίζεται στην κάθε δορυφορική λήψη έχει, κατά προσέγγιση, έκταση 170 km κάθετα και 183 km οριζόντια (United States Geological Survey, 2014).

Επίσης, παρέχονται και τα κανάλια TIRS (Termal Infrared Sensor) τα οποία είναι χρήσιμα για την εκτίμηση της θερμοκρασίας του εδάφους χρησιμοποιώντας κβαντική τεχνολογία (QWIPs – Quantum Well Infrared Photodetectors). Η τεχνολογία TIRS εντοπίζει την ακτινοβολία μεγάλου μήκους που εκπέμπεται από την γήινη επιφάνεια και η πυκνότητα της οποίας σχετίζεται άμεσα από την θερμοκρασία του εδάφους (NASA, 2015). Το μειονέκτημα των καναλιών TIRS είναι ότι έχουν πολύ μικρή χωρική ανάλυση (Εικόνα 42).

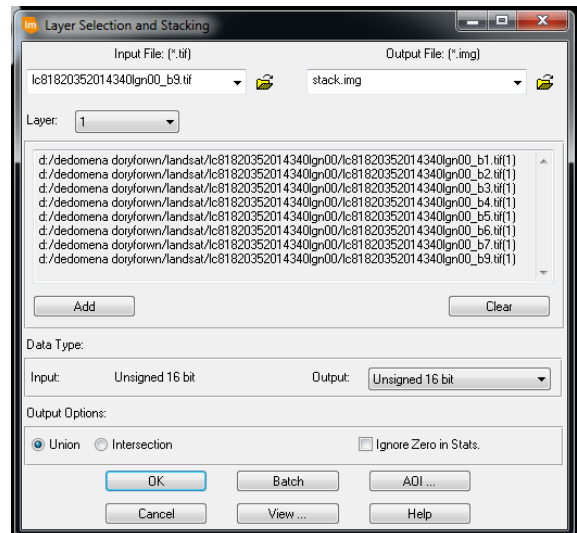
3.2.2 Συγχώνευση Καναλιών

Το αρχικό στάδιο επεξεργασίας περιλαμβάνει την συγχώνευση των εικόνων Tiff σε ένα αρχείο τύπου .img έτσι ώστε να διευκολύνεται η φόρτωση της εικόνας

σε διαφορετικά προγράμματα επεξεργασίας (ERDAS Imagine, ArcGIS) καθώς η επεξεργασία και η συσχέτιση των ζωνών (bands) μεταξύ τους. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η δημιουργία του δείκτη βλάστησης (NDVI), που περιγράφεται αναλυτικά σε παρακάτω κεφάλαιο.

Για την πραγματοποίηση της συγχώνευσης αρκεί το εργαλείο του λογισμικού ERDAS Imagine με την ονομασία Layer Stack. Το προαναφερθέν εργαλείο είναι κατάλληλο για την συγχώνευση διαφόρων εικόνων-στρωμάτων (Layer) σε ένα αρχείο επιθυμητού τύπου.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 43, στο παράθυρο διαλόγου του εργαλείου Layer Stack, αρκεί να φορτώσουμε τις εικόνες για την κάθε ζώνη (band) και στη συνέχεια να επιλέξουμε τον τύπο και την θέση αποθήκευσης του παραγόμενου συγχωνευμένου αρχείου.



Εικόνα 43. Παράθυρο διαλόγου εργαλείου συγχώνευσης εικόνων του λογισμικού Erdas Imagine

Στο παράθυρο διαλόγου δίνεται η δυνατότητα για ορισμό περαιτέρω ρυθμίσεων, αλλά στο παρόν στάδιο οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις είναι κατάλληλες. Οι εικόνες είναι κωδικοποιημένες σε μορφή ακέραιου δεκαδικού 16bit (Unsigned 16-bit) και αποθηκεύονται στο συγχωνευμένο αρχείο ως έχουν.

3.2.3 Ατμοσφαιρική Διόρθωση

Οι δορυφορικές εικόνες παθητικής τηλεπισκόπησης καταγράφουν την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία (ή εκπεμπόμενη αν πρόκειται για το εύρος του θερμικού υπερύθρου) που συγκεντρώνεται συνολικά στον δορυφόρο αισθητήρα. Η ακτινοβολία όμως που φθάνει στο ραδιόμετρο δεν αντιπροσωπεύει μόνο την ανακλώμενη ακτινοβολία λόγω της γήινης εδαφικής επιφάνειας αλλά αποτελεί προϊόν ατμοσφαιρικών ανακλάσεων και σκεδάσεων (Χρυσουλάκης, 2011). Είναι

λοιπόν απαραίτητο η δορυφορική εικόνα να υποστεί διορθώσεις, έτσι ώστε να αφαιρεθούν οι ατμοσφαιρικές παρεμβολές και οι τιμές των εικονοστοιχείων να γίνουν αντιπροσωπευτικές της ανακλαστικότητας τους εδάφους.

Το αρχικό προϊόν του Landsat 8 είναι κβαντοποιημένο και βαθμονομημένο, αλλά δεν έχει υποστεί ατμοσφαιρική διόρθωση. Η USGS (United States Geological Survey) προβλέπει συγκεκριμένη μεθοδολογία για την ατμοσφαιρική διόρθωση των εικόνων του. Οι υπολογισμοί που γίνονται στις τιμές των εικονοστοιχείων, διορθώνουν και μετατρέπουν την εικόνα σε TOA Reflectance (Top Of the Atmosphere Reflectance) αφαιρώντας τις ατμοσφαιρικές ανακλάσεις ενώ ταυτόχρονα αλλάζουν την κλίμακα των τιμών των εικονοστοιχείων από ακέραιο 16 bit (Unsigned integer 16 bit) σε δεκαδικό διπλής ακρίβειας (Double-precision floating-point format). Οι συντελεστές για την εφαρμογή των διορθωτικών εξισώσεων συνοδεύουν το αρχικό δορυφορικό προϊόν και περιέχουν τους απαραίτητους συντελεστές διόρθωσης, πληροφορίες σχετικά με την ηλιακή ανύψωση για την περιοχή λήψης κ.α. Η εξίσωση έχει ως εξής (United States Geological Survey, 2015):

$$\rho\lambda' = M_p \cdot Q_{cal} + A_p$$

Όπου

$\rho\lambda'$ = η ανακλαστικότητα στο ψηλότερο σημείο της ατμόσφαιρας (TOA), χωρίς διόρθωση για την ηλιακή γωνία.

M_p = συντελεστής πολλαπλασιασμού. Η τιμή του βρίσκεται στο αρχείο μεταδεδομένων της δορυφορικής εικόνας ως REFLECTANCE_MULT_BAND_x, όπου x ο αριθμός της μπάντας.

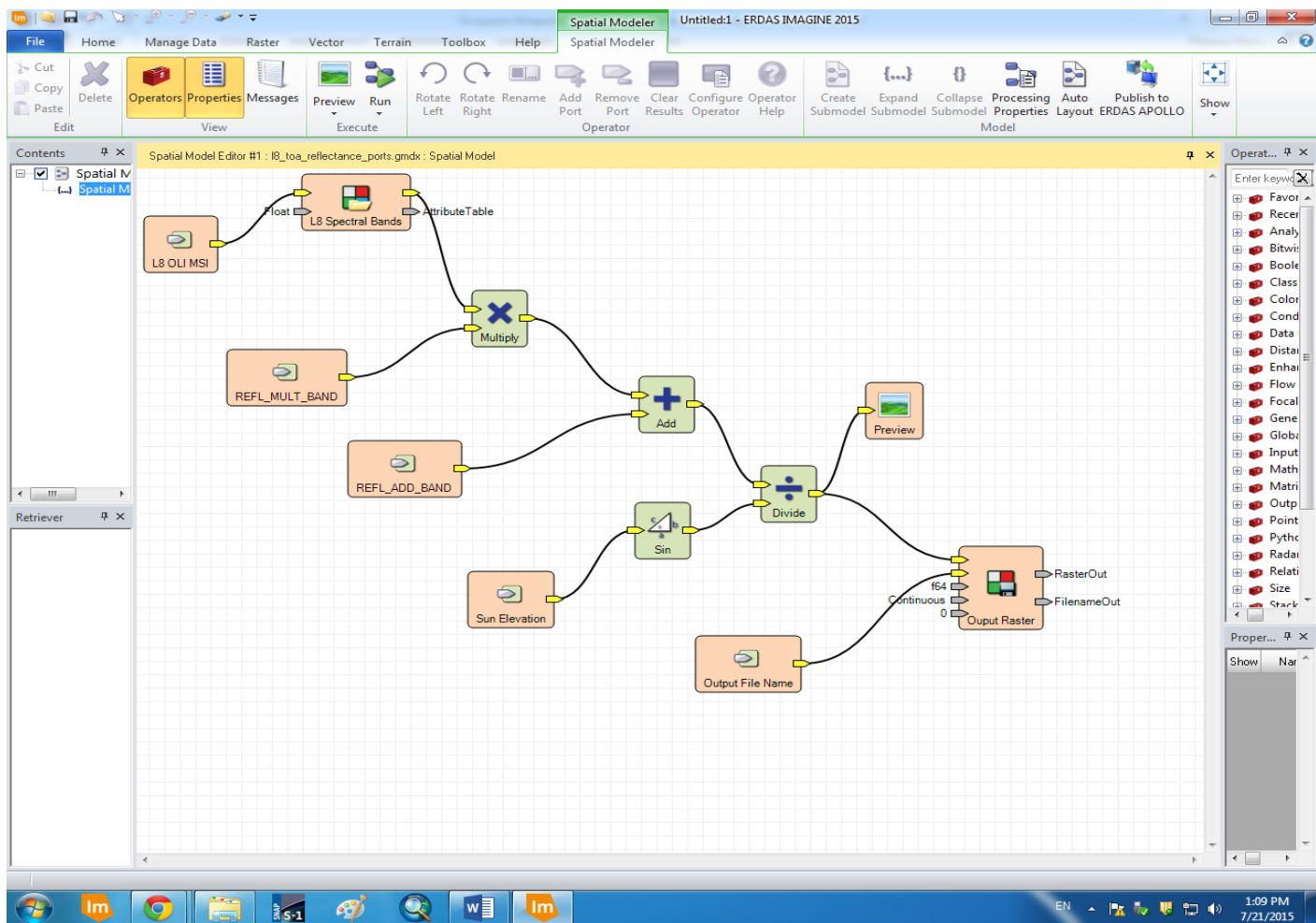
A_p = προσθετικός συντελεστής. Η τιμή του βρίσκεται στο αρχείο μεταδεδομένων ως REFLECTANCE_ADD_BAND_x, όπου x ο αριθμός της μπάντας.

Q_{cal} = Η κβαντοποιημένη και βαθμονομημένη ψηφιακή τιμή (DN) του κάθε εικονοστοιχείου της δορυφορικής εικόνας.

Η ατμοσφαιρική διόρθωση έγινε με την χρήση του λογισμικού επεξεργασίας δορυφορικών δεδομένων ERDAS Imagine. Το λογισμικό διαθέτει δυνατότητα χρήσης αλγορίθμων για την επεξεργασία εικόνων, οι οποίοι εκτελούν σειριακά προκαθορισμένες πράξεις, εντολές και λογικές συνθήκες στις τιμές των εικονοστοιχείων. Ο αλγόριθμος γράφεται στο περιβάλλον του λογισμικού και διαθέτει δύο διαφορετικά εργαλεία για τον σκοπό αυτό. Αυτά είναι το Spatial Model Editor και το Model Maker. Για συνήθεις διαδικασίες επεξεργασίας εικόνων υπάρχουν έτοιμα μοντέλα στο διαδίκτυο, σε online βιβλιοθήκες από ερευνητές που τα διανέμουν δωρεάν. Τα περισσότερα μοντέλα στο διαδίκτυο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ελεύθερα καθώς και να τροποποιηθούν για τις ανάγκες της εκάστοτε μελέτης.

Για την ατμοσφαιρική διόρθωση χρησιμοποιήθηκε μοντέλο από την ιστοσελίδα της εταιρίας γεωπληροφορικής Sterling Geo, με έδρα την Αγγλία. Η εταιρία ασχολείται με την γεωανάλυση και την τηλεπισκόπηση, ενώ στην ιστοσελίδα της (<http://www.sterlinggeo.com/spatial-modeler-library-index/>) προσφέρει δωρεάν μοντέλα που εκτελούν βασικές διεργασίες σε δορυφορικές εικόνες με την χρήση του λογισμικού ERDAS Imagine (Sterling Power Group Ltd, 2015).

Φορτώνοντας το μοντέλο στο λογισμικό γίνεται οπτική απεικόνιση του αλγορίθμου σε διάγραμμα ροής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 44.



Εικόνα 44. Περιβάλλον λογισμικού Erdas Image, διάγραμμα ροής αλγορίθμου εφαρμογής ατμοσφαιρικής διόρθωσης σε δορυφορικό προϊόν Landsat 8.

Με την εκκίνηση του αλγορίθμου, ζητούνται οι τιμές των συντελεστών για την εκτέλεση των πράξεων, η ηλιακή ανύψωση καθώς και οι θέσεις του πρωτότυπου αλλά και του παραγόμενου αρχείου.

Με την ολοκλήρωση του αλγορίθμου δημιουργείται νέο αρχείο που περιέχει την διορθωμένη εικόνα.

