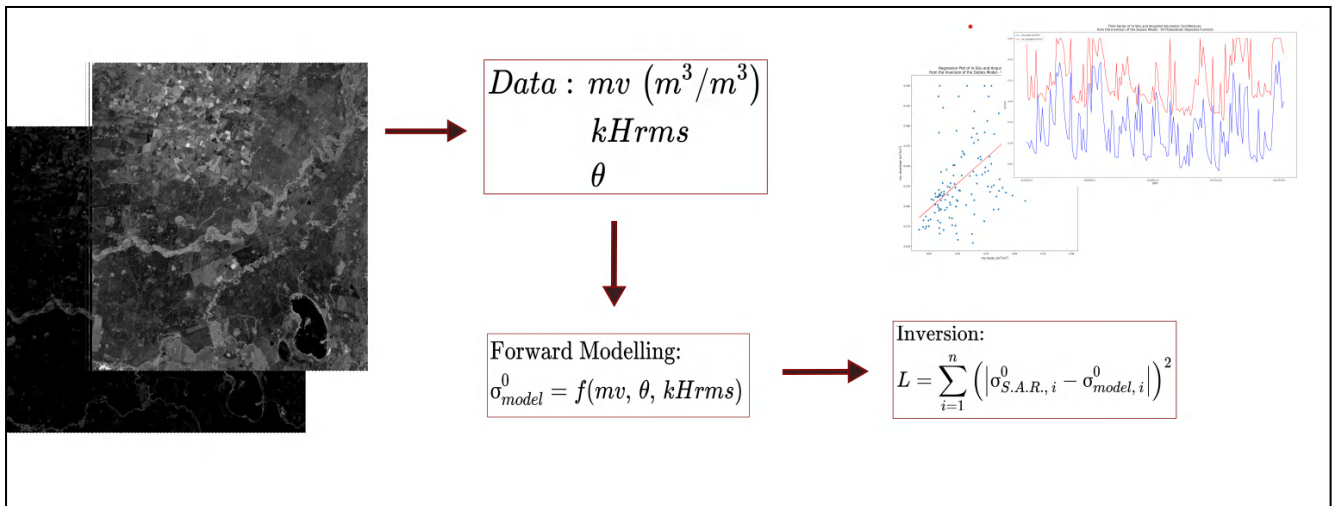




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ -
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ



Διπλωματική Εργασία

Αξιολόγηση Μοντέλων και Μεθοδολογιών Εκτίμησης Εδαφικής Υγρασίας
Μέσω Εικόνων Ρανταρ

Στέφανος Πέτκοβιτς

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Βασιλεία Καραθανάση, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2023

Πρόλογος - Ευχαριστίες: Η παρούσα διπλωματική εργασία η οποία αποτέλεσε το τελευταίο στάδιο του προπτυχιακού κύκλου των σπουδών μου στην Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών - Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου μου έδωσε την δυνατότητα να ασχοληθώ με το διαρκώς εξελισσόμενο πεδίο έρευνας της χρήσης απεικονίσεων Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (SAR) για την εκτίμηση διαφόρων κρίσιμων παραμέτρων του φυσικού περιβάλλοντος όπως είναι η εδαφική υγρασία. Μάλιστα, στο διαρκώς εξελισσόμενο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής τα δορυφορικά δεδομένα όπως οι SAR απεικονίσεις παίζουν πλέον σημαντικό ρόλο στην παρακολούθηση και αντιμετώπιση του συγκεκριμένου αλλά και άλλων φαινομένων που επηρεάζουν την φύση και τον άνθρωπο.

Επομένως, θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια Ε.Μ.Π. Βασιλεία Καραθανάση με την οποία συζητήσαμε και λύσαμε όλα τα προκύπτοντα ζητήματα της διπλωματικής εργασίας ενώ ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να αποδώσω στον Υποψήφιο Διδάκτορα Κλεάνθη Καραμβάση ο οποίος με βοήθησε σημαντικά στην υλοποίηση όλων των απαιτούμενων τμημάτων για την επίτευξη των στόχων που ετέθησαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα άτομα του οικείου περιβάλλοντος μου που στάθηκαν δίπλα μου σε όλο αυτό το ταξίδι, και συγκεκριμένα τους γονείς μου, τους φίλους μου και την σύντροφο μου Εύη.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη	1
Abstract	2
Σκοπός/Στόχοι Εργασίας	3
1. Θεωρητικό Υπόβαθρο	4
<u>1.1. Εδαφική Υγρασία</u>	4
1.1.1. Εισαγωγή - Ορισμοί Εδαφικής Υγρασίας	4
1.1.2. Παράγοντες Επίδρασης Εδαφικής Υγρασίας	4
1.1.3. Σημασία της Εδαφικής Υγρασίας για την Φύση και τις Ανθρωπογενείς Δραστηριότητες	7
1.1.4. Τρόποι και Μεθοδολογίες Προσδιορισμού της Εδαφικής Υγρασίας	7
<u>1.2. Ενεργητική Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση – (RADAR)</u>	9
1.2.1. Εισαγωγή - Ιστορικό Υπόβαθρο	9
1.2.2. Βασικές Αρχές Λειτουργίας Radar	10
1.2.3. Radar Συνθετικού Ανοίγματος	13
<u>1.3. Σχέση Μικροκυματικής Ακτινοβολίας – Υγρασίας Ακτινοβολούμενου Στόχου</u>	14
1.3.1. Εισαγωγή	14
1.3.2. Αλληλεπίδραση της Μικροκυματικής Ακτινοβολίας με Παραμέτρους του Φυσικού Περιβάλλοντος	16
1.3.3. Μοντέλα Συσχέτισης Μικροκυματικής Ακτινοβολίας και Εδαφικής Υγρασίας	19
<u>1.4 Μοντελοποίηση Ογκομετρικής Εδαφικής Υγρασίας Βάσει του Συντελεστή Οπισθοσκέδασης του Στόχου ενός Ενεργητικού Radar</u>	22
1.4.1. Εισαγωγή	22
1.4.2. Έμμεσος Προσδιορισμός Ογκομετρικής Εδαφικής Υγρασίας Βάσει Εμπειρικών Μοντέλων Οπισθοσκέδασης	23
1.4.3. Έμμεσος Προσδιορισμός Ογκομετρικής Εδαφικής Υγρασίας Βάσει Φυσικών Μοντέλων Οπισθοσκέδασης	27
<u>1.5 Αλληλεπίδραση Εδαφικής Υγρασίας - Συμβολομετρικής Φάσης (inSAR)</u>	30
2. Βιβλιογραφική Αναφορά Μοντέλων Οπισθοσκέδασης	33
<u>2.1. Μοντέλο Dubois</u>	33
<u>2.2. New Empirical Model (N.E.M.)</u>	33
<u>2.3. Μοντέλο Oh</u>	33
<u>2.4. Integral Equation Model (I.E.M.)</u>	34
3. Εφαρμογή Ανάλυσης Μοντέλων Οπισθοσκέδασης για τον Προσδιορισμό της Εδαφικής Υγρασίας	34
<u>3.1 Εισαγωγή</u>	34
<u>3.2. Περιοχές Ενδιαφέροντος</u>	34
3.2.1. Εισαγωγή - Γενικά Στοιχεία	34
3.2.2. Περιοχές Ενδιαφέροντος - Η.Π.Α.	35
3.2.3. Περιοχές Ενδιαφέροντος - Σουδάν - Νίγηρας	41
3.2.4. Περιοχές Ενδιαφέροντος - Αυστραλία	45
<u>3.3 Συλλογή Πρωτογενών Δεδομένων</u>	47

3.3.1. Συλλογή Επίγειων Δεδομένων	47
3.3.2. Συλλογή SAR Απεικονίσεων Sentinel-1	49
<u>3.4 Επεξεργασία Δεδομένων</u>	51
3.4.1. Προεπεξεργασία Επίγειων και Δορυφορικών Συνόλων Δεδομένων	51
3.4.2. Εξαγωγή Συνόλων Δεδομένων Μοντελοποιημένων Συντελεστών Οπισθοσκέδασης - Ογκομετρικής Εδαφικής Υγρασίας	54
<u>3.5. Ανάλυση Αποτελεσμάτων</u>	57
3.5.1. Εισαγωγή	57
3.5.2. Στατιστική Ανάλυση/Σύγκριση Συνόλων Μοντελοποιημένων κατά Dubois Συντελεστών Οπισθοσκέδασης και SAR Συντελεστών Οπισθοσκέδασης	59
3.5.3. Στατιστική Ανάλυση/Σύγκριση Μοντελοποιημένων κατά N.E.M. Συντελεστών Οπισθοσκέδασης και SAR Συντελεστών Οπισθοσκέδασης	65
3.5.4. Στατιστική Ανάλυση/Σύγκριση Μοντελοποιημένων κατά Oh Συντελεστών Οπισθοσκέδασης και SAR Συντελεστών Οπισθοσκέδασης	77
3.5.5. Στατιστική Ανάλυση/Σύγκριση Μοντελοποιημένων κατά I.E.M. Συντελεστών Οπισθοσκέδασης και SAR Συντελεστών Οπισθοσκέδασης	84
3.5.6. Στατιστική Ανάλυση/Σύγκριση Εξαγόμενων από τα Μοντέλα με Επίγεια Μετρημένων Συνόλων Ογκομετρικής Εδαφικής Υγρασίας	92
4. Διερεύνηση Χρήσης Εικόνων Κλεισίματος Φάσης για την Ανίχνευση Μεταβολών από Γεγονότα Βροχόπτωσης	102
<u>4.1. Εισαγωγή - Απαιτούμενα Δεδομένα</u>	102
<u>4.2. Μεθοδολογία Δημιουργίας Εικόνων Κλεισίματος Φάσης</u>	103
<u>4.3. Ανάλυση Αποτελεσμάτων</u>	105
5. Συμπεράσματα	108
<u>5.1 Γενικά Συμπεράσματα - Εφαρμογή Ανάλυσης Μοντέλων Οπισθοσκέδασης για τον Προσδιορισμό της Εδαφικής Υγρασίας</u>	108
<u>5.2 Γενικά Συμπεράσματα - Διερεύνηση Χρήσης Εικόνων Κλεισίματος Φάσης</u>	111
Βιβλιογραφία	113
Κατάλογος Σχημάτων	117
Κατάλογος Πινάκων	127

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η ανάλυση ορισμένων μεθόδων για τον προσδιορισμό της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας από εικόνες ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) Sentinel-1. Οι μέθοδοι αυτοί αφορούσαν αρχικά στην μοντελοποίηση του συντελεστή οπισθοσκέδασης του στόχου του ραντάρ (σε απεικονίσεις Sentinel-1 η συγκεκριμένη ποσότητα αναπαρίσταται μέσω των εικονοστοιχείων μιας ραδιομετρικά διορθωμένης απεικόνισης και ποσοτικοποιεί την οπισθοσκέδαση του σήματος του ραντάρ από τον στόχο) μέσω παραμέτρων με τους οποίους αλληλεπιδρά η μικροκυματική ακτινοβολία όπως είναι η γωνία πρόσπτωσης θ του σήματος, η εδαφική τραχύτητα μέσω των δεικτών $kHrms$ ή kL αλλά και η ίδια η εδαφική υγρασία mv . Επιπλέον, οι συγκεκριμένες μέθοδοι/μοντέλα χωρίζονται σε εμπειρικές και φυσικές υπό την έννοια ότι οι εμπειρικές μέθοδοι στηρίζονται σε απλές μαθηματικές σχέσεις που περιέχουν τους παράγοντες αλληλεπίδρασης (π.χ. $f(\theta, kHrms, mv)$ ή $f(\theta, kL, mv)$) ενώ οι φυσικές μέθοδοι στηρίζονται στο να ποσοτικοποιήσουν την οπισθοσκέδαση (ή γενικότερα την σκέδαση σε ορισμένο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα προς μια κατεύθυνση) από μια τραχεία επιφάνεια με χρήση φυσικομαθηματικών νόμων (π.χ. η αρχή Huygens–Fresnel, το θεώρημα εξαφάνισης Ewald–Oseen κ.α.) και συνήθως απαιτούν την πραγματοποίηση ορισμένων παραδοχών και προσεγγίσεων για λόγους υπολογιστικού κόστους και δυσκολίας.

Αναφορικά με την εφαρμογή που έγινε στο πλαίσιο της εργασίας, αυτή αφορούσε στον έμμεσο προσδιορισμό της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας σε 12 σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. (International Soil Moisture Network) μέσω ραδιομετρικά και γεωμετρικά διορθωμένων απεικονίσεων SAR Sentinel-1 G.R.D. (Ground Range Detected) και επίγειων δεδομένων από τους σταθμούς (εδαφική υγρασία, νετός κ.α.) για ένα χρονικό εύρος μερικών ετών. Αρχικά, για το ίδιο χρονικό εύρος υπολογίστηκαν οι μοντελοποιημένοι συντελεστές οπισθοσκέδασης από ορισμένες εμπειρικές και φυσικές μεθόδους (π.χ. μοντέλο Dubois, μοντέλο ολοκληρωτικών εξισώσεων ή I.E.M. κ.α.). Κατόπιν, βάσει των μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης και των συντελεστών οπισθοσκέδασης από τις SAR απεικονίσεις αλλά και μιας συνάρτησης κόστους η οποία ορίζεται από τις δύο αυτές ποσότητες, έγινε μέσω μιας μεθόδου μαθηματικής βελτιστοποίησης ο έμμεσος προσδιορισμός της εδαφικής υγρασίας η οποία συγκρίθηκε με τις επίγειες μετρήσεις εδαφικής υγρασίας. Επιπροσθέτως, πραγματοποιήθηκε και μια μικρή εφαρμογή στην οποία διερευνήθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης εικόνων κλεισίματος φάσης (κλειστός βρόχος συμβολομετρικών φάσεων από τριπλέτα SAR απεικονίσεων) για την ανίχνευση μεταβολών από γεγονότα βροχόπτωσης.

Τελικά, σε σχέση με τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την εφαρμογή των μοντέλων οπισθοσκέδασης για τον έμμεσο προσδιορισμό της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας, παρατηρείται ότι με βάση το φυσικό μοντέλο I.E.M. (Integral Equation Model) επιτυγχάνεται η καλύτερη προσαρμογή (βάσει του συντελεστή προσδιορισμού R^2 και των χρονοσειρών σύγκρισης) μεταξύ των συνόλων SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης αλλά και των συνόλων in-situ και μοντελοποιημένων τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας. Παράλληλα, όσον αφορά την χρήση εικόνων κλεισίματος φάσης για την ανίχνευση μεταβολών από γεγονότα βροχόπτωσης, δεν παράχθηκαν τα επιθυμητά αποτελέσματα και επομένως για τον συγκεκριμένο σκοπό ενδείκνυται περισσότερο η αξιοποίηση συμβολομετρικών χρονοσειρών.

Abstract

In the present thesis certain methods for the determination of the volumetric soil moisture content of a soil using Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) images were analyzed. These methods included the modeling of the backscatter coefficient of a radar target (in Sentinel-1 images this variable is represented by the pixels of a radiometrically and geometrically corrected image and it quantifies the backscattering of the radar signal from the target) through parameters that interact with the microwaves such as the incidence angle θ of the signal, the surface roughness through the indices $kHrms$ or kL and the volumetric soil moisture itself mv . Furthermore, these models are divided into empirical and physical models in the sense that the empirical methods are relatively simple mathematical relations that include the factors of backscattering (e.g. $f(\theta, kHrms, mv)$ or $f(\theta, kL, mv)$) while the physical methods are quantifying the backscattering (or in a more broad sense the scattering in a certain electromagnetic spectrum) of a rough surface with usage of physical and mathematical laws (e.g. the Huygens-Fresnel principle, the Ewald-Oseen extinction theorem e.t.c.) and usually demand the acceptance of some approximations for reasons of computational cost.

Regarding the application which was developed in the present thesis, it was about the computation of the volumetric soil moisture content in 12 stations of the I.S.M.N. (International Soil Moisture Network) through radiometrically and geometrically corrected SAR Sentinel-1 G.R.D. (Ground Range Detected) images and in-situ data (volumetric soil moisture, precipitation e.t.c.) for a time length of several years. Initially, for the same time length the modeled backscatter coefficients were computed using empirical and physical methods (e.g. Dubois model, Integral Equation Model - I.E.M. e.t.c.). Afterwards, based on the modeled backscatter coefficients and the backscatter coefficients from SAR images as well as on a cost function which is defined from these two parameters, the volumetric soil moisture content was computed indirectly (using an optimization method) which was then compared with the in-situ volumetric soil moisture content. Additionally, a small application was created where the possibility of using phase closure (closed loop of interferometric phase values from a triplet of SAR images) images for the detection of changes from rainfall events was evaluated.

Ultimately, regarding the conclusions which were made from the application of the backscattering models for the computation of the volumetric soil moisture content, it can be observed that using the I.E.M. (Integral Equation Model) physical model the best fit (based on the coefficient of determination R squared and the produced timeseries) between the SAR and modeled backscatter coefficients as well as the modeled and in-situ volumetric soil moisture values can be observed. Meanwhile, regarding the usage of phase closure images for the detection of changes from rainfall events, the desired results were not produced and therefore for this specific purpose inSAR time series are indicated as more suitable.

Σκοπός/Στόχοι Εργασίας

Ο κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των μεθόδων με τις οποίες γίνεται να προσδιοριστεί η ογκομετρική εδαφική υγρασία (μεμονωμένη τιμή ή χρονοσειρά τιμών) μιας έκτασης με χρήση SAR απεικονίσεων και όσο το δυνατόν γίνεται καλύτερη χωρική ανάλυση. Για το λόγο αυτό, τεκμηριώθηκε αρχικά θεωρητικά το σύνολο των παραμέτρων που σχετίζεται άμεσα με την αλληλεπίδραση μικροκυματικής ακτινοβολίας και ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας (εδαφική τραχύτητα, βάθος διείσδυσης) καθώς και ορισμένα μοντέλα τα οποία επιχειρούν να “εξηγήσουν” τις αλληλεπιδράσεις των άνωθεν παραμέτρων.