3.2.4 Μέθοδος αφαίρεσης σκοτεινού σημείου (Dark Object Subtraction- DOS)

Έπειτα από την ατμοσφαιρική διόρθωση απαιτείται άλλη μία μέθοδος βελτίωσης των δορυφορικών εικόνων, η μέθοδος αφαίρεσης σκοτεινού σημείου. Η αφαίρεση σκοτεινού σημείου είναι μία συνηθισμένη διαδικασία και απαραίτητο

στάδιο προεπεξεργασίας δορυφορικών εικόνων, καθώς η ατμοσφαιρική διόρθωση είναι δυνατόν να μην καταφέρει να αφαιρέσει εξ ολοκλήρου τις ατμοσφαιρικές παρεμβολές. Επίσης, η αφαίρεση σκοτεινού σημείου λειτουργεί με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να είναι εξειδικευμένη για την συγκεκριμένη δορυφορική λήψη, αφαιρώντας οποιεσδήποτε αντανάκλασεις που υπάρχουν στο πλάνο.

Η λογική της διαδικασίας βασίζεται στην βασική αρχή της τηλεπισκοπήσης με βάση την οποία η αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από μία υδάτινη μάζα θα πρέπει να είναι μηδέν, καθώς στο σημείο αυτό συμβαίνει πλήρης απορρόφηση.

Έτσι, για κάθε δορυφορική εικόνα και για κάθε ένα από τα 9 band γίνεται έλεγχος έτσι ώστε να βρεθεί η ελάχιστη τιμή των εικονοστοιχείων πάνω από υδάτινες μάζες. Η τιμή αυτή θεωρείται ως σφάλμα και αφαιρείται από όλες τις εικόνες. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την μέθοδο DOS δεν λαμβάνεται υπόψιν η θάλασσα, καθώς πάνω από την επιφάνεια της συμβαίνουν φαινόμενα κυματισμών και σύνθετων ανακλάσεων που μεταβάλλουν δυσανάλογα και υπερβολικά τις τιμές των εικονοστοιχείων. Με λίγα λόγια, η θαλάσσια επιφάνεια δεν αποτελεί κατάλληλο κριτήριο για την εν λόγω διόρθωση, οπότε η διαδικασία γίνεται με βάση τις τιμές των εικονοστοιχείων των λιμνών.

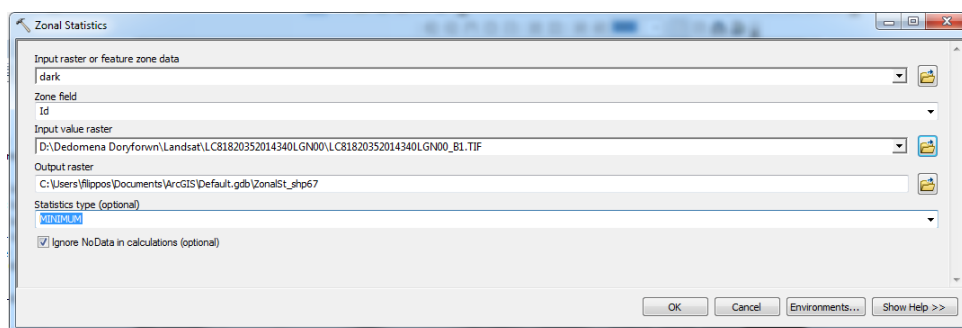
Για την εύρεση της ελάχιστης τιμής των εικονοστοιχείων πάνω από τις λίμνες χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcGIS. Αρχικά δημιουργήθηκε μία μάσκα για τις λίμνες που θα χρησιμοποιηθούν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 45.



Εικόνα 45. Μάσκες λίμνης στο λογισμικό ArcMap

Οι λίμνες που συμπεριλήφθηκαν στην διαδικασία είναι η λίμνη της Αγκιάς, η λίμνη του Κουρνά, η τεχνητή λίμνη του Φράγματος των ποταμών του Αμαρίου καθώς και η τεχνητή λίμνη της Φανερωμένης κοντά στον Ζαρό Ηρακλείου.

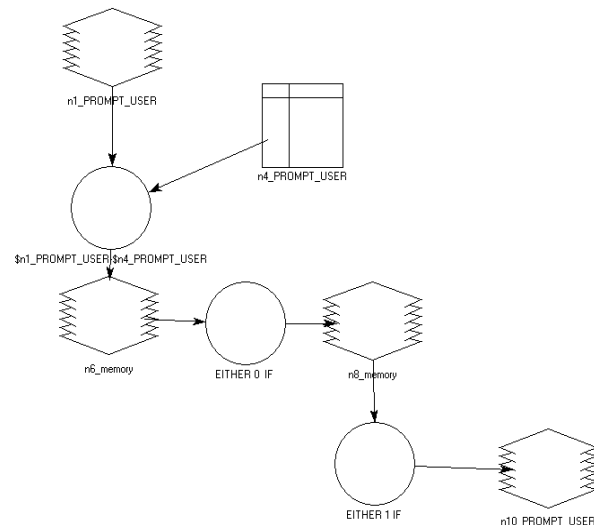
Η ελάχιστη τιμή των εικονοστοιχείων βρέθηκε με την χρήση του εργαλείου Zonal Statistics του ArcGIS. Το παράθυρο διαλόγου φαίνεται στην Εικόνα 46.



Εικόνα 46. Παράθυρο διαλόγου εργαλείου Zonal Statistics του λογισμικού ArcMap

Στο παράθυρο επιλέγεται η μάσκα εντός της οποίας θα πραγματοποιηθεί η διαδικασία, η εικόνα της οποίας οι τιμές θα ελεγχθούν καθώς και η στατιστική λειτουργία, που στην περίπτωση μας είναι η εύρεση της ελάχιστης τιμής. Η επεξεργασία πρέπει να επαναληφθεί για κάθε ένα από τα band-layers της εικόνας.

Στην συνέχεια ακολουθεί η αφαίρεση της τιμής που βρέθηκε με την παραπάνω διαδικασία που θα πραγματοποιηθεί με την χρήση μοντέλου στο λογισμικό ERDAS Imagine. Ο αλγόριθμος γράφτηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και αποτελεί μια απλή διαδικασία αφαίρεσης της ελάχιστης τιμής του κάθε band από την αντίστοιχη δορυφορική εικόνα, ενσωματώνοντας παράλληλα μια λογική συνθήκη για την οριοθέτηση των παραγόμενων τιμών εντός του διαστήματος $[0,1]$.



Εικόνα 47. Διάγραμμα ροής του αλγόριθμου για την μέθοδο αφαίρεσης σκοτεινού σημείου

Η λογική συνθήκη βοηθά στην εξομάλυνση των εικόνων, έτσι ώστε να είναι ευκολότερη η μετέπειτα επεξεργασία τους, καθώς σε αρκετά σημεία οι τιμές που προκύπτουν μετά την αφαίρεση μπορεί να είναι αρνητικές ή μεγαλύτερες της μονάδας. Το γεγονός αυτό δημιουργεί προβλήματα στον υπολογισμό του δείκτη βλάστησης, αλλά και στην οπτική απεικόνιση των εικόνων, ενώ οι τιμές που εξομαλύνονται δεν καταστρέφουν χρήσιμα δεδομένα καθώς συναντώνται κυρίως πάνω από την θαλάσσια επιφάνεια ή σε σημεία έντονου νέφους ή χιονιού.

Στο διάγραμμα ροής (Εικόνα 47) παρουσιάζονται οι υπολογισμοί και οι συνθήκες που λαμβάνουν χώρα για την αφαίρεση της ελάχιστης τιμής από την εικόνα. Όπως φαίνεται, το πρώτο βήμα του αλγορίθμου είναι να επιλεγεί το αρχείο εισόδου, καθώς και ο πίνακας που περιέχει τις τιμές που χρειάζονται να

αφαιρεθούν. Ο πίνακας έχει διάσταση 1x8 έτσι ώστε να περιέχει μία τιμή προς αφαίρεση για κάθε κανάλι της δορυφορικής εικόνας.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η πράξη της αφαίρεσης, όπου αφαιρείται η ελάχιστη τιμή από κάθε κανάλι που βρέθηκε με την βοήθεια του ArcMap στα προηγούμενα βήματα. Στη συνέχεια εκτελούνται δύο συνθήκες, έτσι ώστε οι τιμές τις εικόνες να μην είναι αρνητικές, ούτε να υπερβαίνουν την μονάδα.

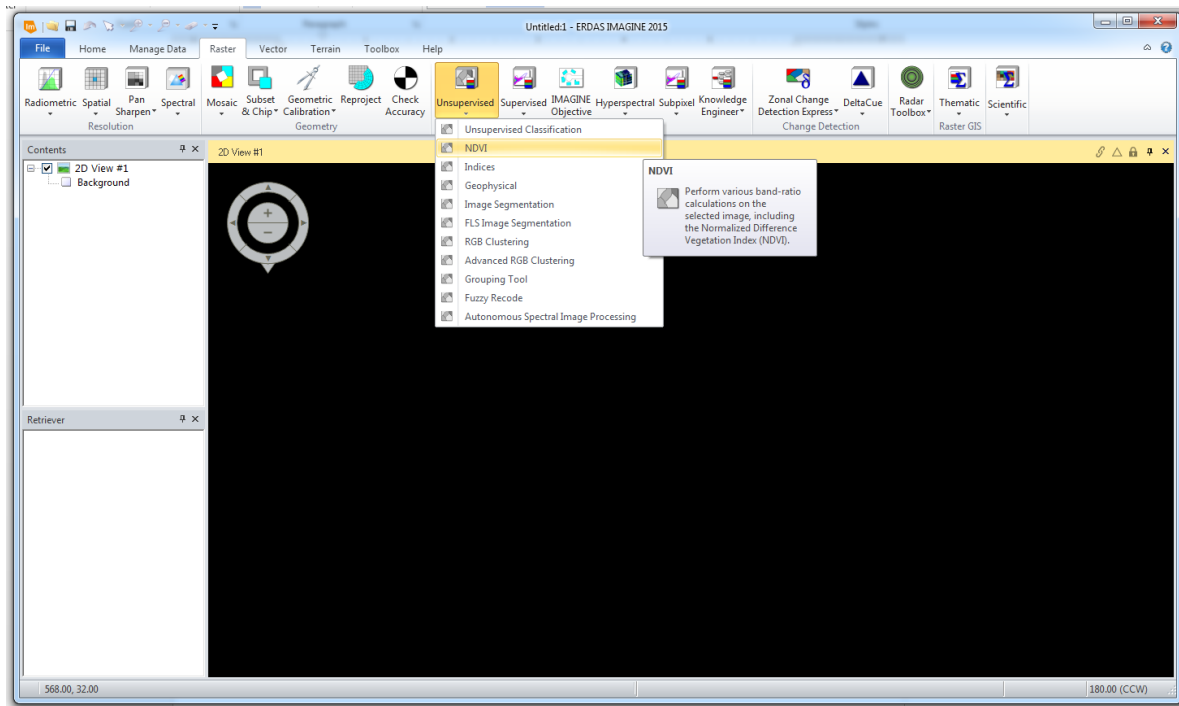
3.3 Υπολογισμός δεικτών βλάστησης

Με την χρήση των χαρτών κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί ποσοτική εκτίμηση της φυτικής βιομάζας σε μία δεδομένη περιοχή ή σημείο. Γνωρίζοντας την συμπεριφορά της βλάστησης στο φάσμα του ορατού ερυθρού (RED) και στο κοντινό υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Near Infrared- NIR) γίνεται συνδυασμός των φασματικών καναλιών και υπολογίζεται μία τιμή για το κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας. Αυτή η παραγόμενη τιμή δείχνει το βαθμό και τη ποσότητα της υγιούς βλάστησης. (Καρτάλης & Φείδας, 2006)

Δύο βασικοί δείκτες βλάστησης είναι ο λόγος δείκτη βλάστησης ($Ratio = \frac{NIR}{RED}$) και ο NDVI ($NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$). Ο λόγος δείκτη βλάστησης είναι η απλούστερη μορφή και στηρίζεται στην αντίθεση μεταξύ των ζωνών του ερυθρού και του εγγύ υπέρυθρου για τα εικονοστοιχεία που αντιστοιχούν σε βλάστηση, με υψηλές τιμές για τον δείκτη από τον συνδυασμό χαμηλής τιμής ανάκλασης για το ερυθρό και υψηλής για το κοντινό υπέρυθρο. (Τζωρτζάκης, 2014) Ο NDVI είναι ο πλέον κοινός δείκτης με πολύ καλά αποτελέσματα, έχει την δυνατότητα να ελαχιστοποιεί την επίδραση της τοπογραφίας. Επιπλέον η κλίμακα των τιμών έχει την επιθυμητή μορφή -1 έως 1 με το 0 να είναι το όριο για την μη βλάστηση. Επίσης, ο δείκτης βλάστησης είναι χρήσιμος για τον προσδιορισμό της κατάστασης της βλάστησης και παρουσιάζει τις μεταβολές και την εκτίμηση της βιομάζας. (Μερτίκας, 2006; Συλλαίος, 2000)