Έπειτα, στο επόμενο στάδιο της εργασίας δημιουργήθηκε η εφαρμογή ανάλυσης των μοντέλων οπισθοσκέδασης με σκοπό τον έμμεσο προσδιορισμό της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας. Το συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο αναπτύσσεται συνεχώς τις τελευταίες δεκαετίες λόγω του πλεονεκτήματος των SAR να δίνουν σειρές απεικονίσεων με μεγάλη χωρική και χρονική ανάλυση (10 μέτρα και 7 ημέρες για ορισμένες περιοχές κάλυψης του συμπλέγματος δορυφόρων Sentinel-1) και παντός καιρικών συνθηκών. Οι στόχοι που ετέθησαν για την εφαρμογή αφορούσαν την σύγκριση πολλαπλών μοντέλων οπισθοσκέδασης (λ.χ. μοντέλο Dubois, Integral Equation Model) σε αρκετά πεδία εφαρμογής ανά τον κόσμο και την “αντιστροφή” των μοντέλων (μαθηματική βελτιστοποίηση) για την εξαγωγή συνόλων/χρονοσειρών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας και την σύγκριση τους με σύνολα/χρονοσειρές επίγεια μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας. Τέλος, έγινε και μια μικρή αναφορά σε μια μεθοδολογία εντοπισμού μεταβολών που σχετίζονται με γεγονότα βροχόπτωσης (άρα και αυξομειώσεις στην εδαφική υγρασία) που αξιοποιεί την συμβολομετρική φάση.

1. Θεωρητικό Υπόβαθρο

1.1. Εδαφική Υγρασία

1.1.1. Εισαγωγή - Ορισμοί Εδαφικής Υγρασίας

Ένας απλός ορισμός που μπορεί να δοθεί για την περιγραφή της εδαφικής υγρασίας είναι αυτός του κατ' όγκου ή της κατά μάζα περιεκτικότητας μιας εδαφικής στρώσης σε νερό. Ως γνωστόν, μια εδαφική στρώση αποτελείται από στερεά συστατικά μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται κενοί χώροι ή πόροι (για αυτό το έδαφος χαρακτηρίζεται σαν ένα πορώδες μέσο) οι οποίοι πληρώνονται με αέρα ή νερό και καταλαμβάνουν περίπου το 40-50% του συνολικού όγκου του εδάφους [1]. Άρα με βάση τα παραπάνω μπορούν να θεμελιωθούν οι βασικές μαθηματικές σχέσεις της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας:

$$\theta = \frac{V_v}{V_0} \quad (1) \qquad \omega = \frac{m_v}{m_0} \quad (2)$$

όπου V_v και m_v ο όγκος και η μάζα περιεκτικότητας σε νερό του εδαφικού στρώματος αντίστοιχα

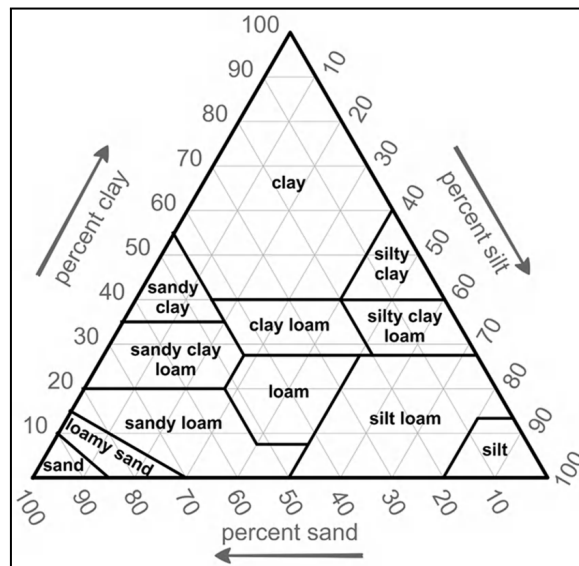
V_0 και m_0 ο συνολικός όγκος και η μάζα περιεκτικότητας του εδαφικού στρώματος αντίστοιχα

Ειδικότερα, μπορούν να οριστούν 3 διαφορετικές μορφές εδαφικής υγρασίας, το ελεύθερο νερό το οποίο με την επίδραση της βαρύτητας κινείται προς τα κατόντη από τους πόρους μεγάλου μεγέθους και απορρέει από το έδαφος μέσα σε 2-3 μέρες μετά από ένα γεγονός βροχόπτωσης, η τριχοειδής εδαφική υγρασία η οποία συγκρατείται από το έδαφος μέσω των πόρων μικρού μεγέθους και είναι υπεύθυνη για όλες τις φυσικοχημικές αλληλεπιδράσεις εδάφους περιβάλλοντος και η υγροσκοπική εδαφική υγρασία η οποία συγκρατείται σε ένα λεπτό στρώμα γύρω από τα μόρια της εδαφικής στρώσης και δεν είναι διαθέσιμη για την ανάπτυξη της βλάστησης (τα πηλώδη εδάφη είναι πιο πλούσια σε υγροσκοπική εδαφική υγρασία) [6]. Επίσης, βάσει της τριχοειδούς εδαφικής υγρασίας μπορεί να οριστεί και η υδατοικανότητα, δηλαδή το ποσό του νερού το οποίο μένει στο έδαφος αφού απορρέυσει το ελεύθερο νερό καθώς και το μόνιμο σημείο μαρασμού, δηλαδή το σημείο στο οποίο η διαθέσιμη εδαφική υγρασία δεν επαρκεί και η βλάστηση αρχίζει να μαραίνεται [2]. Τέλος, η διαθέσιμη για την βλάστηση εδαφική υγρασία ορίζεται ως η διαφορά της υδατοικανότητας από το μόνιμο σημείο μαρασμού.

1.1.2. Παράγοντες Επίδρασης Εδαφικής Υγρασίας

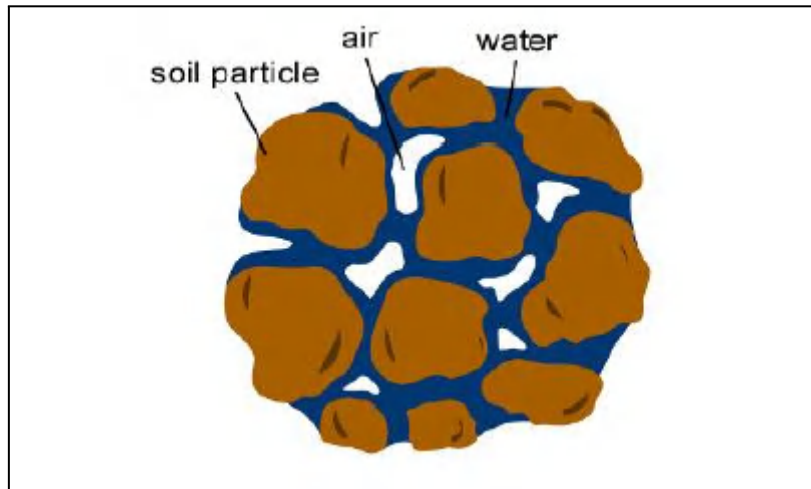
Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ποσοστιαία εδαφική υγρασία μιας στρώσης καθώς και την διαχρονική μεταβολή της είναι η υφή του εδάφους, η δομή του εδάφους, η κατανομή των πόρων και η παρουσία οργανικών υλικών. Ξεκινώντας από την υφή ή μηχανική σύσταση μιας εδαφικής στρώσης, αυτή σχετίζεται με το μέγεθος των κόκκων που απαρτίζουν την εδαφική στρώση με τα εδάφη να κατηγοριοποιούνται σε αμμώδη (μέγεθος κόκκων από 0.05 mm έως τα 2.00 mm), ιλώδη (μέγεθος κόκκων από 0.002 mm έως τα 0.05 mm) και αργιλώδη (μέγεθος κόκκων μικρότερο από 0.002 mm). Αφετέρου, με βάση το τριγωνικό διάγραμμα της Διοικήσεως Δημοσίων Οδών των Η.Π.Α., γίνεται η τελική κατάταξη των εδαφών με βάση τα ποσοστά τους σε αμμώδεις, ιλώδεις και αργιλώδεις κόκκους (π.χ. ένα εδαφικό δείγμα που περιέχει κατά βάρος 60% άμμο, 30% ιλύ και 10%

άργιλο χαρακτηρίζεται σαν αμμοπηλώδες (SL)). Η σχέση μεταξύ της υφής του εδάφους και της εδαφικής υγρασίας εκδηλώνεται μέσω της δυνατότητας συγκράτησης του νερού από τις εδαφικές στρώσεις όπου τα χονδρόκοκκα εδάφη (εδάφη με μεγάλο ποσοστό σε άμμο) συγκρατούν λιγότερο νερό σε σχέση με τα λεπτόκοκκα εδάφη [5].

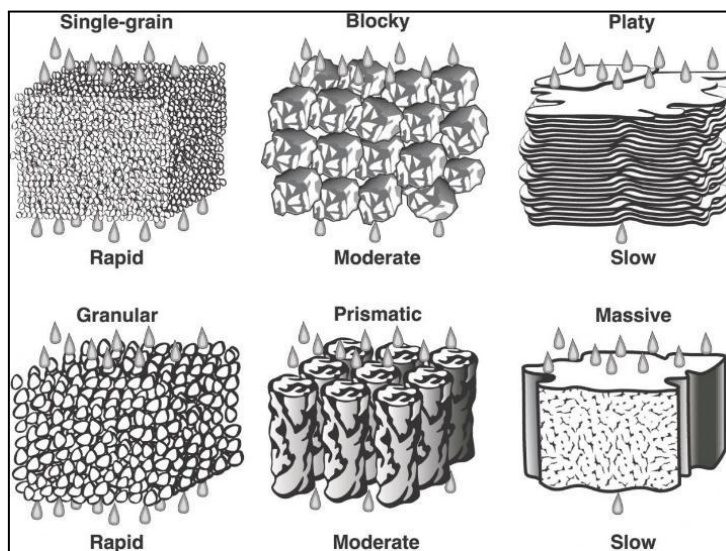


Σχήμα 1. Τριγωνικό διάγραμμα κατάταξης εδαφικών μειγμάτων με βάση τα ποσοστά σε άμμο, ιλύ ή άργιλο (πηγή: Διοίκηση Δημοσίων Οδών των Η.Π.Α.).

Δύο άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν συνδυαστικά την εδαφική υγρασία μιας στρώσης είναι το μέγεθος των πόρων και η δομή του εδάφους. Ειδικότερα, σε σχέση με το μέγεθος των πόρων, έχει παρατηρηθεί ότι τα εδάφη τα οποία περιέχουν πόρους μικρού μεγέθους (π.χ. οργανικά εδάφη και πηλώδη εδάφη) έχουν την καλύτερη δυνατότητα συγκράτησης νερού (αναφέρθηκε στην προηγούμενο ενότητα ως τριχοειδής εδαφική υγρασία) και προσφέρονται για την ανάπτυξη βλάστησης λόγω του γεγονότος ότι στους μικρούς πόρους αναπτύσσονται μεγαλύτερες δυνάμεις προσκόλλησης (δυνατότητα ενός μορίου να προσκολληθεί σε ένα μόριο εδάφους) και συνοχής (δυνατότητα μορίων νερού να προσκολληθούν με τον εαυτό τους ή με άλλα μόρια νερού). Αντίθετα, τα εδάφη με μεγάλο μέγεθος πόρων απορρέουν το νερό γρήγορα λόγω βαρύτητας και επομένως οι συγκεκριμένοι πόροι πληρώνονται σε μεγαλύτερο ποσοστό από αέρα και δεν είναι κατάλληλοι για την ανάπτυξη βλάστησης. Σε σχέση με την δομή του εδάφους, αυτή νοείται ως ο τρόπος με τον οποίο κατανομονται τα διάφορα εδαφικά τεμαχίδια (άμμος, ιλύς, άργιλος) σε εδαφικά σύνολα (soil aggregates – peds). Συγκεκριμένα, ανάλογα με την δομή τους τα εδάφη διακρίνονται σε κοκκώδη (τα εδαφικά σύνολα είναι μικρά και σφαιρικά), πλατιά (τα εδαφικά σύνολα έχουν επίπεδο σχήμα και οριζόντια διάταξη), χονδρά (τα εδαφικά σύνολα είναι μεγάλα και σχηματίζουν οξείες γωνίες στις απολήξεις τους) και πρισματικά (τα εδαφικά σύνολα έχουν σχήμα παραλληλογράμμου με τα κατακόρυφα τμήματα να είναι μεγαλύτερα από τα οριζόντια). Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι σε εδάφη με κοκκώδη δομή το νερό κινείται πιο γρήγορα προς τα κατάντη λόγω βαρύτητας σε σχέση με εδάφη που έχουν πλατιά δομή όπως φαίνεται και στο σχήμα 3 [4].



Σχήμα 2. Σκαρίφημα ιδεατής κατανομής τεμαχιδίων εδάφους και πόρων που συμπληρώνονται με αέρα ή νερό (πηγή: University of Nevada. (2009). Nevada's Soils – Worth the Toil. <https://extension.unr.edu/publication.aspx?PubID=3066>).



Σχήμα 3. Δομή του εδάφους σε σχέση με την κίνηση του νερού μέσα σε αυτά (πηγή: U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1991. Section 15 Irrigation National Engineering Handbook, 2nd ed., Figure 1-3.).

1.1.3. Σημασία της Εδαφικής Υγρασίας για την Φύση και τις Ανθρωπογενείς Δραστηριότητες

Η μελέτη της εδαφικής υγρασίας και άλλων συνοδών εδαφολογικών παραμέτρων είναι ύψιστης σημασίας καθώς επηρεάζει διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες και περιβαλλοντικές μεταβλητές. Η κυριότερη ανθρώπινη δραστηριότητα στην οποία η εδαφική υγρασία υπεισέρχεται σαν σημαντικός παράγοντας είναι η βελτιστοποίηση της αγροτικής παραγωγής η οποία επιτυγχάνεται μέσω της διατήρησης των αερίων και υδατικών πόρων μιας εδαφικής στρώσης στα επιθυμητά επίπεδα. Περαιτέρω, η βελτιστοποίηση αυτή υλοποιείται μέσω των διεργασιών των αρδεύσεων (τεχνητή προσαγωγή και χορήγηση του νερού με διάφορες μεθόδους) και των στραγγίσεων (τεχνητή απομάκρυνση νερού από την ανώτερη εδαφική στρώση) [1]. Μάλιστα, στο συνεχώς εξελισσόμενο περιβάλλον της κλιματικής αλλαγής η γνώση της εδαφικής υγρασίας καθώς και της χωροχρονικής της εξέλιξης είναι καίρια σημασίας για την αντιμετώπιση των αρνητικών επιπτώσεων της όπως είναι τα φαινόμενα ξηρασίας των οποίων η συχνότητα είναι αυξημένη τα τελευταία χρόνια.

Προχωρώντας και σε άλλες ανθρωπογενείς δραστηριότητες οι οποίες επηρεάζονται από την εδαφική υγρασία, μερικές από αυτές είναι οι μελέτες υδατικού ισοζυγίου (διερεύνηση για το αν οι εισροές του υδρολογικού κύκλου σε μια λεκάνη απορροής, δηλαδή ο υετός, η άρδευση, η αλλαγή του περιεχόμενου νερού της εδαφικής κατανομής ισούνται με τις εκροές, δηλαδή την εξατμισοδιαπνοή, την επιφανειακή απορροή και την βαθιά διήθηση), η ανάλυση ευστάθειας των εδαφικών πρηνών (σε αμμώδη εδάφη με μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό των οποίων οι πόροι δεν είναι κορεσμένοι έχει αποδειχθεί ότι η γωνία εσωτερικής τριβής είναι μεγαλύτερη σε σχέση με εδάφη με μικρή περιεκτικότητα σε νερό, κάτι το οποίο αυξάνει την διατμητική αντοχή των συγκεκριμένων εδαφών σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb [6]) και η γεωτεχνική αξιολόγηση ορισμένων κατασκευών όπως οι θεμελιώσεις των τεχνικών έργων, τα γεωφράγματα κ.α. [7].

1.1.4. Τρόποι και Μεθοδολογίες Προσδιορισμού της Εδαφικής Υγρασίας

Οι κλασικές μέθοδοι προσδιορισμού της εδαφικής υγρασίας είναι η θερμο-βαρυτομετρική μέθοδος και η μέθοδος του καρβιδίου του ασβεστίου [7]. Από τις 2 αυτές μεθόδους, η θερμο-βαρυτομετρική μέθοδος είναι η πιο προσιτή αλλά και πιο διαδεδομένη και περιλαμβάνει την τοποθέτηση ενός εδαφικού δείγματος σε φούρνο στους 105 βαθμούς Κελσίου για 24 ώρες (στόχος αυτής της διαδικασίας είναι η εξάτμιση της εδαφικής υγρασίας μέσα στο μείγμα) με την τελική ογκομετρική ή βαρυτομετρική υγρασία να προκύπτει ως το πηλίκο του όγκου ή μάζας του “στεγνού” εδαφικού δείγματος (μετά από την τοποθέτηση του στον φούρνο) προς τον όγκο ή τη μάζα του αρχικού εδαφικού μείγματος. Από την άλλη, με τη μέθοδο του καρβιδίου του ασβεστίου η εδαφική υγρασία προσδιορίζεται από την πίεση του αερίου (ασετυλίνη) που απελευθερώνεται από την αντίδραση του καρβιδίου του ασβεστίου με την εδαφική υγρασία σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Το κύριο μειονέκτημα των παραπάνω μεθόδων είναι η καταστρεπτικότητα που επιφέρουν σε ορισμένες συνιστώσες του εδαφικού δείγματος (π.χ. οργανικά συστατικά) λόγω της θερμότητας (θερμό-βαρυτομετρική μέθοδος) ή των χημικών αντιδράσεων (μέθοδος του καρβιδίου του ασβεστίου). Επίσης, σε ορισμένα εδάφη ακόμα και μετά τη επιτυχημένη εκτέλεση των παραπάνω μεθόδων μπορεί να παραμείνει “παγιδευμένη” εδαφική υγρασία στο εναπομένον δείγμα (ισχύει για ορισμένες κατηγορίες πηλωδών εδαφών).