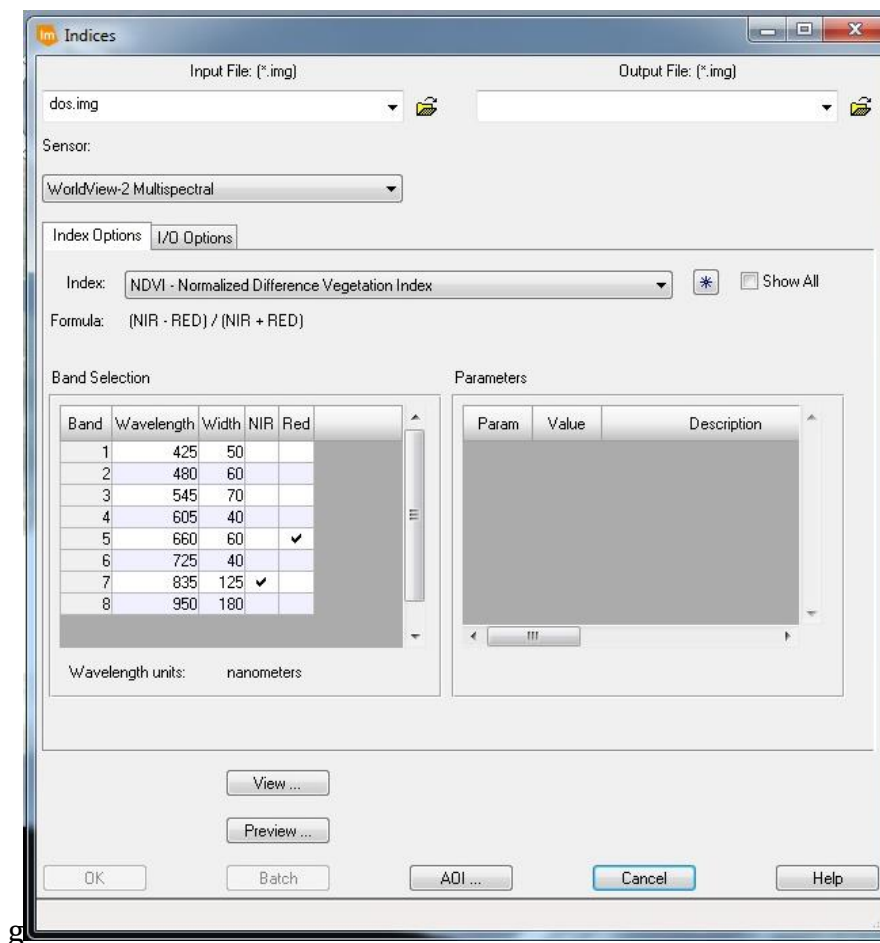
Οι χάρτες δείκτων βλάστησης κατασκευάζονται εύκολα με τη βοήθεια λογισμικών GIS και ανάλυσης δορυφορικών εικόνων. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ERDAS Imagine.

Το εν λόγω λογισμικό παρέχει ένα εργαλείο, στην καρτέλα Raster, στη εργαλειοθήκη Unsupervised Classification με το όνομα NDVI στο οποίο εισάγονται τα δεδομένα (Rasters), οι ρυθμίσεις για το κάθε κανάλι και στη συνέχεια γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί.



Εικόνα 48. Εργαλείο υπολογισμού NDVI στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού ERDAS Imagine

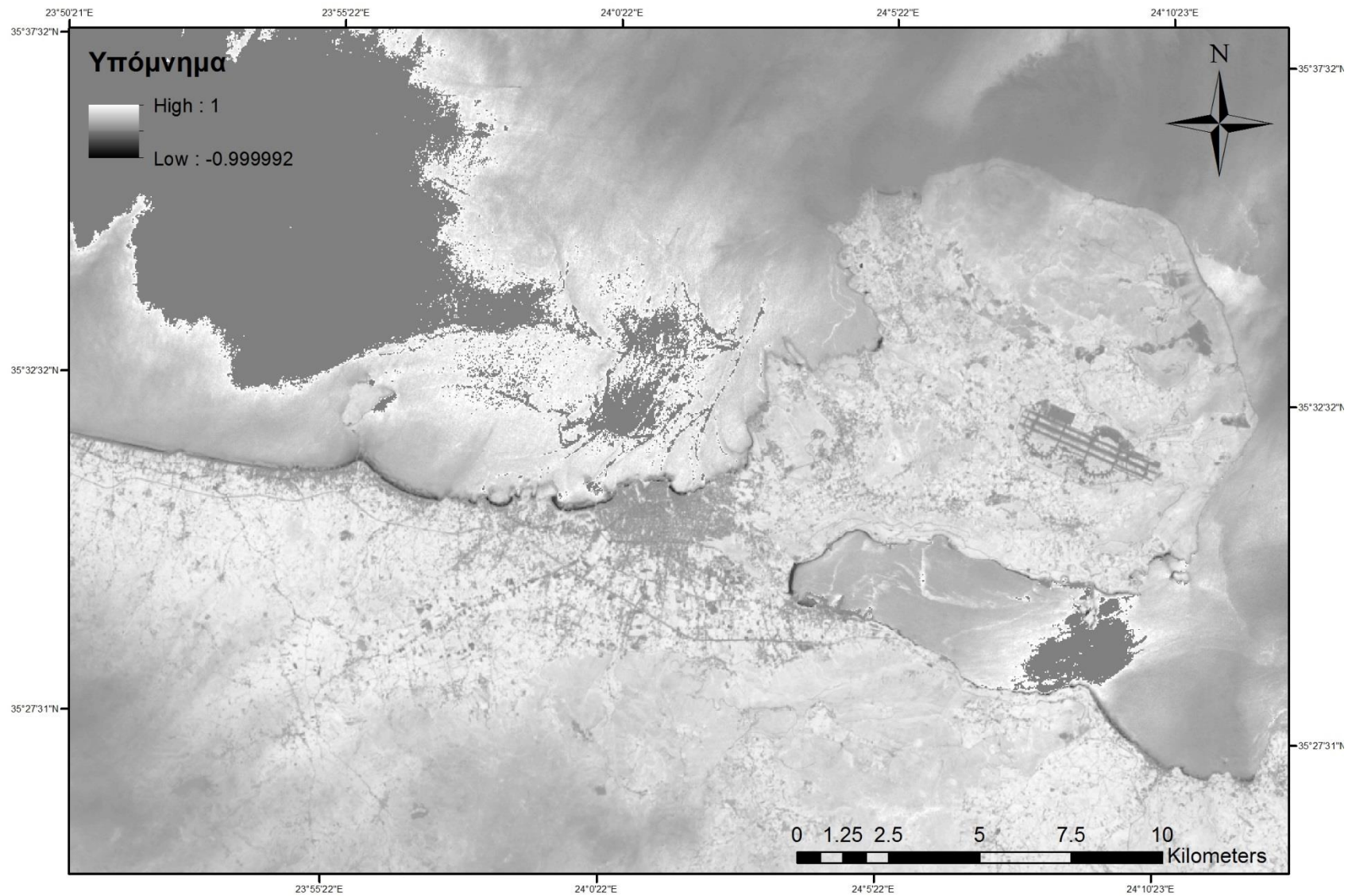
Στο ανδυόμενο παράθυρο με τον τίτλο Indices («δείκτες», Εικόνα 48) επιλέγεται το αρχείο εισόδου, το οποίο είναι το αρχείο DOS (Dark Object Substraction) που αποτελεί το βαθμονομημένο και ατμοσφαιρικά διορθωμένο πολυφασματικό αρχείο του δορυφόρου Landsat 8. Στη συνέχεια επιλέγεται το αρχείο εξόδου, το οποίο συνηθίζεται να φέρει την ονομασία “NDVI.img”, καθώς επίσης προσδιορίζεται το ποια κανάλια του πολυφασματικού αρχείου εισόδου αντιστοιχούν στο NIR (Near Infrared) και το RED, που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό.



Εικόνα 49. Παράθυρο διαλόγου Indices για τον υπολογισμό του NDVI στο ERDAS Imagine

Στη συνέχεια γίνεται εκκίνηση του αλγορίθμου, ο οποίος εκτελεί τις πράξεις και εγγράφει τα αποτελέσματα στο αρχείο εξόδου (Εικόνα 49).

Το παραγόμενο προϊόν , όπως φαίνεται στην Εικόνα 50 παρουσιάζει τα σημεία στα οποία επικρατεί υψηλή / υγιής βλάστηση με τόνους χρωμάτων κοντά στο λευκό (τιμές εικονοστοιχείων κοντά στο 1), ενώ τα σημεία χωρίς βλάστηση, όπως π.χ. ασφαλτοστρωμένες εκτάσεις και κτίρια, εμφανίζονται σε τόνους κοντά στο μαύρο (τιμές κοντά στο -1). Αξίζει να σημειωθεί ότι η θαλάσσια επιφάνεια δεν αντιπροσωπεύει αξιόπιστες τιμές, καθώς η εναλλαγή κυματισμών, ήρεμης θάλασσας και η μεταβλητότητα του βάθους δημιουργούν ιδιαίτερα φαινόμενα αντανάκλασης, σκέδασης και απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 50



Εικόνα 50. Χάρτης Κανονικοποιημένου Δείκτη Βλάστησης

4 Στατιστική ανάλυση

Στο επόμενο βήμα πραγματοποιήθηκε η στατιστική ανάλυση των επίγειων δεδομένων υγρασίας με τις τιμές οπισθοσκέδασης των εικόνων ραντάρ και τον δείκτη βλάστησης NDVI του δορυφόρου Landsat 8. Για να βρεθεί αν υπάρχει συναρτησιακή σχέση μεταξύ εξαρτημένης και ανεξάρτητης μεταβλητής εφαρμόστηκε παλινδρόμηση με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η ανάλυση παλινδρόμησης πραγματοποιήθηκε θεωρώντας την υγρασία του εδάφους ως εξαρτημένη μεταβλητή και την τιμή της οπισθοσκέδασης του ραντάρ ως ανεξάρτητη.

Στη συνέχεια, εξετάστηκε η επίδραση της βλάστησης στην αποκρισιμότητα της οπισθοσκέδασης του radar με την βοήθεια των χαρτών δεικτών βλάστησης και της μεθόδους της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν η οπισθοσκέδαση από τον δορυφόρο Sentinel 1 και οι τιμές του δείκτη NDVI ως ανεξάρτητες μεταβλητές την πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση με εξαρτώμενη μεταβλητή την υγρασία του εδάφους.

Επιπλέον, εξετάσθηκε η συναρτησιακή αλλά μη γραμμική συσχέτιση της εδαφικής υγρασίας με τις τιμές των δορυφορικών προϊόντων δημιουργώντας και εκπαιδύοντας τεχνητό νευρωνικό δίκτυο σε περιβάλλον Matlab. Οι μεταβλητές που εισήχθησαν στο μοντέλο είναι οι ίδιες με εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν για τις παλινδρομήσεις.

4.1 Γραμμική Παλινδρόμηση

Η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων, ή διαφορετικά, ευθεία παλινδρόμησης είναι της μορφής (Αδαμόπουλος, Δαμιανού, & Σβέρκος, 1999):

$$\hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}x$$

Όπου:

$$\hat{\beta} = \frac{v \sum_{i=1}^v x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^v x_i \right) \left(\sum_{i=1}^v y_i \right)}{v \sum_{i=1}^v x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^v x_i \right)^2}$$

$$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta} \bar{x}$$

και

$$\bar{y} = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v y_i, \quad \bar{x} = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v x_i.$$

με $v = \text{το πλήθος των παρατηρήσεων}$

$x_i = \text{οι παρατηρήσεις της ανεξάρτητης μεταβλητής}$

$y_i = \text{οι παρατηρήσεις της εξαρτημένης μεταβλητής}$

4.2 Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση

Η γραμμική παλινδρόμηση έχει ως σκοπό την κατασκευή ενός μοντέλου που να περιγράφει ικανοποιητικά τη σχέση μεταξύ μιας εξαρτημένης συνεχούς μεταβλητής Y και μίας ή περισσότερων συνεχών ανεξάρτητων μεταβλητών X_1, X_2, \dots, X_p . Στην περίπτωση που η σχέση της εξαρτημένης μεταβλητής είναι γραμμική συνάρτηση των παραμέτρων (ανεξάρτητων μεταβλητών) τότε η περιγραφή της σχέσης αυτής γίνεται βάση ενός γραμμικού μοντέλου. (Δημητροπουλάκης, 2013)

Η σχέση σύνδεση της εξαρτημένης μεταβλητής με τα ανεξάρτητα μεγέθη θα είναι γενικά της μορφής (Δημητροπουλάκης, 2013):

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_3 X_3$$

4.3 Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης της παλινδρόμησης

Η αξιολόγηση της παλινδρόμησης γίνεται με την χρήση συμπληρωματικών μέτρων που προσδιορίζουν το πόσο καλά η (εκτιμημένη) γραμμή παλινδρόμησης εξηγεί (εφαρμόζει) τα στοιχεία του δείγματος.