Αναφορικά με τις σύγχρονες μεθόδους που αξιοποιούνται τα τελευταία χρόνια, η πιο γνωστή και διαδεδομένη είναι η μέθοδος T.D.R. (Time Domain Reflectometry) μέσω της οποίας προσδιορίζεται το πραγματικό μέρος της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς με τη μιγαδική διηλεκτρική σταθερά να ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$e = e_r + i \left[e_j + \left(\frac{\sigma_0}{\omega \epsilon_0} \right) \right] \quad (3)$$

όπου e_r το πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς ή φαινόμενη διηλεκτρική σταθερά

e_j το φανταστικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς

σ_0 η ηλεκτρική αγωγιμότητα στο κενό

ϵ_0 η ηλεκτρική επιτρεπτότητα στο κενό)

Η βασική λειτουργία ενός οργάνου μέτρησης εδαφικής υγρασίας T.D.R. υλοποιείται μέσω μιας διάταξης ενός ταλαντωτή ο οποίος εκπέμπει πολλούς παλμούς (στο εύρος συχνοτήτων 1 MHz έως 1 GHz) οι οποίοι ανακλώνται στην απώληξη ενός ή περισσότερων διαξονικών καλωδίων (ή γραμμών μετάδοσης) όπου καταγράφεται το πλάτος των επιστρεφόμενων παλμών. Ειδικότερα, με την συγκεκριμένη μέθοδο μπορεί να προσδιοριστεί η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος εντός της γραμμής μετάδοσης σαν συνάρτηση της φαινόμενης διηλεκτρικής σταθεράς:

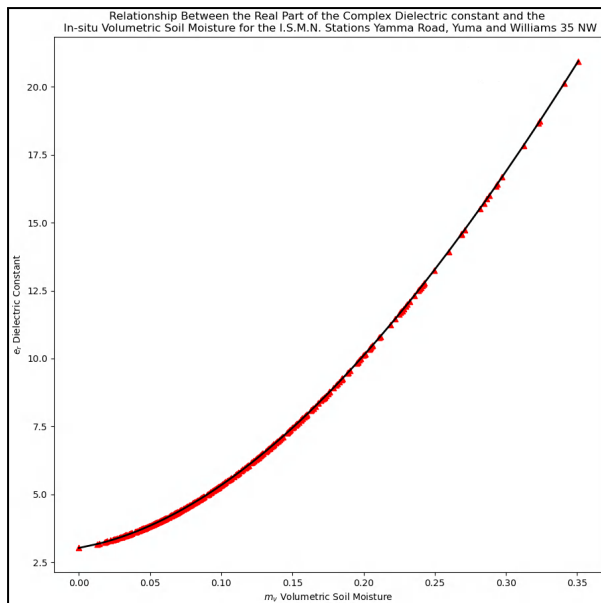
$$V = \frac{c}{\sqrt{e_r \frac{1 + \sqrt{1 + \tan^2 \delta}}{2}}} \quad (4), \quad \tan \delta = \frac{e_j + \left(\frac{\sigma_0}{\omega \epsilon_0} \right)}{e_r}$$

Εφόσον ισχύει ότι το $\tan \delta$ είναι πολύ μικρότερο από την μονάδα η προηγούμενη σχέση μπορεί να γραφτεί ως:

$$V \approx \frac{c}{e_r}$$

Από τα πειράματα που έγιναν από τους Torp et. al. όπου προσδιορίστηκε για εδάφη με γνωστή ογκομετρική εδαφική υγρασία η φαινόμενη διηλεκτρική σταθερά, παρατηρήθηκε μια καλή συμφωνία μεταξύ της γνωστής εδαφικής υγρασίας για κάθε δείγμα και της μετρούμενης με την μέθοδο T.D.R. φαινόμενης διηλεκτρικής σταθεράς όπως φαίνεται στο σχήμα 5 όπου μπορεί να παρατηρηθεί η εκθετική αύξηση των τιμών της φαινόμενης διηλεκτρικής σταθεράς όσο αυξάνεται η ογκομετρική εδαφική υγρασία με την βέλτιστη ευθεία μεταξύ των 2 μεγεθών να μην αποκλίνει σημαντικά από τις μετρήσεις που έγιναν στα εδαφικά δείγματα (το σφάλμα της προσδιοριζόμενης από την βέλτιστη καμπύλη ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας δεν ξεπερνά το 1.5% κατά μέσο όρο). Επίσης, η μεταβλητότητα στην υφή του εδάφους και την θερμοκρασία δεν φάνηκαν να επηρεάζουν την μορφή της βέλτιστης καμπύλης ενώ τέλος η βέλτιστη καμπύλη βαθμονομήθηκε ώστε να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για επί τόπου μετατροπή της μετρούμενης φαινόμενης διηλεκτρικής σταθεράς σε ογκομετρική εδαφική υγρασία βάσει της παρακάτω σχέσης:

$$\theta_v = - 5.3 * 10^{-2} + 2.92 * 10^{-2} e_r - 5.5 * 10^{-4} e_r^2 + 4.3 * 10^{-6} e_r^3 \quad (5) [8]$$



Σχήμα 4. Διάγραμμα σύγκρισης της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας που μετρήθηκε στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. με την αντίστοιχη φαινόμενη διηλεκτρική σταθερά που προσδιορίστηκε από την εμπειρική σχέση των Torpp et al. 1980 μαζί με την βέλτιστη καμπύλη των 2 μεγεθών από την οποία μπορεί να παρατηρηθεί η μεγάλη στατιστική συσχέτιση μεταξύ τους (αριστερή εικόνα) και τυπική διάταξη ενός οργάνου μέτρησης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας με την μέθοδο T.D.R. (δεξιά εικόνα)

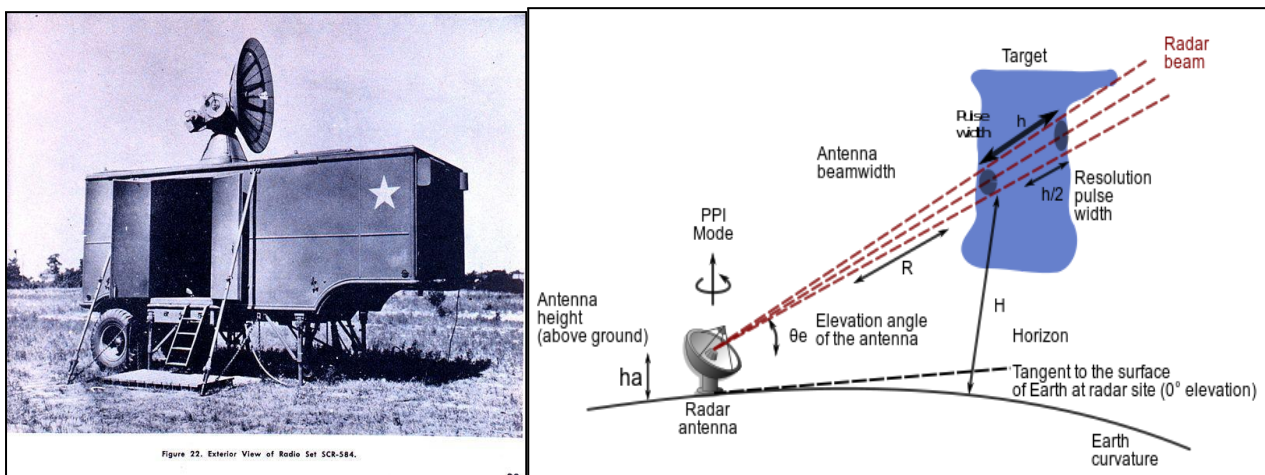
Μερικές άλλες σύγχρονες μέθοδοι που αναφέρονται στην βιβλιογραφία για τον προσδιορισμό της εδαφικής υγρασίας αλλά θα αναφερθούν συνοπτικά καθώς δεν χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι η μέθοδος διασποράς νετρονίων (εκπέμπει νετρόνια υψηλής ενέργειας και προσδιορίζει την εδαφική υγρασία έμμεσα από τα χαμηλότερης ενέργειας νετρόνια που επιστρέφουν πίσω), η μέθοδος F.D.R. – Frequency Domain Reflectometry (με την συγκεκριμένη μέθοδο προσδιορίζεται πάλι η φαινόμενη διηλεκτρική σταθερά αλλά δεν θεωρείται τόσο ακριβής διότι εμφανίζει υψηλή ευαισθησία σε παραμέτρους όπως η υφή και ο τύπος του εδάφους), οι μέθοδοι που βασίζονται σε οπτικές εικόνες σε συγκεκριμένα μήκη κύματος του εγγύος υπέρυθρου (π.χ. 1450, 1940 και 2950 nm) κ.α..

1.2. Ενεργητική Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση – (RADAR)

1.2.1. Εισαγωγή - Ιστορικό Υπόβαθρο

Οι απαρχές των ενεργητικών μικροκυματικών δεκτών ή Radar (Radio detection and ranging) μπορούν να βρεθούν στα πειράματα του Heinrich Hertz από το 1880 όταν απέδειξε τις εξισώσεις του Maxwell στα ραδιοκύματα (εκείνη την εποχή δεν είχε γίνει ακόμα ο διαχωρισμός μεταξύ των ραδιοκυμάτων και των μικροκυμάτων που πλέον γειτνιάζουν στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα) τα οποία εν προκειμένω αποτελούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα όπως και το ορατό φως. Το ειδικότερο συμπέρασμα των εξισώσεων του Maxwell αφορά στην ανάκλαση των ραδιοκυμάτων από μεταλλικές επιφάνειες και στην διάθλαση από διηλεκτρικά μέσα (π.χ. υγρές επιφάνειες) όπως και πάλι ισχύει και για το ορατό

φως. Η συγκεκριμένη τεχνολογία άρχισε να αναπτύσσεται σε μεγάλη κλίμακα μόνο από τα τέλη της δεκαετίας του 1930 και μετά λόγω της ανάγκης έγκαιρου εντοπισμού εχθρικών βομβαρδιστικών αεροσκαφών μεγάλης εμβέλειας με την μορφή του μονοστατικού Radar (χρήση μοναδικής κεραίας για την μετάδοση και λήψη παλμών μικροκυματικής ακτινοβολίας). Μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο και έπειτα η τεχνολογία των Radar εξελίχθηκε περαιτέρω με την εφαρμογή της σε πεδία εκτός της άμυνας λόγω της αξιοποίησης της αρχής του Doppler (μεταβολή της καταγραφόμενης συχνότητας από ένα μηχανικό ή ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο σημείο A λόγω της σχετικής κίνησης του πομπού των μηχανικών ή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων) η οποία θεωρείται μέσω της συχνότητας Doppler. Η συχνότητα Doppler στα συστήματα Radar εφαρμόζεται τις τελευταίες δεκαετίες για την λειτουργία των ραντάρ καταγραφής ταχύτητας, για την δημιουργία δορυφορικών ή εναέριων απεικονίσεων Radar Συνθετικού Ανοίγματος μεγάλης χωρικής και χρονικής ανάλυσης ανεξαιρέτως ώρας ή καιρικών συνθηκών (η συγκεκριμένη τεχνολογία θα αναλυθεί εκτενώς στις επόμενες ενότητες και στα επόμενα κεφάλαια), για την καταγραφή της κίνησης των αεροσκαφών σε έναν συγκεκριμένο εναέριο χώρο, για την παρακολούθηση μεγάλων καταιγίδων και για τον έγκαιρο εντοπισμό διατμητικών ανέμων (άνεμοι με μεγάλη μεταβλητότητα στην ταχύτητα και την κατεύθυνση τους οι οποίοι προκύπτουν λόγω διατμητικών τάσεων από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και είναι πολύ επικίνδυνοι για την κυκλοφορία των επιβατικών αεροπλάνων) [9].

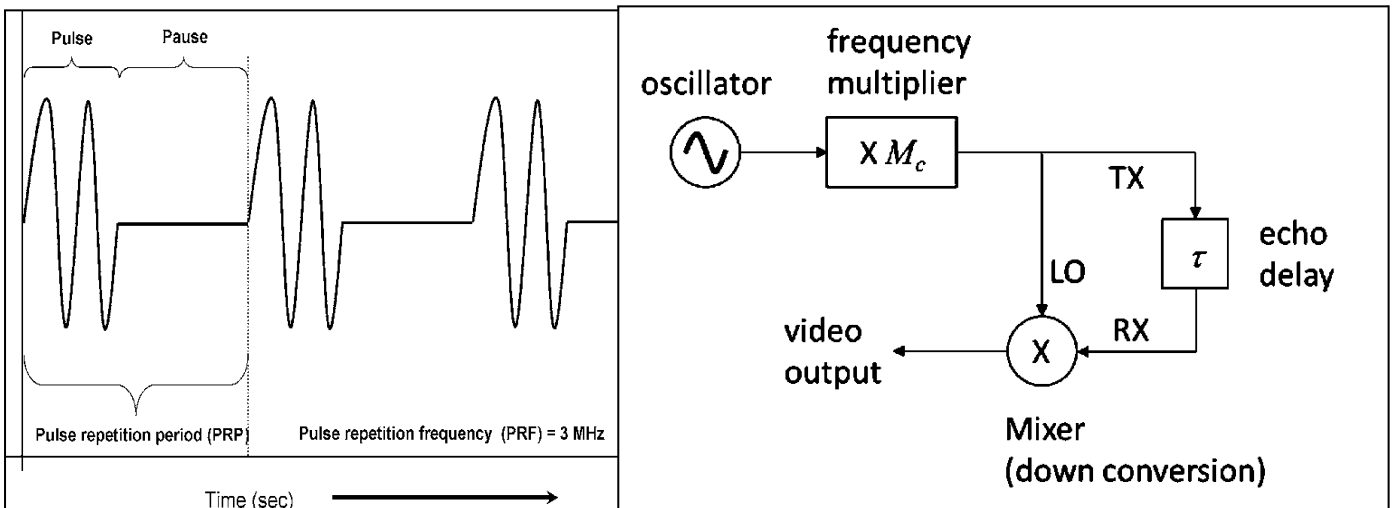


Σχήμα 5. Αποψη του Radar SCR-584 το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο από τις Αμερικανικές Ένοπλες Δυνάμεις για αεράμυνα (αριστερή εικόνα) και σχηματική αναπαράσταση προσδιορισμού του υψομέτρου από την φυσική Γήινη επιφάνεια ενός μετεωρολογικού στόχου από ένα Doppler Radar (δεξιά εικόνα).

1.2.2. Βασικές Αρχές Λειτουργίας Radar

Μια βασική διάταξη ενός απλού Radar συστήματος για την δημιουργία μιας Radar εικόνας αποτελείται από το σύστημα ελέγχου του χρόνου και της συχνότητας των παλμών, έναν αναμεταδότη παλμών εντός του συστήματος, μια κεραία η οποία λειτουργεί ταυτόχρονα σαν πομπός και δέκτης του εκπεμπόμενου και οπισθοσκεδαζόμενου από κάποιο στόχο σήματος, έναν ενισχυτή και αποδιαμορφωτή του λαμβανόμενου οπισθοσκεδαζόμενου σήματος και έναν μετατροπέα του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό για την παραγωγή του τελικού μιγαδικού σήματος (σαν μιγαδικό σήμα νοούνται οι πραγματικές και φανταστικές συνιστώσες του Radar σήματος που συνεισφέρουν σε ένα εικονοστοιχείο μιας radar απεικόνισης).

Ειδικότερα, σε σχέση με το σύστημα ελέγχου του χρόνου και της συχνότητας των παλμών, την χρονική στιγμή t η γεννήτρια παλμών παράγει μια παλμοσειρά i συγκεκριμένης φάσης αναφοράς φ_i ενώ οι διαδοχικές στον χρόνο παλμοσειρές παράγονται με συχνότητα παραγωγής παλμών PRF (σύνολο παλμών που παράγονται σε μια μονάδα του χρόνου και ορίζει την μέγιστη πλευρική απόσταση ή range R_{max} που μπορεί να διανύσει ο παλμός). Έπειτα, ο παλμός Radar διαμορφώνεται κατά συχνότητα (πολλαπλασιασμός σήματος με φέρουσα συχνότητα $\cos \omega_c t$) έτσι ώστε αυτός να έχει κατάλληλη ισχύ και διάρκεια ενώ και η συχνότητα του παλμού θα πρέπει να παραμείνει σταθερή καθώς το αρχικό σήμα έχει μεταβαλλόμενη συχνότητα. Σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας ο παλμός μεταδίδεται μέσα στο σύστημα, εξέρχεται μέσω του κυκλοφορητή και λαμβάνεται η ηχώ του σήματος από την οπισθοσκέδαση στον ακτινοβολούμενο στόχο. Στο τελευταίο στάδιο της διαδικασίας, επειδή η ηχώ του σήματος έχει σημαντικά μικρότερη ισχύ από το παραγόμενο σήμα, αυτή ενισχύεται από έναν ενισχυτή χαμηλού θορύβου και κατόπιν, για να αφαιρεθεί η φέρουσα συχνότητα από το επιστρεφόμενο σήμα - ηχώ και ένα μέρος του θορύβου που εισάγεται με την ενίσχυση χαμηλού θορύβου, το επιστρεφόμενο σήμα πολλαπλασιάζεται με μια ημιτονοειδή κυματομορφή με διαφορά φάσης 0° (in-phase συνιστώσα) και με μια συνημιτονοειδή κυματομορφή με διαφορά φάσης 90° με το τελικό σήμα να φιλτράρεται με ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης [10].



Σχήμα 6. Γραφική παρουσίαση της περιόδου και συχνότητας παραγωγής παλμών για ένα περιοδικό φαινόμενο [11] (αριστερή εικόνα) και ενδεικτική γραφική παρουσίαση μιας βασικής διάταξης ενός συστήματος Radar όπου ως “oscillator” νοείται η γεννήτρια παλμών, ως “frequency multiplier” ο διαμορφωτής, ως “echo delay” η διαδικασία λήψης του οπισθοσκεδασμένου από έναν στόχο παλμού και ως “Mixer” ο αποδιαμορφωτής [12] (δεξιά εικόνα).

Σχετικά με την ισχύ του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος, αυτή μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση του Radar:

$$R_r = \frac{P_r G_0^2 \lambda^2 \sigma_r}{4\pi^3 R^4 L} \quad (5)$$

όπου P_r η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος,

G_0 το κέρδος της κεραίας,

λ το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου σήματος,

σ_r η ενεργός διατομή του στόχου (υποθετική έκταση σε τετραγωνικά μέτρα η οποία σκεδάζει ιστροπικά την πυκνότητα ισχύος του προσπίπτοντος σήματος του Radar και η οποία εκφράζει πρακτικά την “ανιχνευσιμότητα” ενός αντικειμένου στον χώρο από ένα σύστημα Radar),

R η πλευρική απόσταση (range) μεταξύ του Radar και του στόχου και

L οι απώλειες του συστήματος.

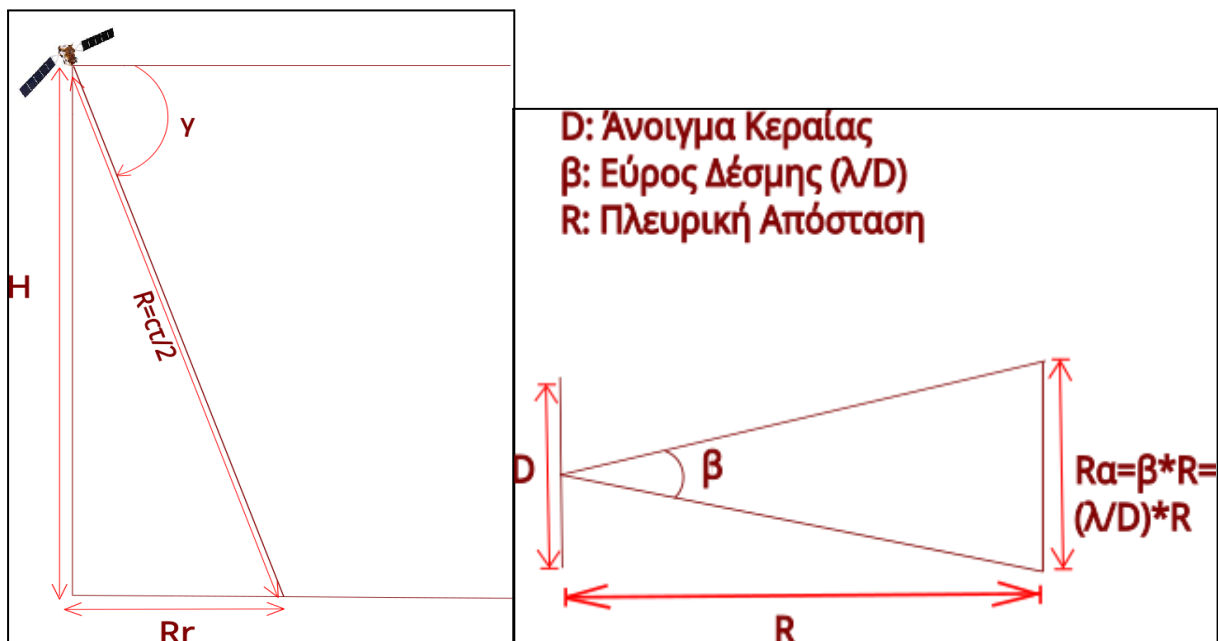
Τέλος, μια παράμετρος που είναι πολύ σημαντική στα απεικονιστικά Radar είναι η διακριτική ικανότητα του Radar στην διεύθυνση την κάθετη στην γραμμή πτήσης (range resolution) και η διακριτική ικανότητα στην διεύθυνση των αζιμουθιων. Συγκεκριμένα, η διακριτική ικανότητα στην διεύθυνση την κάθετη στην γραμμή πτήσης εξαρτάται από τον χρόνο εκπομπής ενός παλμού (τ) εφόσον ουσιαστικά $R = c\tau/2$ και για να γίνει η αναγωγή σε επίγεια απόσταση προκύπτει ότι:

$$R_r = \frac{c\tau}{2\cos\gamma} \quad (6)$$

όπου γ η γωνία συμπίεσης (ή συμπληρωματική της γωνίας πρόσπτωσης του παλμού).

Ο τρόπος με τον οποίο βελτιώνεται η διακριτική ικανότητα στην διεύθυνση την κάθετη στην γραμμή πτήσης είναι μέσω της μεθόδου chirp. Η διακριτική ικανότητα στην διεύθυνση των αζιμουθιων εξαρτάται εξαρτάται από το εύρος δέσμης με βάση τον νόμο περίθλασης του Rayleigh $\beta = \lambda/D$, όπου D το μήκος της κεραίας. Άρα η διακριτική ικανότητα στην διεύθυνση των αζιμουθιων εξαρτάται από το μήκος της κεραίας (ή άνοιγμα) του Radar συστήματος και ισούται με:

$$R_a = \beta R = \frac{\lambda R}{D} \quad (7).$$



Σχήμα 7. Γραφική απόδοση των γεωμετρικών αρχών με βάση τις οποίες προκύπτουν οι τύποι για τον υπολογισμό της διακριτικής ικανότητας του Radar στην διεύθυνση την κάθετη στην γραμμή πτήσης (αριστερή εικόνα) και στην διεύθυνση των αζιμουθίων (δεξιά εικόνα)

1.2.3. Radar Συνθετικού Ανοίγματος

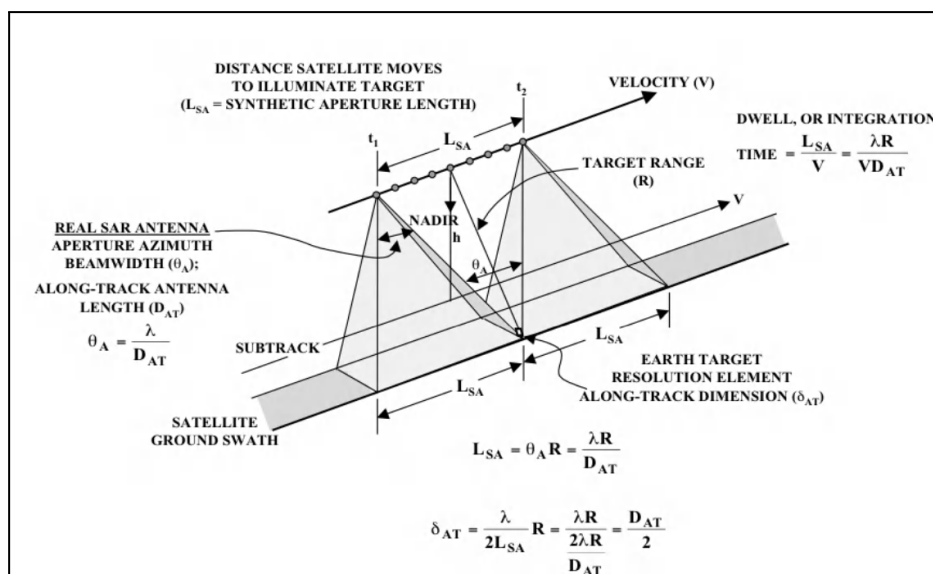
Το κίνητρο για την ανάπτυξη των Radar Συνθετικού Ανοίγματος (SAR) προέκυψε από την μεγάλη μείωση στην διακριτική ικανότητα του Radar στην διεύθυνση των αζιμουθίου με την αύξηση του ύψους πτήσης της πλατφόρμας που μεταφέρει το Radar σύστημα. Παραδείγματος χάρη, θεωρώντας ένα Radar σύστημα το οποίο φέρεται από δορυφόρο σε ύψος $H = 800 \text{ km}$ με χρόνο εκπομπής παλμού $\tau = 100 \text{ ns}$, μήκος κύματος $\lambda = 0.055 \text{ m}$ και άνοιγμα κεραίας $D = 10 \text{ m}$ προκύπτει για την διακριτική ικανότητα ενός στόχου που ακτινοβολείται με γωνία πρόσπτωσης $\theta = 45^\circ$ στην διεύθυνση την κάθετη στην γραμμή πτήσης:

$$R_r = \frac{c\tau}{2\sin\theta} = 21.199 \text{ m}.$$

Βέβαια, η διακριτική ικανότητα στην διεύθυνση των αζιμουθίων δυσχεραίνεται ιδιαίτερα από το γεγονός ότι είναι συνάρτηση του ύψους πτήσης του Radar συστήματος και επομένως με τα δεδομένα που δόθηκαν πριν προκύπτει ότι:

$$R_a = \beta R = \frac{\lambda R}{D} = 4400 \text{ m}.$$

Ένας τρόπος με τον οποίο μπορεί να λυθεί αυτό το πρόβλημα είναι μέσω των ραντάρ συνθετικού ανοίγματος όπου η διακριτική ικανότητα στην διεύθυνση των αζιμουθίων γίνεται ανεξάρτητη από το ύψος πτήσης του συστήματος αξιοποιώντας το μήκος του συνθετικού ανοίγματος κατά το οποίο το Radar ακτινοβολεί προς τον ίδιο στόχο επί της φυσικής γήινης επιφάνειας.



Σχήμα 8. Διάγραμμα τεκμηρίωσης διακριτικής ικανότητας κατά την διεύθυνση των αζιμουθίων στα Radar Συνθετικού Ανοίγματος [13].

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, το εύρος δέσμης του Radar κατά την διεύθυνση των αζιμουθίων σε μία χρονική στιγμή t_i (ουσιαστικά το γωνιακό μέγεθος το οποίο με βάση το εύρος περίθλασης του Rayleigh δίνει την ακτινοβολούμενη από το Radar περιοχή στην διεύθυνση των αζιμουθίων) δίνεται από την σχέση:

$$\theta_{\alpha} = \frac{\lambda}{D} \quad (8)$$

όπου D το πραγματικό μήκος της κεραίας.

Κατόπιν, το μήκος του συνθετικού ανοίγματος ισούται με:

$$L_{SA} = \theta_{\alpha} R_0 = \frac{\lambda R_0}{D} \quad (9)$$

όπου R_0 η μικρότερη πλευρική απόσταση Radar – στόχου για δεδομένο μήκος συνθετικού ανοίγματος.

Τέλος, γνωρίζοντας το μήκος συνθετικού ανοίγματος το εύρος δέσμης μπορεί να οριστεί ως:

$$\theta_{\alpha} = \frac{\lambda}{2L_{SA}} \quad (10)$$

Επομένως η διακριτική ικανότητα στην διεύθυνση των αζιμουθίων θα ισούται με:

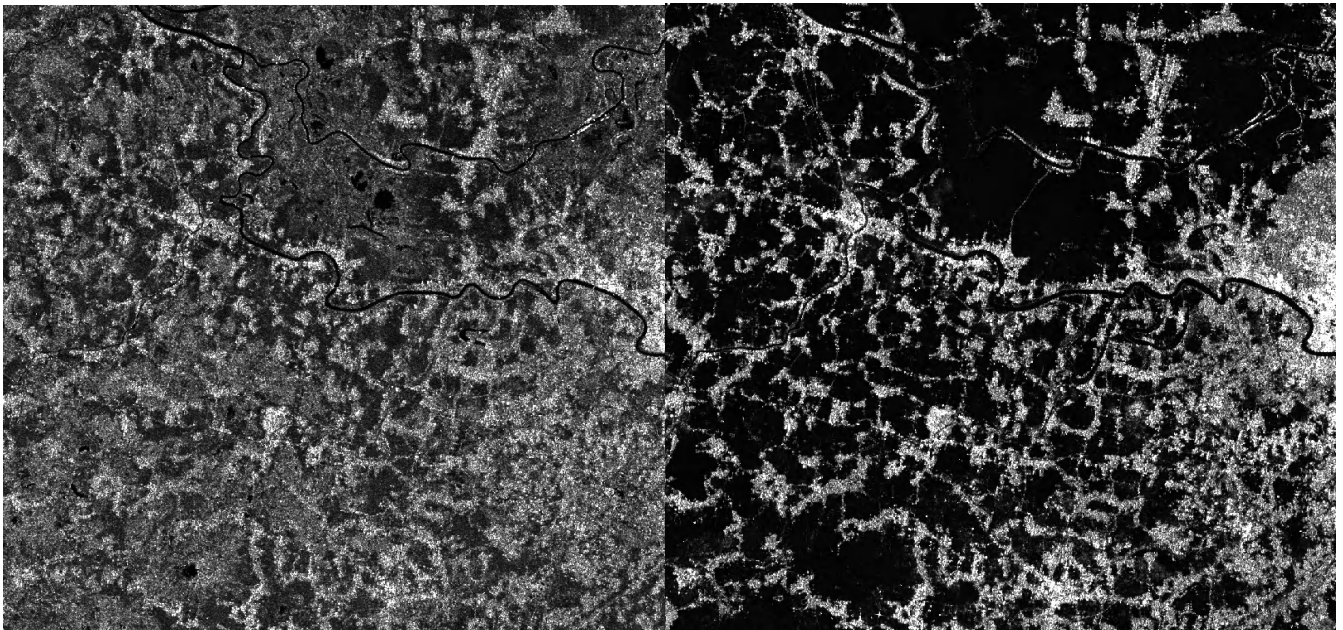
$$R_a = \theta_{\alpha} R_0 = \frac{\lambda R}{2\lambda R D} = \frac{D}{2} \quad (11).$$

1.3. Σχέση Μικροκυματικής Ακτινοβολίας – Υγρασίας Ακτινοβολούμενου Στόχου

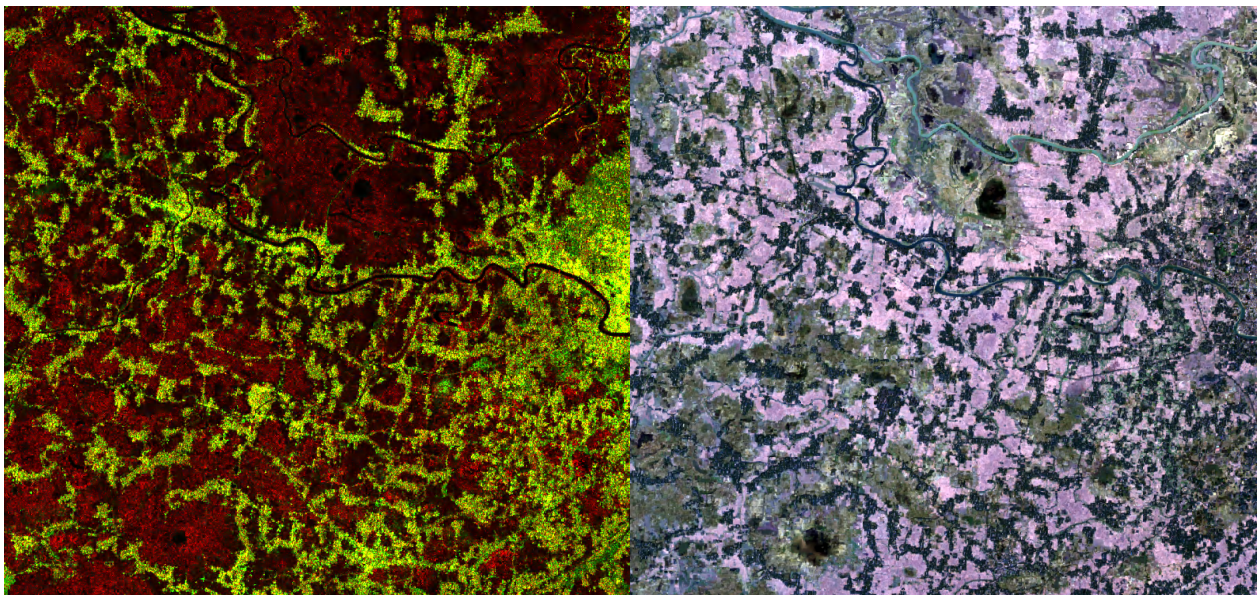
1.3.1. Εισαγωγή

Παρατηρώντας μια ραδιομετρικά διορθωμένη SAR εικόνα όπου κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας αντιστοιχεί σε μια τιμή του συντελεστή οπισθοσκεδάσης (στην κλίμακα τιμών 0-1), μπορεί να παρατηρηθεί ότι συγκεκριμένοι στόχοι οπισθοσκεδάζουν έντονα το προσπίπτον σήμα (π.χ. κτίρια, πλοία και ορεινές πλαγιές στις οποίες το σήμα προσπίπτει κάθετα) ενώ άλλοι στόχοι ανακλούν ή σκεδάζουν προς άλλη κατεύθυνση το σήμα (π.χ. ασφαλτος, υγρές επιφάνειες). Οι λόγοι για τους οποίους άλλοι στόχοι οπισθοσκεδάζουν το προσπίπτον σήμα και άλλοι όχι σχετίζεται με παραμέτρους του σήματος (μήκος κύματος/συχνότητα, πόλωση) και με παραμέτρους του φυσικού περιβάλλοντος (π.χ. τραχύτητα). Πριν αναλυθούν αυτές οι παράμετροι, αξίζει να σημειωθεί ότι μια σημαντική εφαρμογή που σχετίζεται με την σχέση της μικροκυματικής ακτινοβολίας και των υδάτινων όγκων

(και επιπρόσθετα με το γεγονός ότι οι SAR εικόνες απεικονίζουν οποιαδήποτε περιοχή ανεξαιρέτως των καιρικών συνθηκών) είναι η χαρτογράφηση πλημμυρικών φαινομένων όπως μπορεί να παρατηρηθεί στις παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 9. SAR Απεικόνιση από τον δορυφόρο Sentinel-1 της Επαρχίας Σίλγκετ του Μπαγκλαντές όπου φαίνεται μια περιοχή κατά την χειμερινή άνυδρη περίοδο (αριστερή εικόνα) και η ίδια περιοχή η οποία είναι πλημμυρισμένη κατά την περίοδο των Μουσώνων (δεξιά εικόνα).