Συντελεστής Συσχέτισης r (Pearson)

Ο βαθμός της γραμμικής συσχέτισης δύο τυχαίων μεταβλητών X και Y μετριέται με τον συντελεστή συσχέτισης (correlation coefficient) r που ορίζεται ως

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}}$$

όπου x : οι τιμές της μεταβλητής X

\bar{x} : ο μέσος όρος των τιμών της μεταβλητής X

y : οι τιμές της μεταβλητής Y

\bar{y} : ο μέσος όρος των τιμών της μεταβλητής Y

Ο συντελεστής συσχέτισης r εκφράζει το βαθμό και τον τρόπο που οι δύο μεταβλητές συσχετίζονται, δηλαδή πως η μία τυχαία μεταβλητή μεταβάλλεται ως προς την άλλη. (Ζιούτας, 2003) Ο συντελεστής r παίρνει τιμές στο διάστημα $[-1, 1]$ και οι χαρακτηριστικές τιμές του r ερμηνεύονται ως εξής :

- $r = 1$: υπάρχει τέλεια θετική συσχέτιση μεταξύ των X και Y
- $r = 0$: δεν υπάρχει καμιά (γραμμική) συσχέτιση μεταξύ των X και Y
- $r = -1$: υπάρχει τέλεια αρνητική συσχέτιση μεταξύ των X και Y

Συντελεστής προσδιορισμού R^2

Έτσι έχουμε τον συντελεστή προσδιορισμού, R^2 (regression R^2) που μετρά το ποσοστό της δειγματικής διακύμανσης του Y που εξηγείται από το X . Δεν έχει μονάδα μέτρησης και το εύρος τιμών του είναι μεταξύ 0 (καθόλου εφαρμογή) και 1 (τέλεια εφαρμογή). (Κουνδούρη, 2009). Ο υπολογισμός του συντελεστή προσδιορισμού πραγματοποιείται με την εφαρμογή του παρακάτω τύπου:

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS}, \quad \text{όπου}$$

$$ESS = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})^2 \quad \text{και} \quad TSS = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2.$$

όπου Y_i : οι παρατηρούμενες τιμές της εξαρτώμενης μεταβλητής Y

\bar{Y} : Ο μέσος όρος της μεταβλητής Y

\hat{Y}_i : Οι υπολογιζόμενες από την παλινδρόμηση τιμές της εξαρτώμενης μεταβλητής

$\bar{\hat{Y}}$: Ο μέσος όρος των υπολογιζόμενων από την παλινδρόμηση τιμών της εξαρτώμενης μεταβλητής

Άλλος ένας δείκτης είναι το Τυπικό Σφάλμα της Παλινδρόμησης (Standard Error of Regression) μετρά και αυτό την ποιότητα της εφαρμογής, αλλά σε μονάδες μέτρησης του Y (της εξαρτώμενης μεταβλητής) (Κουνδούρη, 2009) . Ο υπολογισμός του RMSE πραγματοποιείται ως εξής:

$$\begin{aligned} SER &= \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\hat{u}_i - \bar{\hat{u}})^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \hat{u}_i^2} \end{aligned}$$

όπου \hat{u}_i : οι τιμές της εξαρτώμενης μεταβλητής όπως προκύπτουν από την εξίσωση της παλινδρόμησης

$\bar{\hat{u}}$: ο μέσος όρος των τιμών της εξαρτώμενης μεταβλητής όπως υπολογίζονται από την εξίσωση της παλινδρόμησης

Επίσης, σημαντικός παράγοντας αξιολόγησης της παλινδρόμησης είναι και η Ρίζα του Μέσου Τετραγώνου του Σφάλματος (Root Mean Squared Error-RMSE) που συνδέεται άμεσα με το τυπικό σφάλμα της παλινδρόμησης.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

με y_i : οι παρατηρούμενες τιμές της εξαρτώμενης μεταβλητής

\hat{y}_i : οι υπολογιζόμενες από την εξίσωση παλινδρόμησης τιμές της εξαρτώμενης μεταβλητής

Το σφάλμα RMSE είναι επίσης χρήσιμο και στην σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου και πραγματικών μετρήσεων από τιμές που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί στην παλινδρόμηση, με σκοπό την επαλήθευση του μοντέλου με νέες τιμές.

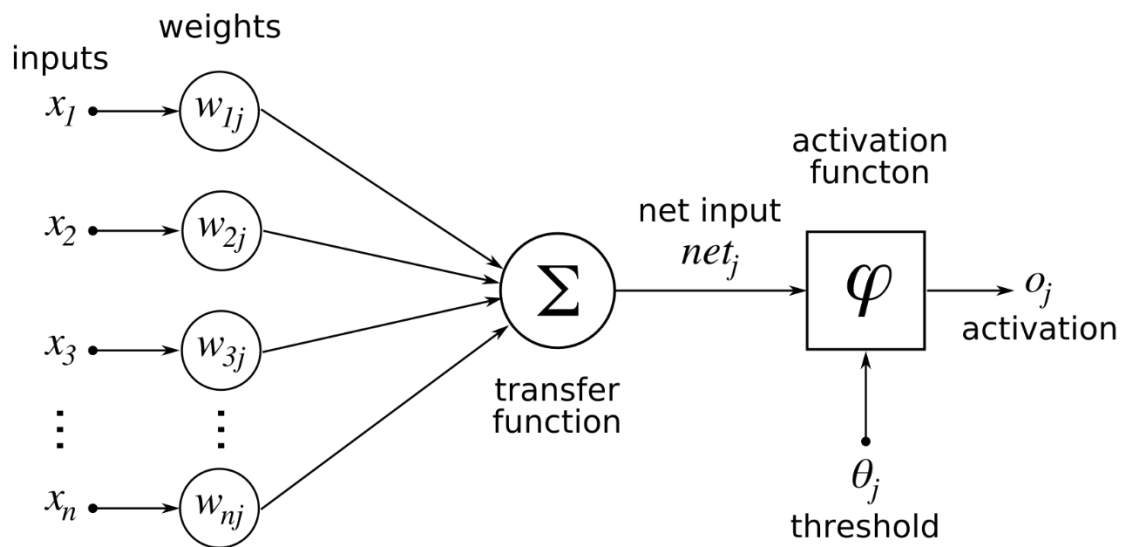
4.3 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks- ANN)

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι απομιμήσεις των βιολογικών νευρωνικών δικτύων, όπως το νευρικό σύστημα ή ο εγκέφαλος. Ένα νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από ένα αριθμό στοιχείων, τους νευρώνες. Σε κάθε νευρώνα καταφθάνει ένας αριθμός σημάτων, τα οποία έρχονται ως είσοδος σ' αυτόν. Ο νευρώνας έχει μερικές πιθανές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί η εσωτερική δομή του που δέχεται τα σήματα εισόδου και, τέλος, έχει μία μόνον έξοδο, η οποία είναι συνάρτηση των σημάτων εισόδου (Αργυράκης, 2001). Σε κάθε σύνδεση ανάμεσα σε δύο νευρώνες αναλογεί ένα βάρος, το οποίο πολλαπλασιάζεται με την έξοδο του νευρώνα-αποστολέα και σχηματίζει την είσοδο που θα έχει ο νευρώνας-λήπτης.

Η απόφαση για το αν ο κάθε νευρώνας θα εκπέμψει κάποιο σήμα, γίνεται με βάση εάν το άθροισμα όλων των (πολλαπλασιασμένων με τα ανάλογα βάρη) εισόδων του ξεπερνά κάποιο συγκεκριμένο αριθμό, ο οποίος κάθε φορά που ξεπερνιέται, ο νευρώνας “πυροκροτεί (fires)” και έτσι έχει ως έξοδο συνήθως τον

αριθμό 1, ενώ σε περίπτωση που δεν ξεπεραστεί το όριο, η έξοδος είναι 0. (OSarena, 2013)

Ο τρόπος οργάνωσης των περισσότερων μοντέλων γίνεται χρησιμοποιώντας “στρώσεις (layers)” . Η είσοδος στο νευρωνικό δίκτυο γίνεται μέσω της πρώτης στρώσης (“input layer”), η οποία θα πολλαπλασιάσει την είσοδο με τα βάρη της και θα περάσει τα τροποποιημένα πλέον δεδομένα στην επόμενη στρώση. Αυτή η διαδικασία κατά την οποία η κάθε στρώση τροποποιεί την είσοδό της και την “περνά” στην επόμενη συνεχίζεται μέχρι να φτάσουμε στην τελευταία στρώση (“output layer”), από την οποία διαβάζουμε και την έξοδο του νευρωνικού δικτύου μας (Εικόνα 51).



Εικόνα 51. Διάγραμμα ενός απλού νευρωνικού δικτύου

4 Αποτελέσματα

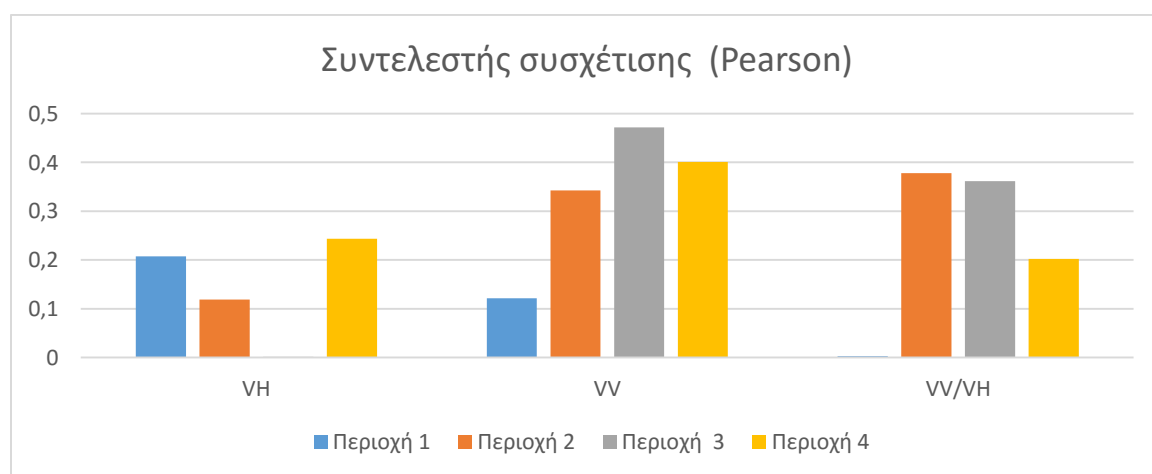
5.1 Δορυφόρος Sentinel 1

5.1.1 Απλή γραμμική παλινδρόμηση

Για την πραγματοποίηση της παλινδρόμησης κατασκευάστηκαν πίνακες για την κάθε περιοχή μελέτης συγκεντρώνοντας τις επίγειες και τις δορυφορικές μετρήσεις που αντιστοιχούν. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν γραμμικές παλινδρομήσεις για τις 4 διαφορετικές περιοχές μελέτης, συσχετίζοντας τις επίγειες μετρήσεις με την απόκριση της πόλωσης VH, της VV και τους λόγου τους VV/VH.

Πίνακας 7. Συντελεστές Pearson (Multiple R)

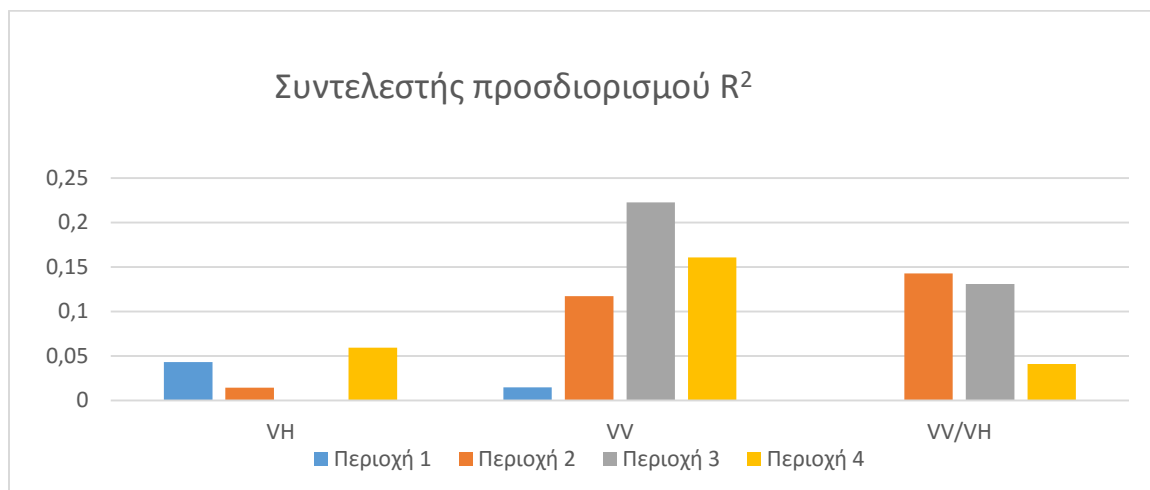
	VH	VV	VV/ VH
Περιοχή 1	0.20 7697394	0.12 1305938	0.00 2976916
Περιοχή 2	0.11 9108749	0.34 264364	0.37 7855525
Περιοχή 3	0.00 1209116	0.47 1745791	0.36 1784247
Περιοχή 4	0.24 3519962	0.40 0769639	0.20 2241308



Διάγραμμα 6.

R Square			
Περιοχή/ Δεδομένα	VH	VV	VV/ VH
Περιοχή 1	0.04 3138208	0.01 4715131	8.86 203E-06
Περιοχή 2	0.01 4186894	0.11 7404664	0.14 2774798
Περιοχή 3	1.46 196E-06	0.22 2544092	0.13 0887841
Περιοχή 4	0.05 9301972	0.16 0616303	0.04 0901547

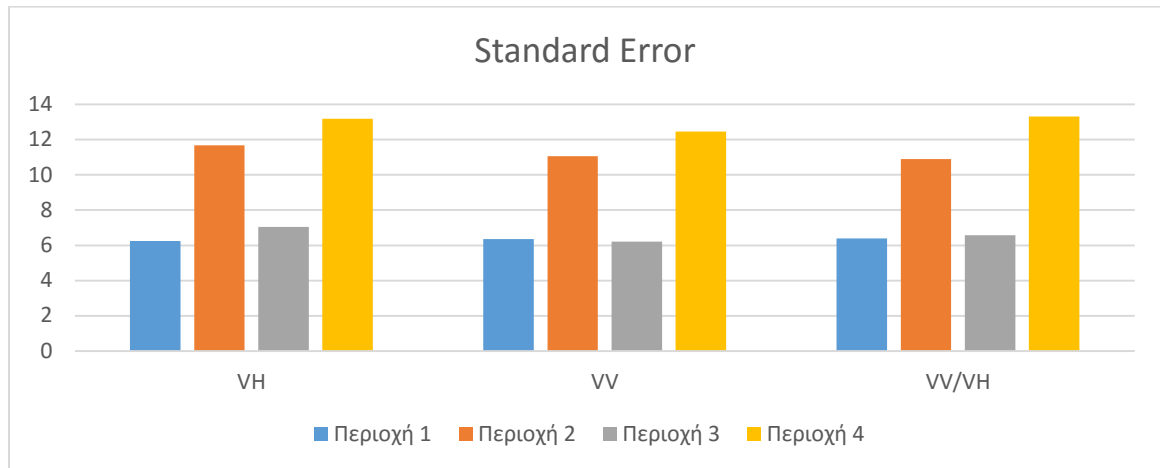
Πίνακας 8. Συντελεστής προσδιορισμού R^2



Διάγραμμα 7.

Standard Error			
	VH	VV	VV/ VH
Περιοχή 1	6.25	6.35	6.39
Περιοχή 2	11.6 8	11.0 6	10.9 0
Περιοχή 3	7.05	6.21	6.57
Περιοχή 4	13.2 0	12.4 6	13.3 2

Πίνακας 9 Σφάλμα Παλινδρόμησης



Διάγραμμα 8.

Σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης φανερώνουν μηδενική έως ελάχιστη συσχέτιση της οπισθοσκέδασης της μικροκυματικής ακτινοβολίας του ραντάρ με την υγρασία του εδάφους (Διάγραμμα 6,7,8) & (Πίνακας 7,8,9). Την καλύτερη συσχέτιση έδωσε η οπισθοσκέδαση πόλωσης VV , χωρίς όμως τα αποτελέσματα να μπορούν να θεωρηθούν ικανοποιητικά. Στη συνέχεια ακολουθεί με μικρή διαφορά η συσχέτιση του λόγου VV/VH με την υγρασία.

Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι στα διαγράμματα διασποράς εφαρμόστηκαν και άλλες γραμμές παλινδρόμησης, όπως η η πολωνυμική και η εκθετική, χωρίς όμως να δώσουν καλύτερα αποτελέσματα. Η παλινδρόμηση με δύναμη καθώς και η λογαριθμική δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστούν καθώς τα δεδομένα της οπισθοσκέδασης είναι ήδη στην λογαριθμική κλίμακα και εκφρασμένα με αρνητικές τιμές.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα δεν προκύπτει κάποια σχέση που να συνδέει την οπισθοσκέδαση του δορυφόρου Sentinel 1 με την επίγεια μέτρηση της εδαφικής υγρασίας. Το συμπέρασμα επαληθεύεται από τους χαμηλούς συντελεστές Pearson, τους χαμηλούς συντελεστές R^2 , το μεγάλο σφάλμα καθώς και τα P-Values,

τα οποία έδιναν τιμές για όλες τις μεταβλητές τιμές μεγαλύτερες από 0,05, που είναι το όριο για την ασφαλή εξαγωγή εξίσωσης υπολογισμού.

5.1.2 Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση

Όπως αναφέρεται και στα παραπάνω κεφάλαια, η βλάστηση παίζει σημαντικό ρόλο στον τρόπο οπισθοσκέδασης και απορρόφησης της μικροκυματικής ακτινοβολίας του ραντάρ. Η μικρή συσχέτιση που παρατηρείται ανάμεσα στις επίγειες μετρήσεις εδαφικής υγρασίας και τις δορυφορικές τιμές οπισθοσκέδασης είναι πιθανό να προέρχεται από την βλάστηση που επηρεάζει ποικιλοτρόπως το ανακλώμενο σήμα.

Η βλάστηση μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με καλή ακρίβεια με την χρήση των δεικτών NDVI. Έτσι, πραγματοποιήθηκε πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση χρησιμοποιώντας ως ανεξάρτητες μεταβλητές την οπισθοσκέδαση πόλωσης VV και την τιμή του κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης με σκοπό την βελτίωση των αποτελεσμάτων. Η πόλωση VV επιλέχθηκε καθώς δίνει καλύτερα αποτελέσματα παλινδρόμησης σε σχέση με την πόλωση VH ή τον λόγο VV/VH, ενώ ο οι πληροφορίες του NDVI αξιολογείται ότι θα αντισταθμίσουν την επιρροή της βλάστησης στην παλινδρόμηση.

Οι τιμές του κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης προκύπτουν από τα δορυφορικά δεδομένα του δορυφόρου Landsat 8 με αποτέλεσμα οι διαθέσιμες τιμές να μην είναι σύγχρονες με εκείνες του δορυφόρου Sentinel, καθώς οι δύο δορυφόροι έχουν διαφορετική χρονική διακριτική ικανότητα. Επίσης, ο Landsat 8 είναι δορυφόρος παθητικής τηλεπισκόπησης και οι εικόνες που λαμβάνει επηρεάζονται από την νεφοκάλυψη, με αποτέλεσμα τα αξιοποιήσιμα δεδομένα για την περίοδο μελέτης (1^ο εξάμηνο του 2015) να είναι πολύ λίγα.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει το πρόβλημα της αντιστοίχισης των δεδομένων του δορυφόρου Sentinel 1 με τις τιμές του δείκτη NDVI από τον Landsat 8 για την ολοκλήρωση της παλινδρόμησης. Εφ' όσον όμως η βλάστηση δεν μεταβάλλεται με ρυθμούς όπως λ.χ. η εδαφική υγρασία αλλά επηρεάζεται από την

αλλαγή των εποχών και των μακροπρόθεσμων καιρικών συνθηκών χρησιμοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες τιμές NDVI για τις αντίστοιχες τιμές του Sentinel. Έτσι για τις 26 διαφορετικές τιμές οπισθοσκέδασης και εδαφικής υγρασίας αντιστοιχήθηκαν οι 7 διαφορετικές τιμές NDVI για την αντίστοιχη περίοδο, επαναλαμβάνοντας τις τιμές του δείκτη βλάστησης σε περιόδους που θεωρητικά η βλάστηση δεν αλλάζει και δεν υπάρχει επόμενη διαθέσιμη τιμή NDVI.

Τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης έχουν ως εξής:



Διάγραμμα 9. Αποτελέσματα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης

Πίνακας 10. Αποτελέσματα πολλαπλής παλινδρόμησης

Πολλαπλή Παλινδρόμηση			
	Multiple R	R Square	Standard Error
Περιοχή 1	0.78	0.61	4.07
Περιοχή 2	0.89	0.79	5.53
Περιοχή 3	0.62	0.38	5.73
Περιοχή 4	0.72	0.53	9.55

Η πολλαπλή παλινδρόμηση παρουσιάζει αισθητά μεγαλύτερους συντελεστές συσχέτισης και προσδιορισμού των μετρήσεων εδαφικής υγρασίας συναρτήσει, του δείκτη NDVI και των τιμών οπισθοσκέδασης VV. Οι υπόλοιποι στατιστικοί δείκτες όμως δείχνουν ότι δεν μπορεί να εξαχθεί εξίσωση που να περιέχει ως συντελεστή τις μετρήσεις οπισθοσκέδασης VV (Διάγραμμα 9 & Πίνακας 10).

Αυτό προκύπτει από τις τιμές P-Value οι οποίες βρίσκονται εντός ορίων για τις μετρήσεις του δείκτη NDVI, αλλά εκτός ορίων για τον συντελεστή VV, όπως φαίνεται στον πίνακα (Πίνακας 11). Για να θεωρηθεί ένας συντελεστής γραμμικής παλινδρόμησης σημαντικός παράγοντας της τελικής εξίσωσης θα πρέπει $P - Value < 0.05$.

Πίνακας 11. P-Values πολλαπλής παλινδρόμησης

	Περιοχή 1	Περιοχή 2	Περιοχή 3	Περιοχή 4
Intercept	0.932	$1.85 \cdot 10^{-5}$	0.904	$3.855 \cdot 10^{-4}$
Polarization VV (dB)	0.958	0.530575	0.216	0.614
NDVI	$1.199 \cdot 10^{-5}$	$5.81 \cdot 10^{-8}$	0.078	$1.791 \cdot 10^{-4}$

Το τελευταίο στάδιο της στατικής ανάλυσης περιλαμβάνει μία ενιαία παλινδρόμηση συγχωνεύοντας τις μετρήσεις όλων των περιοχών. Αυτό εξυπηρετεί στην αύξηση του δείγματος με πιθανότητα βελτίωσης των αποτελεσμάτων, αλλά επίσης και στην διερεύνηση δυνατότητας για εξαγωγή μίας γενικής εξίσωσης για την ευρύτερη περιοχή του του Ανατολικού τμήματος του Νομού Χανίων.

Η ενιαία παλινδρόμηση περιλαμβάνει την συσχέτιση των επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας με την οπισθοσκέδαση πόλωσης VH, VV, τον λόγο των δύο πολώσεων VV/VH καθώς και μία πολλαπλή παλινδρόμηση με τις τιμές της

οπισθοσκέδασης VV και του δείκτη βλάστησης NDVI. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 12. Αποτελέσματα ενιαίας παλινδρόμησης

	VH	VV	VH/VV	VV & NDVI
Multiple R	0.159	0.359	0.151	0.448
R Square	0.025	0.129	0.023	0.201
Standard Error	10.23	9.672	10.243	9.315



Διάγραμμα 10 Αποτελέσματα ενιαίας παλινδρόμησης

Όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα, η καλύτερη συσχέτιση παρατηρείται στην οπισθοσκέδαση πόλωσης VV και στην πολλαπλή παλινδρόμηση με την πόλωση VV και τον δείκτη βλάστησης NDVI (Πίνακας 12). Επίσης, οι τιμές P-Value επιτρέπουν την εξαγωγή αναλυτικής εξίσωσης για την απλή παλινδρόμηση με την VV καθώς και για την πολλαπλή παλινδρόμηση VV & NDVI. Οι εξισώσεις παρουσιάζονται παρακάτω:

Απλή παλινδρόμηση Υγρασία (%) – Οπισθοσκέδαση Πόλωσης VV (dB)

$$MC = -1,433 VV$$

Πολλαπλή Παλινδρόμηση

$$MC = -0.964 VV + 17.031 NDVI$$

Όπου $MC = Moisture Content$

VV : η τιμή της οπισθοσκέδασης πόλωσης VV

$NDVI$: η τιμή του δείκτη NDVI

Τα αποτελέσματα, αν και παρουσιάζουν μικρή συσχέτιση μεταξύ της επίγειας μέτρησης εδαφικής υγρασίας και της τιμής των εικονοστοιχείων των δορυφορικών εικόνων, συνάδουν με τα αποτελέσματα προηγούμενων μελετών πάνω στο ίδιο αντικείμενο (Baghdadi, Holah, & Zribi, 2006; Wagner et al., 2009).

Στη συνέχεια ακολουθεί επαλήθευση των παραπάνω μοντέλων συγκρίνοντας μετρήσεις πεδίου με εκτιμώμενες τιμές εδαφικής υγρασίας που υπολογιστήκαν από δορυφορικές εικόνες που δεν χρησιμοποιήθηκαν στην διαδικασία της παλινδρόμησης.

5.1.3 Νευρωνικά Δίκτυα

Για την δημιουργία και την εκμάθηση του νευρωνικού δικτύου τα δεδομένα θα πρέπει να βρίσκονται συγκεντρωμένα σε δύο μεταβλητές X και T. Στην μεταβλητή X θα βρίσκονται τα δεδομένα εισόδου και στην μεταβλητή T (Target) τα δεδομένα εξόδου. Τα δεδομένα εισόδου δεν πρέπει να χωρίζονται σε στήλες, αλλά σε γραμμές όπου η κάθε γραμμή αποτελεί την διαφορετική μεταβλητή (π.χ. VV, VH ή NDVI). Ακόμη, η μεταβλητή T θα πρέπει να αποτελείται από μία μονοδιάστατο πίνακα μίας γραμμής, στην οποία θα είναι καταχωρημένες οι τιμές εξόδου για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου.

Εισάγουμε τις μεταβλητές από φύλλο εργασίας Excel με ονόματα VH, VV, NDVI, TRACK και T για τις μετρήσεις οπισθοσκέδασης με πόλωση VH, VV τις τιμές του δείκτη NDVI, τον κωδικό τροχιάς της εικόνας και τις επίγειες μετρήσεις εδαφικής υγρασίας, αντίστοιχα. Ο κωδικός τροχιάς (TRACK) συμπεριλήφθηκε ως επιπλέον μεταβλητή καθώς παρατηρήθηκε ότι οι εικόνες του δορυφόρου Sentinel 1 για την Κρήτη αποτελούν εναλλάξ λήψεις 2 διαφορετικών τροχιών με κωδικούς 102 και 109. Η πληροφορία αυτή ίσως βοηθήσει στην εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου και στην συσχέτιση των δεδομένων καθώς μία από τις 2 τροχιές ή συνδυασμός αυτών δύναται να δίνουν καλύτερα αποτελέσματα συσχέτισης.

Οι μεταβλητές είναι πίνακες μίας στήλης, ακριβώς όπως ήταν καταχωρημένες οι μετρήσεις από το φύλλο εργασίας Excel και περιλαμβάνουν 92 γραμμές, όσες είναι και οι μετρήσεις. Για την εισαγωγή τους στο νευρωνικό δίκτυο οι μεταβλητές εισόδου θα πρέπει να συγχωνευθούν σε ένα πίνακα X διάστασης 4x92, μία γραμμή για κάθε μεταβλητή εισόδου και μία στήλη για κάθε μέτρηση. Αντίστοιχα ο πίνακας T θα πρέπει να αναστραφεί έτσι ώστε να είναι διάστασης 1x92.