Σχήμα 10. Έγχρωμο σύνθετο με τις SAR εικόνες από την χειμερινή άνυδρη περίοδο (πράσινο κανάλι) και από την περίοδο των Μουσώνων (κόκκινο κανάλι) μέσω της οποίας μπορούν να χαρτογραφηθούν οι πλημμυρισμένες εκτάσεις (αριστερή εικόνα) και έγχρωμο σύνθετο από τον δορυφόρο Landsat 8 που απεικονίζει την ίδια περιοχή κατά την χειμερινή περίοδο (δεξιά εικόνα).

Στις εικόνες του σχήματος 10 (πρίν και κατά το πλημμυρικό γεγονός) μπορεί να παρατηρηθεί μια διαφορά στις εκτάσεις με σκοτεινά εικονοστοιχεία (χαμηλή οπισθοσκέδαση), κάτι το οποίο οφείλεται

στο νερό το οποίο καλύπτει αυτές τις εκτάσεις κατά την εποχή των Μουσώνων). Μάλιστα, συνδυάζοντας αυτές τις 2 εικόνες σε ένα έγχρωμο σύνθετο μπορούν άμεσα να χαρτογραφηθούν οι πλημμυρισμένες εκτάσεις. Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί ότι στην προκειμένη περίπτωση ο τρόπος με τον οποίο οπισθοσκεδάζεται το σήμα από τις υδάτινες εκτάσεις εξαρτάται αποκλειστικά από έναν παράγοντα (λειτουργία νερού σαν τέλεια ανακλαστική επιφάνεια για τα μικροκύματα) ενώ στην αλληλεπίδραση μικροκυματικής ακτινοβολίας και υπεδάφιου νερού (εδαφική υγρασία) επιδρούν πολλαπλοί παράλληλοι παράγοντες οι οποίοι και θα αναλυθούν στα προσεχή κεφάλαια.

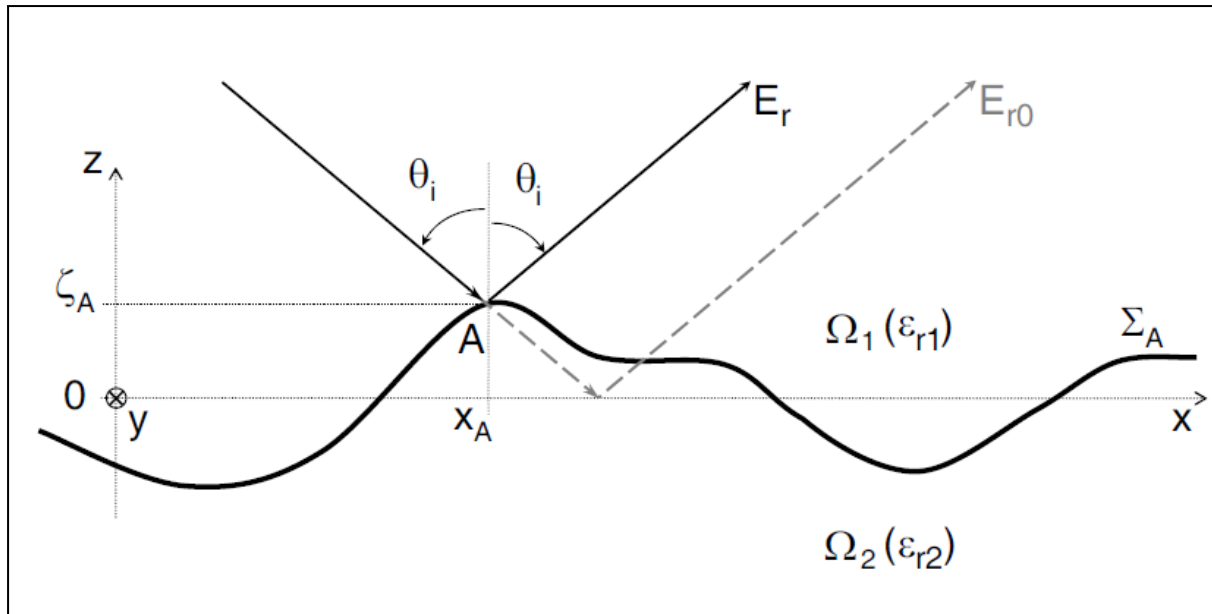
1.3.2. Αλληλεπίδραση της Μικροκυματικής Ακτινοβολίας με Παραμέτρους του Φυσικού Περιβάλλοντος

Εκτός από την υγρασία του στόχου, μια άλλη σημαντική παράμετρος του φυσικού περιβάλλοντος η οποία επηρεάζει την συμπεριφορά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι η εδαφική τραχύτητα. Η αλληλεπίδραση μικροκυματικής (και γενικότερα ηλεκτρομαγνητικής) ακτινοβολίας και εδαφικής τραχύτητας εξαρτάται από την συχνότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας, την γωνία πρόσπτωσης και τις διαφορές φάσης $\delta\varphi_r$ ενός κύματος που σκεδάζεται από μια τραχεία επιφάνεια λόγω των υψομετρικών διαφορών της επιφάνειας. Ειδικότερα, για μια τραχεία επιφάνεια σαν αυτή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα το συνολικό σκεδαζόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο E_r προκύπτει από την συμβολή όλων των σκεδαζόμενων πεδίων από τα τυχαία υψόμετρα της επιφάνειας με τυχαία τραχύτητα με τις διαφορές φάσης $\delta\varphi_r$ να αποτελούν μια ποσοτικοποίηση της τραχύτητας σε σχέση με το σκεδαζόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Θεωρώντας ένα επίπεδο κύμα σε ένα μέσο Ω_1 με κυματαριθμό k_1 και γωνία πρόσπτωσης θ_1 , η διαφορά φάσης των κυμάτων που προσπίπτουν σε μια επιφάνεια με τυχαία τραχύτητα δίνεται από την σχέση:

$$\delta\varphi_r = 2k_1\delta z_A \cos\theta_i \quad (12)$$

όπου $\delta z_A = z_A - \langle z_A \rangle$ η υψομετρική διαφορά (ως $\langle z_A \rangle$ ορίζεται ο μέσος όρος των υψομέτρων της επιφάνειας) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Εφόσον ισχύει ότι $|\delta\varphi_r| \leq \frac{\pi}{2}$ τα σκεδαζόμενα κύματα συμβάλλουν ενισχυτικά (το πλάτος του συνισταμένου κύματος είναι μεγαλύτερο από αυτό των επιμέρους κυμάτων) και η επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως ελαφρώς τραχεία ή ακόμα και επίπεδη αν $|\delta\varphi_r| \ll \frac{\pi}{2}$ ενώ εφόσον ισχύει ότι $|\delta\varphi_r| > \frac{\pi}{2}$ τα σκεδαζόμενα κύματα συμβάλλουν καταστρεπτικά (το πλάτος του συνισταμένου κύματος είναι μικρότερο από το πλάτος των επιμέρους κυμάτων) και η επιφάνεια χαρακτηρίζεται σαν τραχεία.



Σχήμα 11. Γραφική απόδοση της αλληλεπίδρασης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που μεταδίδεται σε ένα μέσο Ω_1 και μια τραχεία επιφάνεια στο σημείο A.

Περαιτέρω, η συνολική ένταση του σκεδαζόμενου πεδίου $\langle |E_r|^2 \rangle$ μπορεί να χωριστεί σε μια σύμφωνη συνιστώσα έντασης $\langle |E_r\rangle^2$ (καλά ορισμένη διαφορά φάσης από το προσπίπτον κύμα) η οποία αντιστοιχεί στην ανάκλαση από μια τέλεια επίπεδη επιφάνεια και σε μια ασύμφωνη συνιστώσα $\langle |\delta E_r|^2 \rangle$ (χαμηλή συσχέτιση με το προσπίπτον κύμα) η οποία αντιστοιχεί σε σκέδαση από μια πολύ τραχεία επιφάνεια. Επομένως, η τραχύτητα εξαρτάται από τις σύμφωνες και ασύμφωνες συνιστώσες της συνολικής έντασης του σκεδαζόμενου πεδίου όπου όσο πιο τραχεία είναι μια επιφάνεια, τόσο μεγαλύτερη είναι η ασύμφωνη συνιστώσα της συνολικής έντασης του σκεδαζόμενου πεδίου. Επιπρόσθετα, μπορεί ναδειχθεί μέσω της προσέγγισης του εφαπτόμενου επιπέδου (μέθοδος που είναι έγκυρη για τράχειες επιφάνειες με μικρές κλίσεις των όρεων και κοιλάδων της) ότι η σύμφωνη ένταση του σκεδαζόμενου πεδίου δίνεται από την σχέση:

$$\langle |E_r\rangle^2 = |E_0| \left| \left[\exp(j\delta\varphi_r) \right] \right|^2 \quad (13)$$

όπου ο όρος $|E_0|$ εκφράζει την ανάκλαση από μία τέλεια επίπεδη επιφάνεια

και ο όρος $\left| \left[\exp(j\delta\varphi_r) \right] \right|^2 = A_{coh}$ εκφράζει την εξασθένιση της σύμφωνης έντασης λόγω της τραχύτητας της επιφάνειας.

Για μια επιφάνεια με Γκαουσιανή συνάρτηση κατανομής ο όρος της εξασθένισης της σύμφωνης έντασης λόγω τραχύτητας δίνεται από την σχέση:

$$A_{coh} = \exp\left[-4(R_{ar})^2\right] \quad (14)$$

όπου $R_{ar} = k_1 h_{RMS} \cos\theta_i$ η παράμετρος τραχύτητας του Rayleigh (ο όρος h_{RMS} αναφέρεται στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα της κατανομής των επιμέρους υψομέτρων μιας επιφάνειας).

Η σημαντικότητα της παραμέτρου τραχύτητας του Rayleigh έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση της διαφοράς φάσης, άρα:

$$R_{ar} = \frac{\sqrt{\langle(\delta\phi_r)^2\rangle}}{2} \quad (15)$$

ενώ μπορεί να αξιοποιηθεί και σαν ένας ποιοτικός δείκτης της τραχύτητας μιας επιφάνειας όπου όταν $R_{ar} < \frac{\pi}{16}$ η επιφάνεια θεωρείται ως ελάχιστα τραχεία ενώ αν $R_{ar} > \frac{\pi}{c}$ όπου C μια σταθερά στο εύρος τιμών $[2, \pi]$ η επιφάνεια θεωρείται πολύ τραχεία [14].

Επιπλέον, η διηλεκτρική σταθερά ενός υλικού στο οποίο προσπίπτει και σκεδάζεται μικροκυματική ακτινοβολία καθώς και το μήκος κύματος και η γωνία πρόσπτωσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας καθορίζουν το βάθος διείσδυσης των μικροκυμάτων στο υλικό. Θεωρώντας ότι η ισχύς ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος το οποίο διεισδύει σε βάθος d σε ένα ομογενές έδαφος (τα εδαφικά στρώματα έχουν τις ίδιες ιδιότητες ανεξάρτητα του βάθους) μπορεί να δοθεί από την παρακάτω σχέση.

$$P_p = P_{op} \gamma e^{(-2jK_z d)} \quad (16) [15]$$

όπου P_{op} η ισχύς του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος με γνωστή πόλωση p ,

γ ο όρος μετάδοσης στη διεπαφή αέρα-εδάφους και

$K_z = \sqrt{\left(\omega^2 \mu \epsilon - K_0^2 \sin^2(\theta_i)\right)}$ (όπου ω η γωνιακή συχνότητα, μ η μαγνητική διαπερατότητα, ϵ η διηλεκτρική σταθερά, $K_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ ο κυματαριθμός, θ_i η γωνία πρόσπτωσης) ο z όρος του κυματαριθμού στο έδαφος βάσει των Ulaby et. al 1981

Το βάθος διείσδυσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο έδαφος ορίζεται ως το βάθος στο οποίο η ισχύς του κύματος έχει μειωθεί κατά $1/e$ και επομένως ισχύει ότι $\frac{P_p}{(P_{op}\gamma)} = e^{-1}$.

Τελικά το βάθος διείσδυσης μπορεί να δοθεί από την σχέση $\delta_p = \frac{\left(\lambda\sqrt{\epsilon'}\right)}{(2\pi\epsilon'')} \cos\theta_r$ (17) [16].

όπου θ_r η γωνία διάθλασης της μικροκυματικής ακτινοβολίας εντός του εδάφους

1.3.3. Μοντέλα Συσχέτισης Μικροκυματικής Ακτινοβολίας και Εδαφικής Υγρασίας

Όπως οι Torp et. al. 1980 είχαν αναπτύξει πολυωνυμικές εκφράσεις για τον προσδιορισμό της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας από το πραγματικό μέρος της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς και αντίστροφα για ένα εύρος συχνοτήτων στο φάσμα των ραδιοκυμάτων, έτσι έχουν αναπτυχθεί και διάφορα εμπειρικά, ημί-εμπειρικά και φυσικά μοντέλα για την διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της διηλεκτρικής σταθεράς ενός μέσου και της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθεί το εμπειρικό μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους Hallikainen et. al. 1985 [17]. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, μια εδαφική στρώση θεωρείται ότι αποτελεί ένα μείγμα τεσσάρων διηλεκτρικών μέσων (αέρας, στερεά υλικά, ελεύθερο νερό και τριχοειδής εδαφική υγρασία). Επομένως, η μιγαδική διηλεκτρική σταθερά για μια εδαφική στρώση εξαρτάται από την συχνότητα ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διεισδύει και σκεδάζεται σε μια εδαφική στρώση, την θερμοκρασία, την συνολική ογκομετρική εδαφική υγρασία, τα κλάσματα του ελεύθερου νερού και της τριχοειδούς εδαφικής υγρασίας καθώς και παραμέτρων που σχετίζονται με την υφή και την δομή του εδάφους. Στο πρώτο στάδιο της ανάπτυξης του εμπειρικού μοντέλου από τους Hallikainen et. al., έγινε μια πειραματική διερεύνηση της σχέσης μικροκυματικής ακτινοβολίας και εδαφικής υγρασίας διερευνώντας την αλληλεπίδραση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο φάσμα των μικροκυμάτων εντός ενός κυματοδηγού ο οποίος πληρώνεται από διάφορα εδαφικά μίγματα (εξετάστηκαν δείγματα με διαφορετικές υφές και σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας). Μέσω της διάταξης του κυματοδηγού μετρήθηκε ο συντελεστής μετάδοσης (πηλίκο του πλάτους του μεταδιδόμενου κύματος προς του προσπίπτοντος κύματος στο εδαφικό μείγμα) και η φάση του που δίνονται από την σχέση:

$$T_m = |T_m| e^{(j\Phi_m)} = \frac{(1-R^2)e^{(-\gamma L)}}{1-R^2e^{(-2\gamma L)}} \quad (18)$$

όπου R ο συντελεστής ανάκλασης πεδίου (πηλίκο του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που ανακλάται από την ασυνέχεια του κυματοδηγού)

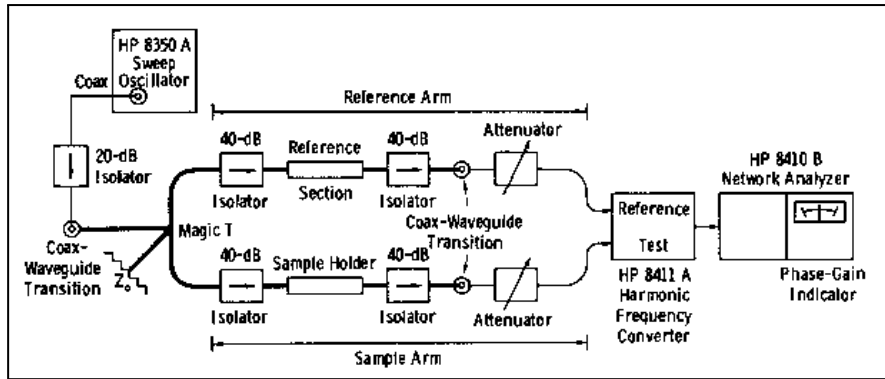
$\gamma = \alpha + j\beta$ ο συντελεστής διάδοσης του κυματοδηγού ο οποίος πληρώνεται από το εδαφικό μείγμα και ορίζεται από τους όρους του συντελεστή εξασθένισης α και του παράγοντα φάσης β .