Οι εντολές που εισάγονται στην Matlab έχουν ως εξής:

```
T=T';
```

,για την αναστροφή του πίνακα T, και

```
X=[VH';VV';NDVI';TRACK'];
```


για την δημιουργία του πίνακα X (4×92) από τους 4 εισαγόμενους πίνακες μεταβλητών διάστασης (92×1).

Το νευρωνικό δίκτυο αρχικοποιείται με τυχαία βάρη και τα αποτελέσματα του δικτύου θα διαφέρουν ελάχιστα κάθε φορά που θα καλείται (The MathWorks Inc, 2015). Έτσι, καλείται η εντολή

```
setdemorandstream(491218381)
```

με σκοπό τον αποκλεισμό του παράγοντα της τυχειότητας.

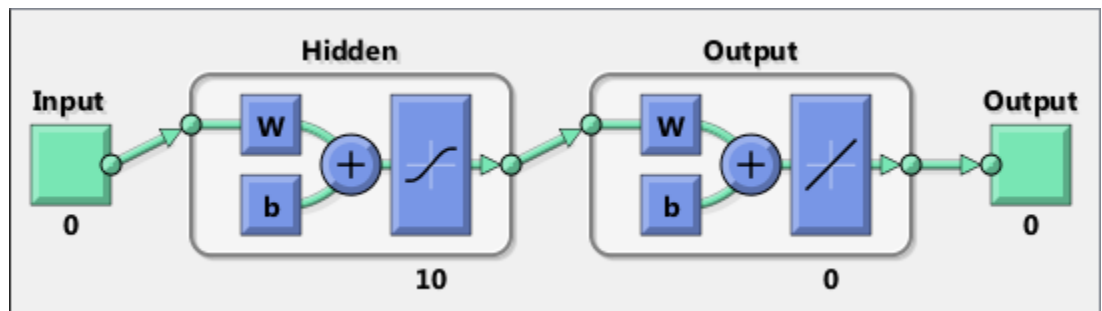
Στην συνέχεια δημιουργούμε το νευρωνικό δίκτυο. Το είδος του δικτύου που χρειαζόμαστε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι δίκτυο προσαρμογής συνάρτησης και εκτίμησης (Function Fitting and Estimation). Το δίκτυο θα αποτελείται από 10 κόμβους και μία κρυφή στρώση (Layer) (Διάγραμμα 11). Η εντολή για την δημιουργία ενός τέτοιου δικτύου είναι:

```
net = fitnet(10);
```

ενώ με την εντολή:

```
view(net)
```

είναι δυνατόν να δούμε το δίκτυο που δημιουργήθηκε.

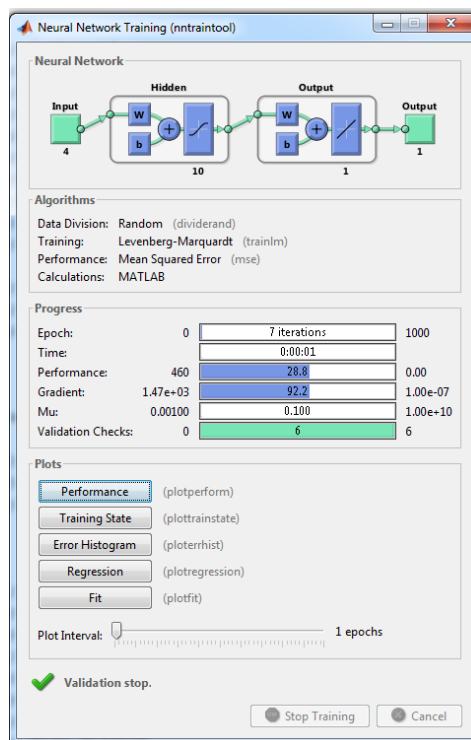


Διάγραμμα 11 Μη εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο προσαρμογής συνάρτησης

Αφού δημιουργήθηκε το δίκτυο το επόμενο βήμα είναι να πραγματοποιηθεί η εκπαίδευσή του έτσι ώστε να προσαρμοστεί στα καταγεγραμμένα επίγεια και δορυφορικά δεδομένα. Η εντολή είναι:

```
[net,tr] = train(net,X,T);
```

Με την εκτέλεση της παραπάνω εντολής αναδύεται το παράθυρο διαλόγου με το εργαλείο εκπαίδευσης νευρωνικού δικτύου (Neural Network Training Tool) (Εικόνα 52).

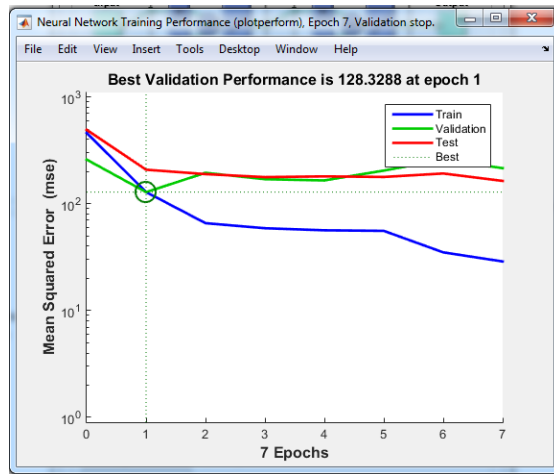


Εικόνα 52. Neural Network Training Tool

Το παραπάνω εργαλείο μας επιτρέπει την προβολή διαγραμμάτων που αξιολογούν την εκπαίδευση του δικτύου και την καταλληλότητά του για την εκτίμηση των επιθυμητών δεδομένων.

Το διάγραμμα απόδοσης (Performance Plot) παρουσιάζει την διακύμανση του σφάλματος (Mean Square Error) κατά τα στάδια της εκπαίδευσης του δικτύου. Όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 12 το δίκτυο δεν έχει καλή απόδοση για τα δεδομένα που εισήχθησαν, καθώς το MSE δεν μειώθηκε αρκετά κατά την

εκπαίδευση, αλλά κυρίως επειδή το σφάλμα του ελέγχου και της επαλήθευσης παρέμεινε σε υψηλά επίπεδα.



Διάγραμμα 12 Mean Squared Error

Το MSE του εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου μετά τον έλεγχο των εκτιμήσεων υπολογίζεται ως εξής:

```
testX = x(:,tr.testInd);
testT = t(:,tr.testInd)
testY = net(testX);
perf = mse(net,testT,testY)
```

Με αποτέλεσμα

```
perf = 208.0718
```

Το σφάλμα προκύπτει 208, που είναι υπερβολικά μεγάλη τιμή και φανερώνει ότι το δίκτυο δεν προβλέπει σωστά την εδαφική υγρασία. Το αντίστοιχο RMSE είναι

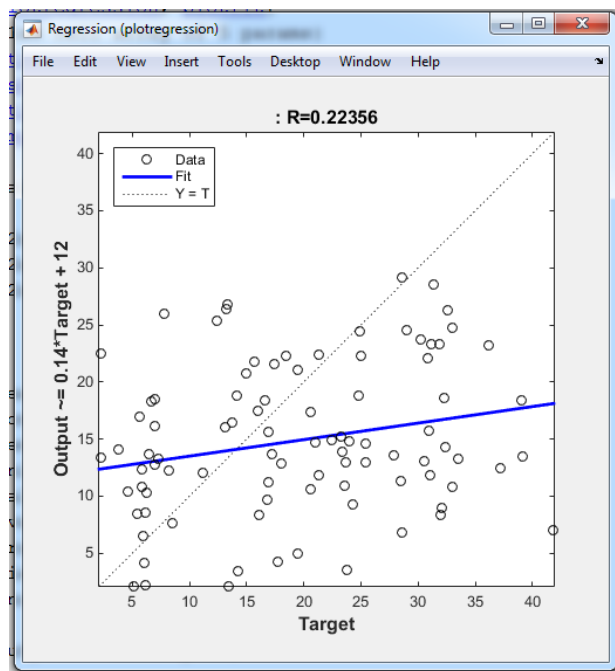
$$RMSE = \sqrt{208} = 14.4 \%$$

Το διάγραμμα παλινδρόμησης παρουσιάζει τα εκτιμώμενα δεδομένα του νευρωνικού δικτύου σε συνάρτηση με τα πραγματικά δεδομένα. Έτσι, εάν δίκτυο έχει εκπαιδευτεί σωστά, τα εκτιμώμενα αποτελέσματα θα αποκλίνουν ελάχιστα από τις πραγματικές μετρήσεις. Σε μια τέτοια περίπτωση η ευθεία στο διάγραμμα παλινδρόμησης θα έπρεπε να περνάει από την αρχή των αξόνων (ή πολύ κοντά) και να καταλήγει στην πάνω δεξιά γωνία της περιοχής του διαγράμματος, όπως ακριβώς η διακεκομμένη ευθεία που φαίνεται στο Διάγραμμα 13.

Με την εκτέλεση των παρακάτω εντολών, δημιουργείται το διάγραμμα.

```
y = net(x);
```

```
plotregression(t,y)
```



Διάγραμμα 13. Regression Plot

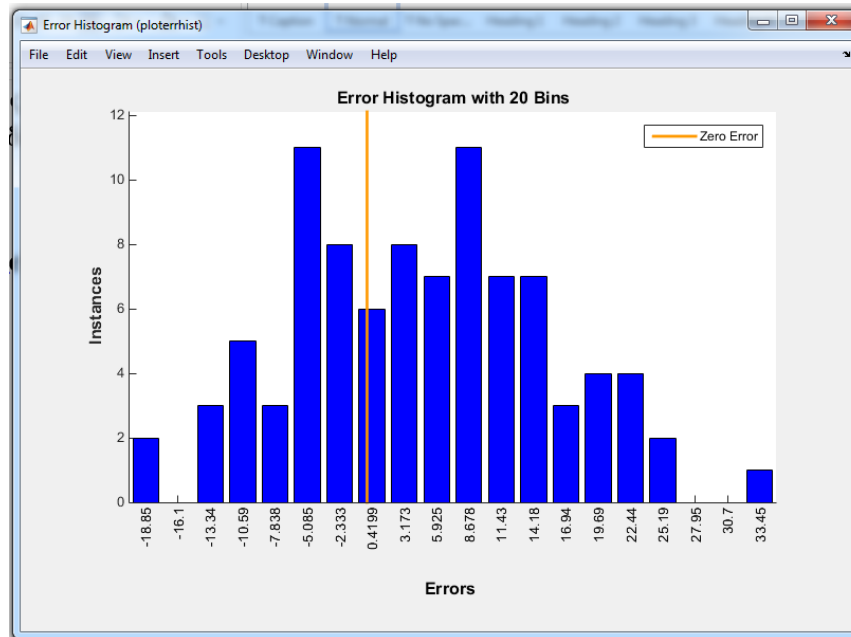
Όπως είναι φανερό, το παρόν δίκτυο δεν δίνει καθόλου καλή εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας που σημαίνει ότι θα πρέπει να αλλάξουν οι μεταβλητές εισόδου ή οι παράμετροι του δικτύου.

Το τελευταίο διάγραμμα για την αξιολόγηση του δικτύου είναι το ιστόγραμμα σφαλμάτων στο οποίο παρουσιάζεται το πώς κατανέμεται το μέγεθος

των σφαλμάτων. Με τις παρακάτω εντολές υπολογίζεται η μεταβλητή e για το σφάλμα και στη συνέχεια δημιουργείται το διάγραμμα.

$$e = t - y;$$

ploterrhist(e)



Διάγραμμα 14. Ιστόγραμμα Σφαλμάτων

Σε ένα καλά εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο, η διακύμανση θα πρέπει να είναι μικρή και να έχει ως κέντρο το 0. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 14, τα σφάλματα ποικίλουν, βρίσκονται σε υψηλά επίπεδα και δεν συγκεντρώνονται κοντά στο 0.

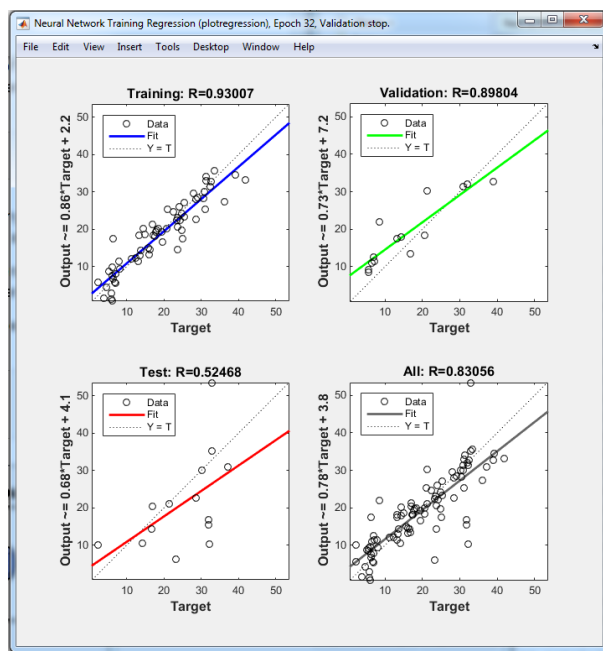
Για την βελτίωση των αποτελεσμάτων έγινε εκπαίδευση του δικτύου εναλλάσσοντας και συνδυάζοντας τις μεταβλητές εισόδου μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 13):

Πίνακας 13 Αποτελέσματα εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων για διάφορους συνδυασμούς μεταβλητών εισόδου

Μεταβλητές Εισόδου	Performance (MSE)	RMSE	R	R ²
VH,VV,NDVI	80,69	8,98	0,83	0,91
VH,NDVI	176,72	13,29	0,65	0,81
VH,VV,,TRACK	278,35	16,68	0,52	0,72
VV, NDVI	151,84	12,32	0,47	0,68
VH	103,30	10,16	0,36	0,60
VV, VH	138,44	11,77	0,35	0,59
VV	80,69	8,98	0,35	0,59
VH,NDVI,TRACK	235,07	15,33	0,30	0,55
VH,VV,NDVI,TRACK	208,07	14,42	0,22	0,47
VV,TRACK	214,53	14,65	0,09	0,31
VV/VH	132,43	11,51	0,09	0,30

Όπως φαίνεται στον πίνακα (Πίνακας 15), ο συνδυασμός μεταβλητών που δίνει την καλύτερη συσχέτιση αποτελεσμάτων νευρωνικού δικτύου και πραγματικών μετρήσεων περιλαμβάνει τα δεδομένα και των δύο τύπων οπισθοσκέδασης (πόλωσης VV & VH) του δορυφόρου Sentinel 1 καθώς και την δεδομένα του δείκτη βλάστησης NDVI όπως υπολογίστηκε από τις δορυφορικές εικόνες του Landsat 8 δίνοντας τιμή συντελεστή προσδιορισμού $R^2=0.91$.

Αναλυτικά παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 15 οι συσχετίσεις των αποτελεσμάτων του νευρωνικού δικτύου με τις πραγματικές μετρήσεις, τόσο κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης και του ελέγχου, όσο και κατά την διάρκεια της επαλήθευσης.



Διάγραμμα 15. Αποτελέσματα εκπαίδευσης δικτύου με μεταβλητές εισόδου την οπισθοσκέδαση VH και VV και τον δείκτη βλNDVI.

5.2 Δορυφόρος Landsat 8

Συγκεντρώθηκαν οι επίγειες μετρήσεις για τα 4 σημεία μελέτης και οι δορυφορικές τιμές των 6 καναλιών και του δείκτη NDVI για τα αντίστοιχα σημεία και πραγματοποιήθηκε μια αρχική εκτίμηση συσχέτισης υπολογίζοντας το συντελεστή συσχέτισης Pearson (R).

Πίνακας 14 .Συντελεστής συσχέτισης R για τις επίγειες μετρήσεις υγρασίας εδάφους και τα αντίστοιχα δεδομένα του Landsat 8

Ποσοστό υγρασία	
Ποσοστό υγρασία	1
Κανάλι 1	-0,23037
Κανάλι 2	-0,25109
Κανάλι 3	-0,22467
Κανάλι 4	-0,40728
Κανάλι 5	-0,00724
Κανάλι 6	-0,50097
Κανάλι 7	-0,49479
Κανάλι 9	0,206698
NDVI	0,345123

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 14 ο δείκτης NDVI παρουσιάζει μέτρια συσχέτιση, ενώ η καλύτερη συσχέτιση παρατηρείται για το κανάλι 6 και 7.

5.3 Επαλήθευση Μοντέλων

Η παλινδρόμηση και το νευρωνικό δίκτυο με την καλύτερη συσχέτιση που υπολογίστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους επαληθεύτηκαν με νέα δεδομένα που δεν χρησιμοποιήθηκαν στα προηγούμενα στάδια. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην επαλήθευση αποτελούν μετρήσεις δύο διαφορετικών ημερομηνιών. Η πρώτη είναι την περίοδο της άνοιξης στις 03/05/2015 και η δεύτερη στο μέσο του καλοκαιριού στις 15/7/2015. Τα δεδομένα αυτά επιλέχθηκαν κατά αυτό τον τρόπο έτσι ώστε η πυκνότητα βλάστησης να είναι διαφορετική στην κάθε μέτρηση με σκοπό τον εκτενέστερο έλεγχο του μοντέλου. Στην περίπτωση της περιοχής 3, λόγω του αισθητά μικρότερου αριθμού μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε μόνο μία τιμή για επαλήθευση στις 15/7/2015.

Για την γραμμική παλινδρόμηση η επαλήθευση παρουσιάζεται στον πίνακα (Πίνακας 15). Η παλινδρόμηση που χρησιμοποιήθηκε είναι η συνολική παλινδρόμηση όλων των περιοχών, με ανεξάρτητες μεταβλητές την οπισθοσκέδαση πόλωσης VV και την τιμή του δείκτη NDVI.

Πίνακας 15. Επαλήθευση παλινδρομήσεων

Περιοχή Μελέτης	Ημερ/νία Λήψης Εικόνας	Πόλωση VV (dB)	NDVI	Ποσοστό Εδαφικής Υγρασίας (%)	Ποσοστό εκτιμώμενης εδαφικής υγρασίας από την απλή παλινδρόμηση	Ποσοστό εκτιμώμενης εδαφικής υγρασίας από την πολλαπλή παλινδρόμηση
1	5/3/2015	-10.24	0.64	23.68	14.67	20.74
	15/7/2015	-8.78	0.31	4.22	12.59	13.78
2	5/3/2015	-19.01	0.82	28.33	27.24	32.23
	15/7/2015	-7.41	0.61	6.32	10.62	17.52
3	15/7/2015	-10.82	0.46	15.64	15.51	18.22
4	5/3/2015	-14.53	0.41	30.55	20.82	21.06
	15/7/2015	-5.97	0.35	3.25	8.56	11.67
				RMSE	6.48	7.64

Όπως φαίνεται στον πίνακα (Πίνακας 15), το σφάλμα μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων μετρήσεων είναι χαμηλότερο στην περίπτωση της απλής παλινδρόμησης αλλά με μικρή διαφορά.

Για την επαλήθευση του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιήθηκε το δίκτυο που εκπαιδεύτηκε με μεταβλητές εισόδου την οπισθοσκέδαση πόλωσης VV & VH καθώς και την τιμή του δείκτη NDVI. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 16).

Πίνακας 16. Αποτελέσματα επαλήθευσης νευρωνικού δικτύου με νέες τιμές

Περιοχή Μελέτης	Ημ/νία λήψης δορυφορικής εικόνας	Ποσοστό εδαφικής υγρασίας επίγειας μέτρησης (%)	Εκτιμώμενο ποσοστό εδαφικής υγρασίας (%)	Διαφορά πραγματικής-εκτιμώμενης μέτρησης
1	3/5/2015	23,68	13,43	-10,25
	15/7/2015	4,22	33,52	29,30
2	3/5/2015	28,33	27,06	-1,27
	15/7/2015	6,32	18,36	12,04
3	15/7/2015	15,64	12,06	-3,58
4	3/5/2015	30,55	47,99	17,44
	15/7/2015	3,25	2,21	-1,04
		RMSE	14,28	

Όπως φαίνεται, στις νέες τιμές το σφάλμα του μοντέλου κυμαίνεται σε μεγαλύτερα επίπεδα σε σχέση με την επαλήθευση που πραγματοποιήθηκε κατά την αυτόματη εκπαίδευση από την Matlab. Παρατηρώντας τις τιμές βλέπουμε ότι η απόκλιση έχει μεγάλο εύρος και δεν κυμαίνεται σε σταθερά επίπεδα. Έχουμε δηλαδή προβλεπόμενες τιμές που είτε δεν προσεγγίζουν καθόλου τις πραγματικές μετρήσεις, είτε τις προσεγγίζουν πολύ καλά. Το αποτέλεσμα αυτό αναδεικνύει το γεγονός ότι στην περίπτωση του νευρωνικού δικτύου η αυτόματη εκπαίδευση του δικτύου προσφέρει στατιστικά πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

5 Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη εργασία είχε ως στόχο την διεξαγωγή έρευνας σχετικά με την στατιστική συσχέτιση επίγειων και υπέργειων (με χρήση μέσων δορυφορικής Τηλεπισκόπησης) μετρήσεων εδαφικής υγρασίας. Απώτερος σκοπός ήταν η ανάδειξη των δυνατοτήτων που προφέρει η δορυφορική Τηλεπισκόπηση στην ποσοτική εκτίμηση φυσικών μεγεθών όπως είναι η εδαφική υγρασία. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση 4 αισθητήρων μέτρησης εδαφικής υγρασίας στο ανατολικό τμήμα της Περιφερειακής ενότητας Χανίων. Ταυτόχρονα με τις εδαφικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκε και λήψη ανοιχτών δορυφορικών δεδομένων τόσο από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (Sentinel 1) όσο και από την NASA (Landsat 8). Ειδικότερα για τις εικόνες του δορυφόρου Sentinel 1 είναι από τις πρώτες φορές σε παγκόσμιο επίπεδο που δημοσιεύεται εργασία σχετικά με τη δυνατότητα των εικόνων του συγκεκριμένου δορυφόρου να συμβάλλει στην εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας. Στα πλαίσια της στατιστικής ανάλυσης της σχέσης των επίγειων με τις υπέργειες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι απλής και πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης καθώς και νευρωνικά δίκτυα. Τα αποτελέσματα των παλινδρομήσεων συνάδουν με αντίστοιχα αποτελέσματα που έχουν παρατηρηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία, με σχετικά μικρές έως μέτριες τιμές συσχέτισης.

Στην προσπάθεια να αναδείξουμε τους παράγοντες που συνετέλεσαν είτε θετικά είτε αρνητικά στην επίτευξη του απώτερου στόχου της εργασίας καταλήξαμε στα παρακάτω συμπεράσματα :

Σημαντικό ρόλο στην καταγραφή της ανακλώμενης ακτινοβολίας του radar έχει το μήκος κύματος της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Έτσι στην περίπτωση του καναλιού L (ALOS PALSAR) η ακτινοβολία εισχωρεί στο έδαφος σε βάθος 20cm, ενώ αντίθετα η ακτινοβολία τύπου C (περίπτωση Sentinel 1) φτάνει μόνο στα πρώτα 5 cm (Álvarez-Mozos κ,α , 2009), ενώ ταυτόχρονα επηρεάζεται αισθητά από την βλάστηση. Ακόμη ένας παράγοντας που προκαλεί αποσυσχέτιση του σκεδαζόμενου σήματος είναι η γωνία πρόσπτωσης της μικροκυματικής

ακτινοβολίας η οποία θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη έτσι ώστε το σκεδαζόμενο σήμα να επηρεάζεται ελάχιστα από την βλάστηση ή την μορφολογία του εδάφους (Baghdadi et al., 2006). Η γωνία πρόσπτωσης της C band μικροκυματικής ακτινοβολίας του δορυφόρου Sentinel 1 κυμαίνεται σε μεσαία επιπέδα (23° - 37°) γεγονός που είναι πολύ πιθανόν να ευθύνεται για τη μέτρια συσχέτιση των δεδομένων.

Επιπρόσθετα, το χρονικό εύρος των δεδομένων αγγίζει τους 6 μήνες, καλύπτοντας περιόδους έντονων βροχοπτώσεων αλλά και περιόδους ξηρασίας και υψηλών θερμοκρασιών. Η χρονική ανάλυση των μετρήσεων των υγρασιομέτρων είναι αρκετά ικανοποιητική παρέχοντας μια αξιόπιστη χρονοσειρά, αλλά η χρονική ανάλυση των δορυφορικών εικόνων περιορίζεται σε 5 περίπου εικόνες τον μήνα, με αποτέλεσμα η συνολική αντιστοιχία δορυφορικών δεδομένων και επίγειων μετρήσεων για κάθε περιοχή στους 6 μήνες μελέτης να είναι περίπου 28 τιμές. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 93 μετρήσεις από τις 4 περιοχές για την γραμμική παλινδρόμηση και την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου. Επίσης στην περιοχή μελέτης 3 υπήρχαν αισθητά λιγότερες μετρήσεις εδαφικής υγρασίας λόγω μερικής καταστροφής των αισθητήρων από εξωγενείς παράγοντες. Ανασταλτικός επίσης παράγοντας για τον εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας σε κάποιες από τις περιοχές μελέτης αποτέλεσε η ύπαρξη έντονης βλάστησης η οποία μαζί με τη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους αποτελούν ξεχωριστά επιστημονικά αντικείμενα προς μελέτη τα οποία ξεφεύγουν από τους σκοπούς και τους στόχους της συγκεκριμένης εργασίας. Για παράδειγμα στην περιοχή μελέτης 3 το φύλλωμα των αμπελιών δημιουργεί ένα σκίαστρο (canopy) και ενδέχεται να εμποδίζει την μικροκυματική ακτινοβολία του δορυφόρου να εισχωρήσει στο έδαφος με αποτέλεσμα την μερική αποσυσχέτιση του σήματος από την εδαφική υγρασία. Ο υπολογισμός και η εισαγωγή του δείκτη NDVI στο μοντέλο εκτίμησης εδαφικής υγρασίας με δορυφορικές εικόνες ραντάρ κάλυψε το κενό υπολογισμού της τραχύτητας του εδάφους (roughness) λόγω βλάστησης και της συνεπαγόμενης αποσυσχέτισης του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος.