Οι τελικές εκφράσεις για το πραγματικό και φανταστικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς του εδαφικού μίγματος προκύπτει σαν συνάρτηση των όρων α και β , άρα:

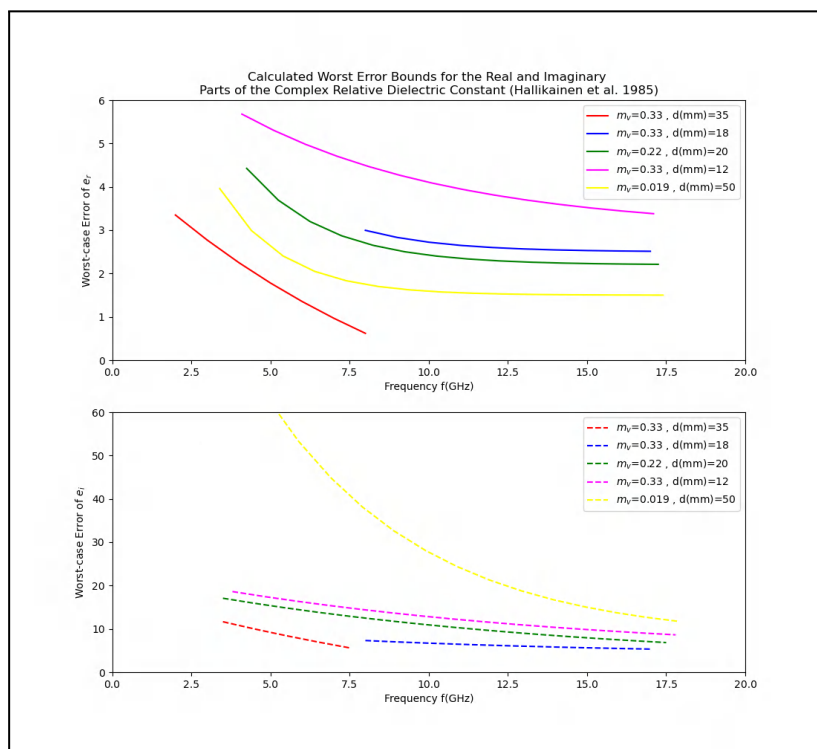
$$\epsilon' = \left(\frac{\lambda_0}{2\pi}\right)^2 \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2 - (\alpha^2 - \beta^2) \right] \quad (19)$$

$$\epsilon'' = \left(\frac{\lambda_0}{2\pi}\right)^2 (2\alpha\beta) \quad (20)$$

Από την ανάλυση σφαλμάτων που έγινε για όλα τα εδαφικά μίγματα παρατηρήθηκε ότι και για τον πραγματικό αλλά και για τον φανταστικό όρο της διηλεκτρικής σταθεράς το σχετικό ποσοστιαίο σφάλμα μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας της μικροκυματικής ακτινοβολίας ενώ ποσοτικά η πραγματική συνιστώσα της διηλεκτρικής σταθεράς προσδιορίζεται με πολλή μεγαλύτερη ακρίβεια από την φανταστική συνιστώσα.



Σχήμα 12. Πειραματική διάταξη κυματοδηγού μέσω του οποίου προσδιορίστηκε για διάφορα εδαφικά μείγματα η μιγαδική τους διηλεκτρική σταθερά [17].



Σχήμα 13. Διαγράμματα στα οποία μπορεί να παρατηρηθεί η διαφορά στην ακρίβεια προσδιορισμού του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς του εδαφικού μίγματος καθώς και η μεταβολή της ακρίβειας σε σχέση με την συχνότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας [17].

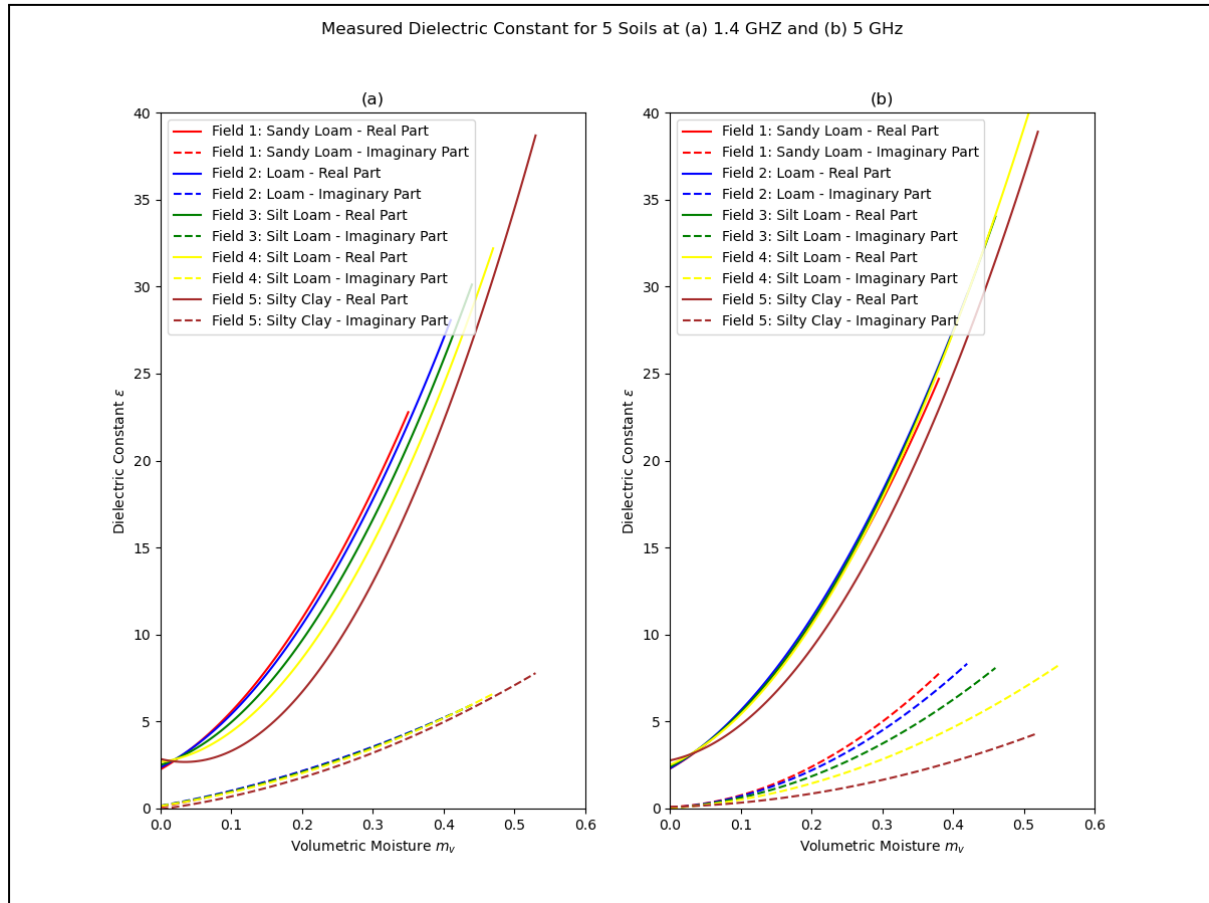
Αναφορικά με τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έγιναν, αποδείχθηκε ότι η πραγματική συνιστώσα της διηλεκτρικής σταθεράς του εδαφικού μίγματος εξαρτάται από την υφή του με τα εδαφικά μείγματα που έχουν υψηλότερο ποσοστό αμμόδων κόκκων να εμφανίζουν μεγαλύτερη μεταβολή στην αύξηση του πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς σε σχέση με την ογκομετρική εδαφική υγρασία. Βέβαια, με την αύξηση της συχνότητας των μικροκυμάτων αυτή η διαφορά στην μεταβολή της αύξησης μεταξύ των εδαφικών μιγμάτων φθίνει. Τέλος, αποδείχθηκε και ότι η μείωση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον διεξαγωγής του πειράματος οδηγεί σε μείωση των $\epsilon^{(')}$ και $\epsilon^{(')}$ καθώς και σε μείωση της εξάρτησης από την συχνότητα των μικροκυμάτων με την γενική

έκφραση του εμπειρικού μοντέλου που συσχετίζει την ογκομετρική εδαφική υγρασία με τις συνιστώσες της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς να δίνεται από την σχέση:

$$\varepsilon = (\alpha_0 + \alpha_1 S + \alpha_2 C) + (b_0 + b_1 S + b_2 C)m_v + (c_0 + c_1 S + c_2 C)m_v^2 \quad (21)$$

όπου S το ποσοστό του εδαφικού μίγματος σε άμμο

C το ποσοστό του εδαφικού μίγματος σε άργιλο με τους υπόλοιπους συντελεστές να δίνονται από τον πίνακα II σελίδα 29 της δημοσίευσης [17].



Σχήμα 14. Διαγράμματα στα οποία φαίνεται η σχέση στην μεταβολή των συνιστωσών της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς σε σχέση με την υφή των εδαφικών μειγμάτων αλλά και το πως αυτή η μεταβολή φθίνει όσο αυξάνεται η συχνότητα των μικροκυμάτων.

Ένα πιο λεπτομερές ημι-εμπειρικό μοντέλο που συσχετίζει την μικροκυματική ακτινοβολία και την εδαφική υγρασία και λαμβάνει υπόψη παραμέτρους του εδάφους όπως η σχετική και χύδη πυκνότητα ενώ παράλληλα λαμβάνει υπόψη και τις μορφές της εδαφικής υγρασίας σε ένα εδαφικό μείγμα (ελεύθερο νερό, τριχοειδής εδαφική υγρασία) είναι αυτό που αναπτύχθηκε από τους Mironov et al. 2009 [18]. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, το πραγματικό και φανταστικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς ενός “υγρού” εδάφους εκφράζονται μέσω των σχέσεων:

$$\varepsilon'_m = \left[1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\varepsilon'_s{}^\alpha - 1) + m_v^{\beta'} \varepsilon'_{fw}{}^a - m_v \right]^{1/a} \quad (22)$$

$$\varepsilon''_m = \left[m_v^{\beta''} \varepsilon''_{fw}{}^\alpha \right]^{1/a} \quad (23)$$

όπου m_v η ογκομετρική εδαφική υγρασία

ρ_b η χύδην πυκνότητα σε gr/m^3

ρ_s η σχετική πυκνότητα των στερεών σωματιδίων του εδαφικού μίγματος

ε'_s η σύνθετη διηλεκτρική σταθερά των μεταλλικών στοιχείων του εδαφικού μίγματος η οποία μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της σχετικής πυκνότητας των στερεών σωματιδίων από την σχέση $\varepsilon'_s = (1.01 + 0.44\rho_s)^2 - 0.062$

$\alpha = 0.65$ μια εμπειρικά προσδιοριζόμενη σταθερά

$\beta' = 1.2748 - 0.00519S - 0.00152C$ και $\beta'' = 1.33797 - 0.00603S - 0.00166C$ εμπειρικά προσδιοριζόμενες σταθερές οι οποίες χαρακτηρίζονται από την υφή του εδαφικού μίγματος

$\varepsilon'_{fw} = \varepsilon_{w\infty} + \frac{\varepsilon_{w0} - \varepsilon_{w\infty}}{1 + (2\pi f \tau_w)^2}$ η πραγματική συνιστώσα της σύνθετης διηλεκτρικής σταθεράς του ελεύθερου νερού και όπου επιπλέον $\varepsilon_{w\infty} = 4.9$ το όριο υψηλής συχνότητας του ε'_{fw} , $\varepsilon_{w0} = 80.1$ (για θερμοκρασία $20^\circ C$) το όριο χαμηλής συχνότητας του ε'_{fw} και τ_w ο χρόνος απορροής του ελεύθερου νερού

$\varepsilon''_{fw} = \frac{2\pi f \tau_w (\varepsilon_{w0} - \varepsilon_{w\infty})}{1 + (2\pi f \tau_w)^2} + \frac{\sigma_{eff}}{2\pi \varepsilon_0 f} \frac{(\rho_s - \rho_b)}{\rho_s m_v}$ και όπου επιπλέον ε_0 η ηλεκτρική επιτρεπτότητα του κενού χώρου, $\sigma_{eff} = -1.645 + 1.939\rho_b - 0.004111S - 0.006614C$ η ηλεκτρική αγωγιμότητα και f η συχνότητα

1.4 Μοντελοποίηση Ογκομετρικής Εδαφικής Υγρασίας Βάσει του Συντελεστή Οπισθοσκέδασης του Στόχου ενός Ενεργητικού Radar

1.4.1. Εισαγωγή

Η μοντελοποίηση της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας βάσει του συντελεστή οπισθοσκέδασης του ακτινοβολούμενου στόχου ενός ενεργητικού Radar σχετίζεται και με την ίδια την μοντελοποίηση του συντελεστή οπισθοσκέδασης βάσει της εδαφικής υγρασίας, ενός ή περισσότερων δεικτών εδαφικής τραχύτητας και της γωνίας πρόσπτωσης του σήματος του Radar κ.α. Ειδικότερα, όπως αναλύθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, η οπισθοσκέδαση του Radar σήματος εξαρτάται από το ποσοστό του στόχου σε νερό, την τραχύτητα του εδάφους (μεγαλύτερη εδαφική τραχύτητα σαν αυτή που εκφράζεται από έναν δείκτη τραχύτητας όπως η παράμετρος του Rayleigh ισοδυναμεί με “ένισχυση” της οπισθοσκέδασης) ενώ σημαντικό ρόλο παίζουν και η γωνία πρόσπτωσης του Radar σήματος στον στόχο καθώς και η πόλωση. Οι εξισώσεις μοντελοποίησης των συντελεστών οπισθοσκέδασης που θα

αναλυθούν στις παρακάτω παραγράφους έχουν σαν μεταβλητές τις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν και χωρίζονται σε εμπειρικά, ημι-εμπειρικά και φυσικά μοντέλα, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο τεκμηριώνονται.

1.4.2. Έμμεσος Προσδιορισμός Ογκομετρικής Εδαφικής Υγρασίας Βάσει Εμπειρικών Μοντέλων Οπισθοσκέδασης

Τα εμπειρικά μοντέλα οπισθοσκέδασης αποτελούν μαθηματικές εξισώσεις για τον έμμεσο προσδιορισμό του συντελεστή οπισθοσκέδασης του σήματος ενός ενεργητικού Radar βάσει των παραμέτρων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα και δεν στηρίζονται αυστηρά σε φυσικές αρχές αλλά συνήθως στην τεκμηρίωση τους μέσω πειραματικών δεδομένων όπου αποδεικνύεται η στατιστική συσχέτιση του μοντέλου με πραγματικές μετρήσεις. Ένα από τα πρώτα εμπειρικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν για αυτό τον σκοπό ήταν από τους Dubois et al. (1995). Το συγκεκριμένο μοντέλο τεκμηριώθηκε βάσει μετρήσεων από ετερογενή επίγεια μικροκυματικά σκεδασόμετρα, από επίγειες μετρήσεις ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας με την βαρυτομετρική μέθοδο και από μετρήσεις του μέσου τετραγωνικού σφάλματος της κατανομής των υψομέτρων των επιφανειών μελέτης μέσω ενός laser rinmeter. Οι σχέσεις που προέκυψαν για την VV και HH πόλωση είναι οι εξής:

$$\sigma_{hh}^0 = 10^{-2.75 \frac{\cos^{1.5}\theta}{\sin\theta^5}} 10^{0.028\epsilon \tan\theta} (kh_{rms} \sin^{1.4}\theta) \lambda^{0.7} \quad (22)$$

$$\sigma_{vv}^0 = 10^{-2.35 \frac{\cos^3\theta}{\sin\theta^3}} 10^{0.046\epsilon \tan\theta} (kh_{rms} \sin^3\theta)^{1.1} \lambda^{0.7} \quad (23)$$

όπου θ η γωνία πρόσπτωσης, ϵ το πραγματικό μέρος της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς όπως αυτή προσδιορίζεται με βάση το μοντέλο του Hallikainen [17], k ο κυματαριθμός $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ και λ το μήκος κύματος.