Η θετική συμβολή της εργασίας στην εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας με τη χρήση τεχνολογίας δορυφορικής Τηλεπισκόπησης συνοψίζεται στα παρακάτω επιμέρους σημεία :

- Χρήση για πρώτη φορά του δορυφόρου Sentinel 1 στην καταγραφή της εδαφικής υγρασίας και εκτίμηση των δυνατοτήτων που αυτός προσφέρει στους ερευνητές
- Ανάδειξη της ευαισθησίας της πόλωσης VV στην καταγραφή της εδαφικής υγρασίας
- Ανάδειξη των σημαντικών δυνατοτήτων που προσφέρει ο δείκτης βλάστησης NDVI στην εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας
- Συνδυαστική χρήση του πολωμένου σήματος VV και του δείκτη NDVI στην εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας
- Συγκριτική μελέτη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων που προσφέρουν η γραμμική παλινδρόμηση, η πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση και τα νευρωνικά δίκτυα στην εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας. Σε γενικές γραμμές η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου παρουσίασε υψηλότερα επίπεδα συσχέτισης αλλά κατά την επαλήθευση με νέες τιμές, το σφάλμα παρέμεινε σε σχετικά υψηλές τιμές

Η συγκεκριμένη εργασία φιλοδοξεί να αποτελέσει ένα είδος οδικού χάρτη για τη χρήση του δορυφόρου Sentinel 1 και γενικότερα μεθόδων και τεχνικών δορυφορικής Τηλεπισκόπησης στην εκτίμηση και τον υπολογισμό της εδαφικής υγρασίας. Σε επόμενο στάδιο τα αποτελέσματα της εργασίας μπορούν να εμπλουτιστούν με την προσθήκη στην επεξεργασία των δεδομένων μιας μεγαλύτερης χρονοσειράς τόσο υπέργειων όσο και επίγειων μετρήσεων εδαφικής υγρασίας γεγονός το οποίο δεν ήταν εφικτό εντός των στενών χρονικών ορίων μιας διπλωματικής εργασίας.

6 Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

- Álvarez-Mozos, J., Verhoest, N. E. C., Larrañaga, A., Casali, J., & González-Audicana, M. (2009). Influence of Surface Roughness Spatial Variability and Temporal Dynamics on the Retrieval of Soil Moisture from SAR Observations. *Sensors*, 9(1), 463–489. <http://doi.org/10.3390/s90100463>
- Baghdadi, N., Holah, N., & Zribi, M. (2006). Soil moisture estimation using multi-incidence and multi-polarization ASAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 27(10), 1907–1920. <http://doi.org/10.1080/01431160500239032>
- Brunold, D. (2011). Pixel Spacing Value Order and Valid Values. Retrieved July 16, 2015, from <https://www.dabsoft.ch/dicom/3/10.7.1.3/>
- DECAGON. (2015). EC-5 SMALL SOIL MOISTURE SENSOR. Retrieved September 14, 2015, from <Http://www.decagon.com/en/soils/volumetric-water-content-sensors/ec-5-lowest-cost-vwc/>
- Engman, E. T., & Chauhan, N. (1995). Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51(1), 189–198. [http://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00074-W](http://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00074-W)
- ESA. (2013). SMOS Mission Overview. Retrieved October 7, 2015, from http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Earth_Explorers/SMOS/Overview3
- ESA. (2015a). Introducing Sentinel 1. Retrieved October 4, 2015, from http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Introducing_Sentinel-1
- ESA. (2015b). Level-1 Ground Range Detected. Retrieved January 1, 2015, from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/resolutions/level-1-ground-range-detected>
- ESA. (2015c). Sentinel-1 Toolbox 1.1.0.
- ESA/R. Sabia. (2015). SURFACE OCEAN PH. Retrieved August 31, 2015, from http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/01/Surface_ocean_pH
- EUMETSAT. (2015). METOP DESIGN. Retrieved September 2, 2015, from <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Metop/MetopDesign/index.html>

- European Space Agency. (2015). Τεχνολογία Ραδιοεντοπισμού Παντάρ. Retrieved August 20, 2015, from http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_GR/SEM4G05PVFG_0.html
- Gao, Z., Xu, X., Wang, J., Yang, H., Huang, W., & Feng, H. (2013). A method of estimating soil moisture based on the linear decomposition of mixture pixels. *Mathematical and Computer Modelling*, 58(3-4), 606–613. <http://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.10.054>
- Gherboudj, I., Magagi, R., Berg, A. A., & Toth, B. (2011). Soil moisture retrieval over agricultural fields from multi-polarized and multi-angular RADARSAT-2 SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 115(1), 33–43. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.011>
- Hossain, A. K. M. A., & Greg, E. (2009). Microwave Remote Sensing of Soil Moisture in Semi-arid Environment, 065.
- Justice, C. ., Townshend, J. R. ., Vermote, E. ., Masuoka, E., Wolfe, R. ., Saleous, N., ... Morisette, J. . (2002). An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 3–15. [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00084-6](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00084-6)
- Lobell, D. B., & Asner, G. P. (2002). Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, 66(3), 722–727. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0036240171&partnerID=tZ0tx3y1>
- McFEETERS, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <http://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Myneni, R. B., Hall, F. G., Sellers, P. J., & Marshak, A. L. (1995). The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), 481–486. <http://doi.org/10.1109/36.377948>
- NASA. (2014). SMAP Data Products. Retrieved from <http://smap.jpl.nasa.gov/data/>
- NASA. (2015). Thermal Infrared Sensor (TIRS). Retrieved from <http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=5474>
- National Aeronautics and Space Administration. (2015). No Title. Retrieved August 31, 2015, from http://landsat.gsfc.nasa.gov/?page_id=7195

- Newton, R., & Rouse, J. (1980). Microwave radiometer measurements of soil moisture content. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 28(5), 680–686. <http://doi.org/10.1109/TAP.1980.1142386>
- Nocita, M., Stevens, A., Noon, C., & van Wesemael, B. (2013). Prediction of soil organic carbon for different levels of soil moisture using Vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*, 199, 37–42. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.07.020>
- OSarena. (2013). Εισαγωγή στα Νευρωνικά Δίκτυα. Retrieved from <http://osarena.net/logismiko/applications/neural-networks-ti-einai.html>
- Petropoulos, G. P., Ireland, G., & Barrett, B. (2015). Surface soil moisture retrievals from remote sensing: Current status, products & future trends. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. <http://doi.org/10.1016/j.pce.2015.02.009>
- PROSODOL. (2011). Φυσικές και Χημικές Ιδιότητες του Εδάφους. Retrieved August 25, 2015, from <http://www.prosodol.gr/?q=el/node/480#%CE%A5%CE%B3%CF%81%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%85%CE%B5%CE%B4%CE%AC%CF%86%CE%BF%CF%85%CF%82>
- Santi, E., Paloscia, S., Pettinato, S., & Fontanelli, G. (2015). Application of artificial neural networks for the soil moisture retrieval from active and passive microwave spaceborne sensors. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. <http://doi.org/10.1016/j.jag.2015.08.002>
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., ... Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3-4), 125–161. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>
- Small, D., & Schubert, A. (2008). Guide to ASAR geocoding. *Issue*. Retrieved from http://www.geo.unizh.ch/microsite/rsl-documents/research/publications/other-sci-communications/2008_RSL-ASAR-GC-AD-v101-0335607552/2008_RSL-ASAR-GC-AD-v101.pdf
- Sterling Power Group Ltd. (2015). Sterling Geo's Spatial Modeler Library. Retrieved from 21/7/2015
- The MathWorks Inc. (2015). Function Fitting and Aproximation Neural Network Example: House Price Estimation. Retrieved September 23, 2015, from <http://www.mathworks.com/help/nnet/examples/house-price-estimation.html>
- The-Crankshaft Publishing. (n.d.). Radar Cross Section (Remote Sensing). Retrieved September 2, 2015, from <http://what-when-how.com/copyright-information/>

- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., ... Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9–24. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [http://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](http://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- United States Geological Survey. (2013). Normalized Difference Water Index (NDWI). Retrieved August 31, 2015, from http://deltas.usgs.gov/fm/data/data_ndwi.aspx
- United States Geological Survey. (2014). Frequently Asked Questions about the Landsat Missions. Retrieved August 31, 2015, from <http://landsat.usgs.gov>
- United States Geological Survey. (2015). Using the USGS Landsat 8 Product. Retrieved July 21, 2015, from http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php
- USGS. (2015). Landsat Missions Timeline. Retrieved October 7, 2015, from http://landsat.usgs.gov/about_mission_history.php
- Wagner, W., Sabel, D., Doubkova, M., Bartsch, A., & Pathe, C. (2009). The Potential of Sentinel-1 for Monitoring Soil Moisture with a high Spatial Resolution at Global Scale. *ESA Special Publications SP-674*, 5.
- Weidong, L., Baret, F., Xingfa, G., Qingxi, T., Lanfen, Z., & Bing, Z. (2002). Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3), 238–246. [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00347-9](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00347-9)
- Wikipedia. (2014). Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis. In *Wikipedia*. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Microwave_Imaging_Radiometer_with_Aperture_Synthesis

Αδαμόπουλος, Λ., Δαμιανού, Χ., & Σβέρκος, Α. (1999). *Μαθηματικά και Στοιχεία Στατιστικής*. Αθήνα.

Αργυράκης, Π. (2001). *Νευρωνικά Δίκτυα και Εφαρμογές, Τόμος Β΄*. Πάτρα.

Αρσένη - Παπαδημητρίου, Α. (n.d.). Ιστοσελίδα μαθήματος υδρομετεωρολογίας. Retrieved August 26, 2015, from <http://www.geo.auth.gr/courses/gmc/gmc543e/>

Αστάρας, Θ. (2006). *Τηλεπισκόπηση & Φωτοερμηνεία στις Γεωεπιστήμες*. Θεσσαλονίκη: Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΑΠΘ.

Βουδούρης, Κ. (2006). *Ηλεκτρονικές Σημειώσεις Μαθήματος "Θέματα Υδρογεωλογίας Περιβάλλοντος."* Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωλογίας Τμήμα Γεωλογίας, Σχολή Θετικών Επιστημών Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Retrieved from <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/>

Δημητροπουλάκης, Π. (2013). *Ηλεκτρονικές Σημειώσεις Μαθήματος "ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΙΙΙ: Εισαγωγή στη Χρήση του SPSS, Στατιστικό Πακέτο για Κοινωνικές Επιστήμες."* Σητεία: Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Τμήμα: Διατροφής και Διαιτολογίας (Παράρτημα Σητείας). Retrieved from <http://www.lib.teiher.gr/webnotes/seyp/SPSS/>

Ζιούτας, Γ. (2003). *Πιθανότητες και Στοιχεία Στατιστικής για Μηχανικούς*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζιούτα.

Θεοχάρης, Μ. (2015). Ενότητα 2. In *Αρδεύσεις*. Άρτα: Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Ηπείρου. Retrieved from [http://eclass.teiep.gr/modules/document/file.php/TEXG108/Διδακτικό Πακέτο/Ενότητα 2_Το έδαφος.pdf](http://eclass.teiep.gr/modules/document/file.php/TEXG108/Διδακτικό_Πακέτο/Ενότητα_2_Το_έδαφος.pdf)

Καρτάλης, Κ., & Φείδας, Χ. (2006). *Αρχές & Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης*. Αθήνα: Εκδόσεις Γκιούρδας.

Κουνδούρη, Φ. (2009). Ηλεκτρονικές Σημειώσεις Μαθήματος Οικονομετρίας. Retrieved September 9, 2015, from <http://www.aueb.gr/users/koundouri/resees/uploads/lectures.html>

Λαζαρίδου - Αθανασιάδου, Μ. (2012). *Ηλεκτρονικές Σημειώσεις Εργαστηρίου Εδαφολογίας*. ΤΕΙ Καβάλας, Τμήμα Δασοπονίας και Διαχείρισης Φυσικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Εδαφολογίας. Retrieved from http://www.teidasoponias.gr/site/news/xtra/morfologia/igrasia_edafous.pdf

- Μερτίκας, Σ. (2006). *Τηλεπισκόπηση και ψηφιακή ανάλυση εικόνας*. Αθήνα: Εκδόσεις ΙΩΝ.
- Μηλιαρέσης, Γ. Χ. (2003). *Φωτοερμηνεία Τηλεπισκόπηση*. Αθήνα: Εκδόσεις ΙΩΝ.
- Ποϊραζίδης, Κ., Δ., Β. Μ., Γ., Κ., & Λορίλια, Ρ. Σ. (2013). *Βασικές Αρχές της Τηλεπισκόπησης*. ΑΤΕΙ ΙΟΝΙΩΝ ΝΗΣΩΝ- ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ & ΟΙΚΟΛΟΓΙΑΣ. Retrieved from [http://envi.teiion.gr/assets/files/EnvManagement/Section/REMOTE_THEORY/Basikes_Arxes_Tis_Tilepiskopisis_\(1,2,3\).pdf](http://envi.teiion.gr/assets/files/EnvManagement/Section/REMOTE_THEORY/Basikes_Arxes_Tis_Tilepiskopisis_(1,2,3).pdf)
- Συλλαίος, Ν. (2000). *Εισαγωγή στην τηλεπισκόπηση και στα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Γιαχούδη.
- Σφακιανάκη, Μ., Μαγαλιού, Κ., & Μπότσαρης, Ι. (2008). *Έδαφος Διάβρωση Ερημοποίηση Ρύπανση*. Τάξεων, “ΚΑΛΛΙΣΤΩ” Προγράμματα ανοικτών Περιβαλλοντικών.
- Τζωρτζάκης, Ι. (2014). *Εισαγωγή στην τηλεπισκόπηση*. Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωγραφίας. Retrieved from <http://users.sch.gr/mppapado/downloads/tilepiskopisi.pdf>
- Χαραλαμπίδης, Γ. (2010). *ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΕ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΠΤΥΓΜΕΝΟ ΣΕ ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Retrieved from <http://ikee.lib.auth.gr/record/125203/files/GRI-2010-5947.pdf?version=1>
- Χρυσουλάκης, Ν. (2011). *Σημειώσεις Μαθήματος “Αρχές και Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης”*. Πανεπιστήμιο Κρήτης.