Το παραπάνω μοντέλο τεκμηριώθηκε μέσω του προσδιορισμού του συντελεστή ο οποίος πολλαπλασιάζεται με την σχέση $\epsilon \tan\theta$ και για τις 2 πολώσεις από τα πηλίκα του μετρημένου με τον δέκτη POLARSCAT συντελεστή οπισθοσκέδασης για συνθήκες υψηλής και χαμηλής υγρασίας τα οποία αντίστοιχα είναι συνάρτηση μόνο της γωνίας πρόσπτωσης και της διηλεκτρικής σταθεράς. Επίσης, προσδιορίστηκε και ο συντελεστής της δύναμης της παραμέτρου τραχύτητας $kh_{rms} \sin\theta$ από την βέλτιστη ευθεία παλινδρόμησης του διαγράμματος διασποράς μεταξύ των όρων $\sigma_{pol}^0 \lambda^{-0.7} \frac{\sin\theta^5}{\cos\theta^{1.5}} 10^{\alpha \epsilon \tan\theta}$ και $\log(kh_{rms} \sin\theta)$. Τέλος, αναφορικά με την συμπεριφορά του συγκεκριμένου μοντέλου, παρατηρείται ότι με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης και τη μείωση της εδαφικής τραχύτητας μειώνεται η ενεργός διατομή Radar (σχετίζεται άμεσα με τον συντελεστή οπισθοσκέδασης) ενώ παρατηρείται και αύξηση του λόγου $\frac{\sigma_{hh}^0}{\sigma_{vv}^0}$ όσο αυξάνεται η τραχύτητα του εδάφους. Τέλος, για να μην υπερβαίνει η τιμή του σ_{hh}^0 την τιμή του σ_{vv}^0 για μεγάλες τιμές του όρου $kh_{rms} \sin\theta$, κάτι το οποίο αντιβαίνει σε διάφορα προυπάρχοντα θεωρητικά μοντέλα και σε SAR παρατηρήσεις, τίθενται οι περιορισμοί $kh_{rms} \leq 2.5$ και $\theta \geq 30^\circ$. [19]

Το εμπειρικό μοντέλο των Dubois et al. (1995) τροποποιήθηκε από τους Baghdadi et al. (2015) για να μπορεί να ανταποκρίνεται καλύτερα όταν σαν Radar δεδομένα εισόδου δίνονται συντελεστές οπισθοσκέδασης από εναέριες ή διαστημικές πλατφόρμες SAR. Χρησιμοποιώντας δεδομένα SAR από όλες τις μπάντες (X, C, L) και όλες τις διαθέσιμες πολώσεις (HH, VV), αρχικά αναλύθηκε η ευαισθησία και η ακρίβεια του μοντέλου Dubois με τα διαθέσιμα δεδομένα εισόδου. Συγκρίνοντας τους συντελεστές οπισθοσκέδασης οι οποίοι προκύπτουν με εφαρμογή του μοντέλου Dubois σε σχέση με τους συντελεστές οπισθοσκέδασης από τα SAR δεδομένα, ο συντελεστής προσδιορισμού της μεταβλητότητας βρέθηκε ίσος με $R^2 = 0.40$, κάτι το οποίο αντιστοιχεί σε μέτριο βαθμό προσαρμογής των μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης σε σχέση με αυτών από τα SAR δεδομένα ενώ επίσης παρατηρείται και μεγάλη μεταβλητότητα της διαφοράς μοντελοποιημένου και SAR συντελεστή οπισθοσκέδασης σε σχέση με την παράμετρο τραχύτητας kh_{rms} , την ογκομετρική εδαφική υγρασία (%) και την γωνία πρόσπτωσης θ . Η γενική έκφραση του τροποποιημένου εμπειρικού μοντέλου Dubois είναι η παρακάτω:

$$\sigma_{pq}^0 = f_{pq}(\theta) g_{pq}(mv, \theta) \Gamma_{pq}(kHrms, \theta) \quad (24)$$

όπου $f_{pq}(\theta) = \alpha(\cos\theta)^\beta$ ο όρος εξάρτησης του συντελεστή οπισθοσκέδασης του Radar από την γωνία πρόσπτωσης (με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης μειώνεται το σ^0) $g_{pq}(mv, \theta) = \delta 10^{\gamma \cotan(\theta)mv}$ ο όρος εξάρτησης του συντελεστή οπισθοσκέδασης σε σχέση με την εδαφική υγρασία (για ξηρά εδάφη παρατηρείται μια γραμμική αύξηση του σ^0 σε σχέση με την ογκομετρική εδαφική υγρασία στο εύρος 5-35 %)

$\Gamma_{pq}(kHrms, \theta) = \mu(kHrms)^{\xi \sin(\theta)}$ ο όρος (λογαριθμική συνάρτηση στην γραμμική κλίμακα) που χαρακτηρίζει την συμπεριφορά του σ^0 σε σχέση με την τραχύτητα του εδάφους

Επομένως:

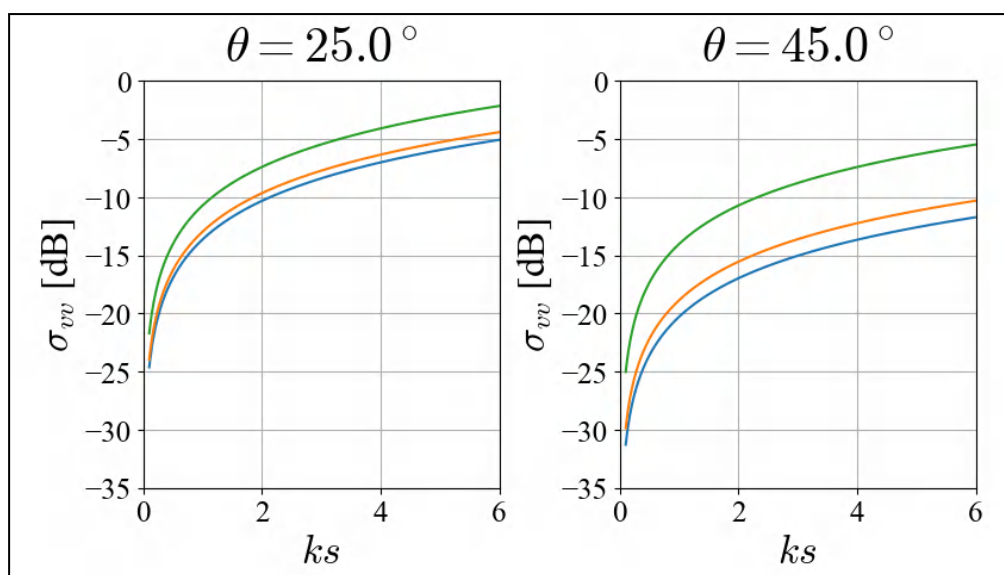
$$\sigma_{pq}^0 = f_{pq}(\theta) g_{pq}(mv, \theta) \Gamma_{pq}(kHrms, \theta) = \delta(\cos\theta)^\beta 10^{\gamma \cotan(\theta)mv} \mu(kHrms)^{\xi \sin(\theta)} \quad (25)$$

και με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίστηκαν οι συντελεστές $\delta, \beta, \gamma, \mu, \xi$ για κάθε πόλωση οπότε προκύπτουν οι σχέσεις:

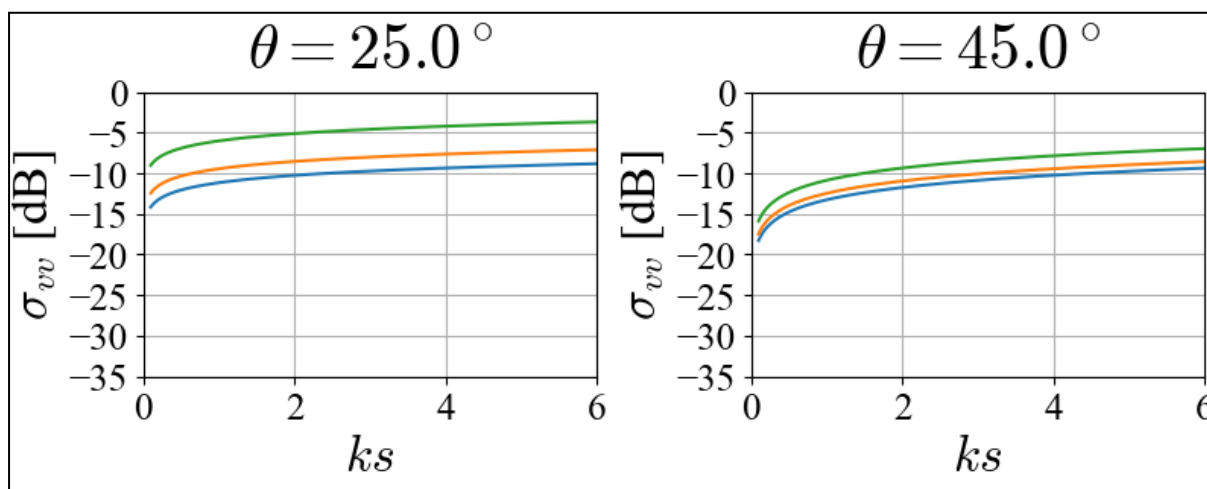
$$\sigma_{HH}^0 = 10^{-1.287} (\cos\theta)^{1.227} 10^{0.009 \cotan(\theta)mv} (kHrms)^{0.86 \sin(\theta)} \quad (26)$$

$$\sigma_{VV}^0 = 10^{-1.138} (\cos\theta)^{1.528} 10^{0.008 \cotan(\theta)mv} (kHrms)^{0.71 \sin(\theta)} \quad (27)$$

$$\sigma_{HV}^0 = 10^{-2.325} (\cos\theta)^{-0.01} 10^{0.011 \cotan(\theta)mv} (kHrms)^{0.44 \sin(\theta)} \quad (28)$$



Σχήμα 15. Συμπεριφορά του συντελεστή οπισθοσκέδασης βάσει του μοντέλου Dubois στο εύρος εγκυρότητας του δείκτη τραχύτητας ks ή kH_{rms} [21].



Σχήμα 16. Συμπεριφορά του συντελεστή οπισθοσκέδασης βάσει του Νέου Εμπειρικού Μοντέλου στο εύρος εγκυρότητας του δείκτη τραχύτητας ks ή kH_{rms} και όπου επίσης μπορεί να παρατηρηθεί η χαμηλότερη ευαισθησία του στην αυξανόμενη τραχύτητα σε σχέση με το μοντέλο Dubois [21].

Εκτός από τα μοντέλα της ραντάρ οπισθοσκέδασης που αναφέρθηκαν προηγουμένως, αρκετά εμπειρικά και ημι-εμπειρικά μοντέλα αναπτύχθηκαν από τους Oh et al. στο διάστημα 1992 - 2004. Το πρώτο (εμπειρικό) μοντέλο οπισθοσκέδασης τεκμηριώθηκε μέσω μετρήσεων εδαφικής υγρασίας με διηλεκτρικές μεθόδους, πολλαπλών μετρήσεων του συντελεστή οπισθοσκέδασης με σκεδασόμετρο σε ένα ευρύ φάσμα γωνιών πρόσπτωσης ($10^0 - 70^0$) και επιτόπου προσδιορισμού της εδαφικής τραχύτητας με μέτρηση των δεικτών H_{rms} (μέσω τετραγωνικό σφάλμα της κατανομής των υψομέτρων της επιφάνειας) και L (μήκος συσχέτισης - οριζόντια απόσταση μεταξύ 2 “όρων” της κατανομής των υψομέτρων). Οι τελικές σχέσεις των λόγων συντελεστών οπισθοσκέδασης

$p = \sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ και $q = \sigma_{hh'}^0 / \sigma_{vv'}^0$ συναρτήσει των παραμέτρων εδαφικής υγρασίας και τραχύτητας είναι οι παρακάτω:

$$q = 0.23\sqrt{\Gamma_0}[1 - \exp(-kHrms)] \text{ και } \sqrt{p} = 1 - \left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^{[1/3\Gamma_0]} \exp(-kHrms) \quad (29)$$

όπου $\Gamma_0 = \left|\frac{1-\sqrt{\epsilon_r}}{1+\sqrt{\epsilon_r}}\right|^2$ ο συντελεστής ανακλαστικότητας του Fresnel στο ναδίρ

Μέσω των λόγων p και q έπειτα αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος αντιστροφής για τον ταυτόχρονο υπολογισμό των ϵ_r και $kHrms$ με μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ μετρημένης και υπολογισμένης εδαφικής υγρασίας $RMSE = 0.04 m^3/m^3$. [22] Έπειτα, το εμπειρικό μοντέλο τροποποιήθηκε ορίζοντας το φάσμα τραχύτητας μιας τετραγωνικής-εκθετικής συνάρτησης η οποία προσεγγίζει την συνάρτηση συσχέτισης (θα αναλυθεί σαν έννοια περαιτέρω στο επόμενο κεφάλαιο μαζί με το φάσμα τραχύτητας) της κατανομής των υψομέτρων των επιφανειών που μελετήθηκαν [23]. Οπότε ο συντελεστής οπισθοσκέδασης για την VV πόλωση δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_{vv}^0 = 13.5 \exp(-1.4(kHrms)^{0.2}) \frac{1}{\sqrt{p}} \Gamma_h(kHrms)^2 (\cos\theta)^{3.25-0.05kL} \exp(-2(kHrms \cos\theta)^{0.6}) W_k \quad (30)$$

όπου $W_k = \frac{(kL)^3}{1+(2.6kL \sin\theta)^2} [1 - 0.71 \frac{1-3(2.6kL \sin\theta)^2}{1+(2.6kL \sin\theta)^2}]$ το φάσμα τραχύτητας

$$\Gamma_h = \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}} \text{ ο συντελεστής ανακλαστικότητας Fresnel}$$

Οι τελευταίες τροποποιήσεις που έγιναν στα μοντέλα οπισθοσκέδασης των Oh et al. 2002 [24] αφορούσαν στην εισαγωγή της παραμέτρου της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας καθεαυτής στις σχέσεις αντί για τον συντελεστή ανακλαστικότητας Fresnel και είναι οι παρακάτω:

$$\sigma_{vh}^0 = 0.11 m_v^{0.7} \cos\theta^{2.2} [1 - \exp(-0.32kHrms)]^{1.8} \quad (31)$$

$$\sigma_{vv}^0 = \frac{\sigma_{vh}^0}{q} = \frac{\sigma_{vh}^0}{0.1 \left(\frac{Hrms}{L} + \sin 1.3\theta\right)^{1.2} [1 - \exp(-0.9kHrms)]^{0.8}} \quad (32)$$

Επιπλέον, η σχέση του λόγου q απλοποιήθηκε από τους Oh et al. 2004 ώστε να μην περιλαμβάνει το μήκος συσχέτισης L το οποίο έχει αποδειχθεί ότι δεν μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια στο πεδίο [25], [26]. Άρα,

$$\sigma_{vv}^0 = \frac{\sigma_{vh}^0}{q} = \frac{\sigma_{vh}^0}{0.095(0.13 + \sin 1.5\theta)^{1.2} [1 - \exp(-1.3kHrms)]^{0.8}} \quad (33)$$

Σε σχέση με τα εύρη εγκυρότητας των παραμέτρων που υπεισέρχονται στις σχέσεις (31) - (33), για την έκδοση του μοντέλου οπισθοσκέδασης του Oh (2002) ισχύει ότι $29^\circ < \theta < 51^\circ$, $0.03 < m_v < 0.35$ και $0.03 < Hrms/L < 0.32$ ενώ για το μοντέλο Oh (2004) ισχύει ότι $10^\circ < \theta < 70^\circ$, $0.04 < m_v < 0.291$ και $0.13 < kHrms < 6.98$.

1.4.3. Έμμεσος Προσδιορισμός Ογκομετρικής Εδαφικής Υγρασίας Βάσει Φυσικών Μοντέλων Οπισθοσκέδασης

Τα εμπειρικά και ημι-εμπειρικά μοντέλα οπισθοσκέδασης της μικροκυματικής ακτινοβολίας στηρίζονται σε ορισμένες φυσικές παραμέτρους (π.χ. σκέδαση Rayleigh) αλλά και σε συμπεράσματα των ερευνητών σε σχέση με την αλληλεπίδραση των παραμέτρων μέσω των οποίων προσδιορίζεται το ποσό της οπισθοσκέδασης της μικροκυματικής ακτινοβολίας (π.χ. μείωση οπισθοσκέδασης με αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης [19], [20] ή γραμμική αύξηση εδαφικής υγρασίας και οπισθοσκέδασης για γυμνά εδάφη [20]). Όμως, τα συγκεκριμένα μοντέλα περιορίζονται σημαντικά στις συνθήκες εδάφους, υγρασίας, θερμοκρασίας κ.ο.κ. για τις οποίες αυτά έχουν βαθμονομηθεί.

Αντίθετα, στα φυσικά μοντέλα σκέδασης σε διάφορα Η/Μ φάσματα, περιορισμοί συναντώνται μόνο κατά τον χαρακτηρισμό της τραχύτητας της επιφάνειας στον οποίο προσπίπτει η Η/Μ ακτινοβολία. Συγκεκριμένα, η επιφάνεια χαρακτηρίζεται από μια κατανομή υψομετρικών τιμών η οποία ποσοτικοποιείται περαιτέρω μέσω της συνάρτησης συσχέτισης (γκαουσιανή ή εκθετική) και τελικά εξάγεται το φάσμα τραχύτητας μέσω του μετασχηματισμού Fourier του ν-οστού βαθμού της συνάρτησης συσχέτισης [27],[28].

$$\rho(x) = \exp(-x/L) \quad (34) - \text{εκθετική Συνάρτηση Συσχέτισης}$$

$$\rho(x) = \exp(-x/L)^2 \quad (35) - \text{γκαουσιανή Συνάρτηση Συσχέτισης}$$

$$W^n(a, b) = \frac{1}{2\pi} \iint \rho^n(x, y) \exp(-ax - by) dx dy \quad (36) - \text{μετασχηματισμός Fourier του}$$

ν-οστού βαθμού της συνάρτησης συσχέτισης μέσω της οποίας εξάγεται το φάσμα τραχύτητας

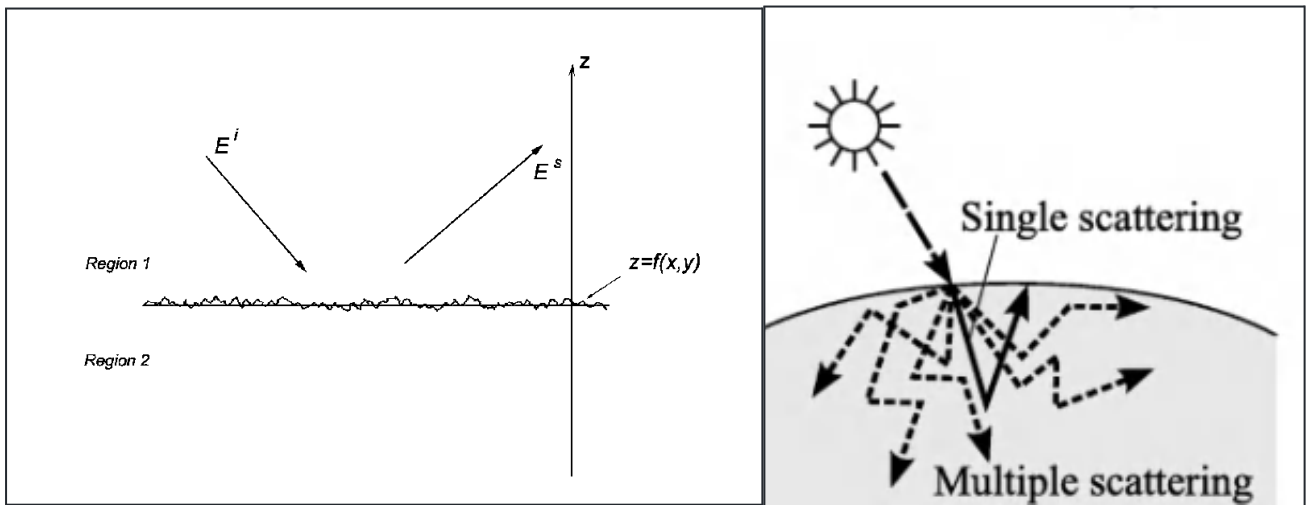
Μέσω της προσέγγισης του εφαπτομενικού επιπέδου (ή προσέγγισης Kirchoff) αποδεικνύεται ότι το σκεδαζόμενο πεδίο μπορεί να γραφτεί σε όρους των εφαπτομενικών ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων των οποίων οι σχέσεις φαίνονται παρακάτω και βάσει των οποίων προσδιορίζονται οι διστατικοί συντελεστές σκέδασης (εκφράζουν το σύνολο μονής και πολλαπλής σκέδασης): [27]

$$\hat{n} \times E = \hat{n} \times (E^i + E^s), \quad \hat{n} \times H = \hat{n} \times (H^i + H^s) \quad (36)$$

όπου \hat{n} το κάθετο μοναδιαίο διάστημα του σημείου της επιφάνειας

όπου E^i το προσπίπτον ηλεκτρικό πεδίο

όπου E^s το σκεδαζόμενο ηλεκτρικό πεδίο



Σχήμα 17. Απεικόνιση βασικών παραμέτρων και διεργασιών της σκέδασης σε τραχιές επιφάνειες (αριστερή εικόνα) και βασική απεικόνιση πολλαπλής σκέδασης από μια πηγή Η/Μ κυμάτων (πηγή: <https://ipsjcv.a.springeropen.com/articles/10.1186/s41074-018-0049-4>) (δεξιά εικόνα).

Το μοντέλο ολοκληρωτικών εξισώσεων (I.E.M.) αποτελεί μια επέκταση της προσέγγισης του εφαπτομενικού επιπέδου και άλλων μεθόδων που στηρίζονται σε φυσικές ιδιότητες η οποία χρησιμοποιείται εκτενώς στο φάσμα των μικροκυμάτων. Για τον υπολογισμό του συντελεστή οπισθοσκέδασης του σήματος ενός Radar απαιτούνται τα εξής στοιχεία:

- Ο συντελεστής τραχύτητας kH_{rms}
- Το μήκος συσχέτισης L
- Η γκαουσιανή ή εκθετική συνάρτηση συσχέτισης μαζί με το αντίστοιχο φάσμα τραχύτητας
- Η διηλεκτρική σταθερά του στόχου του Radar (υπολογίζεται σαν συνάρτηση της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας με βάση το μοντέλο Hallikainen)

Επειδή και πάλι η προσπίπτουσα ποσότητα η οποία σκεδάζεται προς την ίδια ή άλλη κατεύθυνση αναλύεται σε μονή και πολλαπλή σκέδαση, αναλόγως αναλύονται και οι συντελεστές σκέδασης ή οπισθοσκέδασης [29]. Παρακάτω παρατίθεται η σχέση του συντελεστή οπισθοσκέδασης με βάση το I.E.M. για μονή σκέδαση (η πολλαπλή σκέδαση στην πράξη εμφανίζεται μόνο μέσω του συντελεστή οπισθοσκέδασης για την HV πόλωση και απαιτεί την γνώση μιας κατανομής υψομέτρων της επιφάνειας) με την σημείωση ότι ως n_{max} ορίζεται ο φυσικός αριθμός στον οποίο συγκλίνει η σειρά με την άλλη παράμετρο εντός της σειράς να υπολογίζεται με βάση τους συντελεστές Fresnel για $-s$ και $-p$ πολωμένη Η/Μ ακτινοβολία.

$$\sigma_{qp}^s = \frac{k^2}{2} \exp(-2k_z^2 H_{rms}^2) \sum_{n=1}^{n_{max}} |I_{qp}^n|^2 \frac{W^n(-2k_x, 0)}{n!} \quad (37)$$

Λόγω του υπολογιστικού κόστους και της δυσκολίας εφαρμογής του I.E.M. για τον υπολογισμό του συντελεστή οπισθοσκέδασης βάσει των παραμέτρων που προαναφέρθηκαν, οι σχέσεις απλοποιήθηκαν και πλέον γίνονται με την παρακάτω σειρά (ενδεικτικά για την VV πόλωση):

- Υπολογισμός των συντελεστών Fresnel καθώς και των συναρτήσεων μετάβασης ανακλαστικότητας από την γωνία πρόσπτωσης έως την γωνία ανάκλασης (η γωνία ανάκλασης ισούται με το 0 για οπισθοσκέδαση) συναρτήσει της μιγαδικής/σύνθετης

- διηλεκτρικής σταθεράς (σχέσεις (38), (39), (40), (41))
- Υπολογισμός του φάσματος τραχύτητας με βάση τις απλοποιημένες σχέσεις που έχουν προταθεί από τους Fung 2010 και Brogioni et. al. 2010 για γκαουσιανή ή εκθετική συνάρτηση συσχέτισης [30], [53]
- Υπολογισμός των συντελεστών του εφαπτομενικού πεδίου f_{vv} και F_{vv} βάσει των συναρτήσεων μετάβασης ανακλαστικότητας
- Υπολογισμός του συντελεστή οπισθοσκέδασης [30]

$$R_v = \frac{\epsilon_r \cos\theta + \sqrt{(\epsilon_r - \sin^2\theta)}}{\epsilon_r \cos\theta - \sqrt{(\epsilon_r - \sin^2\theta)}} \quad (38)$$

$$F_t = 8R_{v0}^2 \sin^2\theta \left(\frac{\cos\theta + \sqrt{(\epsilon_r - \sin^2\theta)}}{\cos\theta - \sqrt{(\epsilon_r - \sin^2\theta)}} \right) \quad (39)$$

$$S_t = \frac{|F_t|^2 \sum_{n=1}^{n_{max}} \frac{(kHrms\cos\theta)^2}{n!} W^{(n)}(2k\sin\theta, 0)}{\sum_{n=1}^{n_{max}} \frac{(kHrms\cos\theta)^2}{n!} |F_t|^2 + \frac{2^{n+2} R_{v0}}{\exp(kHrms\cos\theta)^2 \cos\theta} |W^{(n)}(2k\sin\theta, 0)|^2} \quad (40)$$

$$R_{tv} = R_v(\theta) + (R_v(0) - R_v(\theta)) \left(1 - \frac{S_{t0}}{S_t}\right) \quad (41)$$

$$W^{(n)}(2k\sin\theta) = \frac{2\pi n L^2}{\{n^2 + (2kL\sin\theta)^2\}^{1.5}} \quad (41) - \text{φάσμα Τραχύτητας βάσει Fung 2010 για Εκθετική Συνάρτηση Συσχέτισης}$$

$$W^{(n)}(k) = \left(\frac{L}{n}\right)^2 \left(1 + \frac{kL^2}{n^2}\right)^{-1.5} \quad (42) - \text{φάσμα Τραχύτητας βάσει Brogioni et al. 2010 για Εκθετική Συνάρτηση Συσχέτισης}$$

$$W^{(n)}(2k\sin\theta) = \frac{\pi L^2}{n} \exp\left(-\frac{(kL\sin\theta)^2}{n}\right) \quad (43) - \text{φάσμα Τραχύτητας βάσει Fung 2010 για Γκαουσιανή Συνάρτηση Συσχέτισης}$$

$$W^{(n)}(k) = \frac{L^2}{2n} \exp\left(-\frac{kL^2}{4\pi}\right) \quad (44) - \text{φάσμα Τραχύτητας βάσει Brogioni et al. 2010 για Γκαουσιανή Συνάρτηση Συσχέτισης}$$

$$f_{vv} = \frac{2R_v}{\cos\theta} \quad (45)$$

$$F_{vv} = -\left(\frac{\sin^2\theta}{\cos\theta} - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}\right)(1 + R_v)^2 - 2\sin^2\theta \left(\frac{1}{\cos\theta} + \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}}\right)(1 - R_v)(1 + R_v) + \left(\frac{\sin^2\theta}{\cos\theta} + \frac{1 + \sin^2\theta}{\sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}}\right)(1 - R_v)^2 \quad (46)$$

$$\sigma_{vv}^0 = \frac{k^2}{4\pi} \exp(-2k^2 Hrms^2 \cos^2\theta) \sum_{n=1}^{n_{max}} |(2kHrms)^n f_{vv} \exp(-2k^2 Hrms^2 \cos^2\theta) + (kHrms\cos\theta)^2 F_{vv}|^2 \frac{W^{(n)}(2k\sin\theta, 0)}{n!}$$

1.5 Αλληλεπίδραση Εδαφικής Υγρασίας - Συμβολομετρικής Φάσης (inSAR)

Διαθέτοντας 2 επικαλυπτόμενες SAR απεικονίσεις οι οποίες έχουν ληφθεί είτε από την ίδια είτε από παράλληλη τροχιά υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού της συμβολομετρικής φάσης, δηλαδή της διαφοράς φάσης των 2 SAR απεικονίσεων. Ειδικότερα, η συμβολομετρική φάση υπολογίζεται μέσω του μιγαδικού πολλαπλασιασμού των 2 SAR απεικονίσεων ενώ μπορεί να χαρακτηριστεί ως το άθροισμα των παρακάτω όρων [47]:

$$\varphi = \varphi_{topo} + \varphi_{flat} + \varphi_{disp} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise} \quad (48)$$

όπου φ_{topo} η συνιστώσα της συμβολομετρικής φάσης λόγω τοπογραφίας

φ_{flat} ο όρος “επίπεδης γης” της συμβολομετρικής φάσης ο οποίος σχετίζεται με την επίδραση της καμπυλότητας της γης στην συμβολομετρική φάση

φ_{disp} η συνιστώσα της συμβολομετρικής φάσης λόγω σχετικής κίνησης του εδάφους (π.χ. σαν αποτέλεσμα σεισμικών δονήσεων, κατολισθήσεων κ.τ.λ.) μεταξύ των λήψεων (ο συγκεκριμένος όρος υπάρχει στην περίπτωση της διαφορικής συμβολομετρίας όπου το ποσοστό της επικάλυψης των απεικονίσεων φτάνει μέχρι το 99%)

φ_{atm} η συνιστώσα επίδρασης της ατμόσφαιρας στην συμβολομετρική φάση λόγω των υδρατμών της τροπόσφαιρα αλλά και της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων στην ιονόσφαιρα [10]

φ_{noise} η συνιστώσα “θορύβου” της συμβολομετρικής φάσης η οποία προέρχεται από συστηματικά σφάλματα αλλά και ενδεχόμενους παράγοντες με τους οποίους αλληλεπιδρά το σήμα του SAR όπως είναι η εδαφική υγρασία

Οι 3 πρώτοι όροι της σχέσης (48) αναλύονται αφετέρου από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\varphi_{flat} = - \frac{B_n s}{R \tan \theta} \quad (49)$$

όπου B_n η κάθετη συνιστώσα της γραμμής βάσης

s η μετατόπιση του σκεδαστή κατά την πλευρική απόσταση R

R η πλευρική απόσταση δέκτη-σκεδαστή

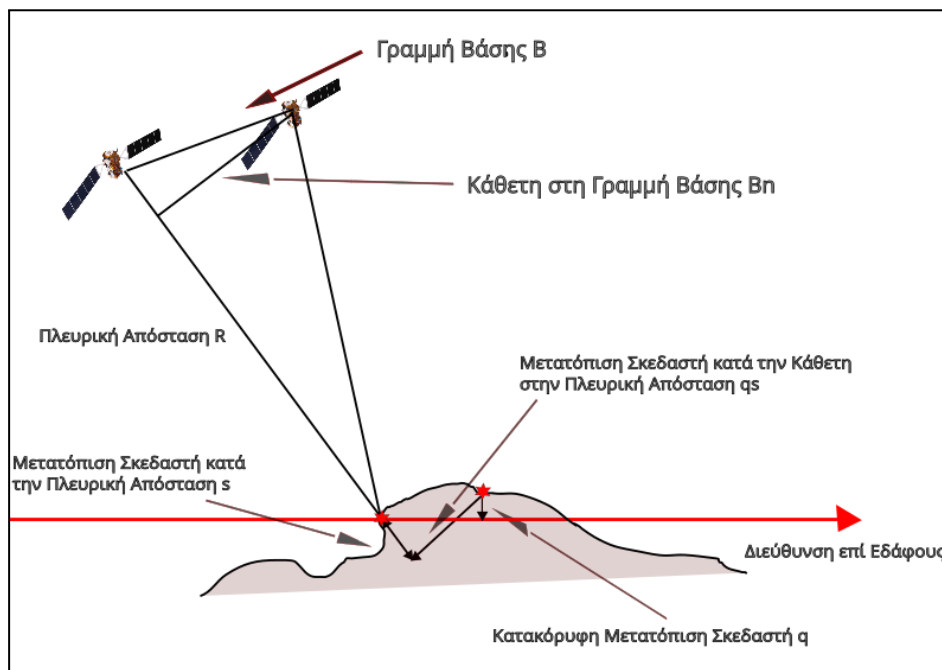
θ η γωνία πρόσπτωσης του σήματος του SAR

$$\varphi_{topo} = - \frac{B_n q}{R \sin \theta} \quad (50)$$

όπου q η κατακόρυφη μετατόπιση δέκτη-σκεδαστή

$$\varphi_{disp} = - \frac{4\pi}{\lambda} d \quad (51)$$

όπου d η σχετική μετακίνηση της θέσης του σκεδαστή μεταξύ 2 ή περισσότερων λήψεων



Σχήμα 18. Σχηματική απεικόνιση των γεωμετρικών όρων που υπεισέρχονται στις σχέσεις υπολογισμού των συνιστωσών τοπογραφίας και “επίπεδης γης” της συμβολομετρικής φάσης.

Πάντως, ένα πλήθος παραγόντων που έχουν μεσολαβήσει μεταξύ των 2 απεικονίσεων όπως είναι λ.χ. οι διαφορές των κλιματολογικών συνθηκών, η διάβρωση του εδάφους, η αποψίλωση κ.ο.κ. μπορούν να μειώσουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων τα οποία προέρχονται από επεξεργασίες της συμβολομετρικής φάσης. Η εκτίμηση της ακρίβειας της συμβολομετρικής φάσης γίνεται μέσω του υπολογισμού της συνάφειας φάσης η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση [10]:

$$\rho = \frac{[p_1 p_2^*]}{\sqrt{[p_1 p_1^*][p_2 p_2^*]}} \quad (52)$$

όπου p_1 τα εικονοστοιχεία της 1ης μιγαδικής απεικόνισης του συμβολομετρικού ζευγαριού

p_2 τα εικονοστοιχεία της 2ης μιγαδικής απεικόνισης του συμβολομετρικού ζευγαριού

[*] ο τελεστής πρόβλεψης που στην πράξη προσεγγίζεται ως ένας τοπικός χωρικός μέσος όρος [48]

Επιπλέον, ένας τρόπος για να αναγνωριστεί η επίδραση της εδαφικής υγρασίας στην συμβολομετρική φάση είναι ο υπολογισμός του κλεισίματος φάσης με χρήση μίας ή περισσότερων τριπλετών SAR απεικονίσεων. Το κλείσιμο φάσης υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση: [48]

$$\xi_{123} = \varphi_{12} + \varphi_{23} - \varphi_{13} \quad (53)$$

Η ποσότητα του κλεισίματος φάσης υπό ιδεατές συνθήκες θα πρέπει να ισούται με το μηδεν βάσει της παραδοχής ότι οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις καθώς και οι σχετικές μετατοπίσεις της φυσικής γήινης επιφάνειας μεταξύ των απεικονίσεων 1-3 είναι η συνισταμένη των ατμοσφαιρικών επιδράσεων και μετατοπίσεων μεταξύ των απεικονίσεων 1-2 και 2-3. Επομένως, υπό ιδεατές συνθήκες το κλείσιμο φάσης είναι μια ποσότητα αμετάβλητη σε σχέση με τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις στην συμβολομετρική φάση και τις μετατοπίσεις της φυσικής γήινης επιφάνειας. Όμως, στην πραγματικότητα τιμές κλεισίματος φάσης διάφορες του μηδενός παρατηρούνται λόγω της παρουσίας λευκού θορύβου (μηδενικός μέσος όρος και πεπερασμένη μεταβλητότητα) στην συμβολομετρική φάση καθώς και σε μεταβολές στην διηλεκτρική συμπεριφορά των σκεδαστών που φαίνονται στις SAR απεικονίσεις και στα αντίστοιχα συμβολογράμματα (ή διαγράμματα κροσσών συμβολής). Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η διηλεκτρική συμπεριφορά ενός πορώδους υλικού συνδέεται άμεσα με το ποσοστό του υλικού σε νερό όπως έχει αναλυθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια. Τέλος, από τους De Zan et al. 2014 έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο έμμεσου προσδιορισμού της συμβολομετρικής φάσης συναρτήσει της ηλεκτρικής επιτρεπτότητας ϵ ή οποία μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r (όπως έχει ήδη αναφερθεί μέσω του εμπειρικού μοντέλου των Hallikainen et al. 1985 προσδιορίζεται βάσει της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας) [49] ενώ οι Karamvavis et al. 2022 μέσω μαθηματικής βελτιστοποίησης με χρήση του κλεισίματος φάσης και SAR και μοντελοποιημένων συμβολομετρικών χρονοσειρών προσδιόρισαν εμμέσως μια χρονοσειρά ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας [50]. Παρακάτω παρουσιάζεται η σχέση υπολογισμού της μοντελοποιημένης συμβολομετρικής φάσης για ένα ζευγάρι SAR απεικονίσεων συναρτήσει της ηλεκτρικής επιτρεπτότητας ϵ .

$$\varphi_{12}^{model} = \frac{1}{2j(k_1 - k_2^*)} \quad (54)$$

όπου k_1, k_2 οι κυματαριθμοί σαν μιγαδικοί αριθμοί για κάθε μια από τις 2 απεικονίσεις οι οποίοι υπολογίζονται βάσει της παρακάτω σχέσης:

$$k = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon} \quad (55)$$

όπου ω η γωνιακή συχνότητα

$\mu = \mu_0$ η μαγνητική διαπερατότητα του κενού (η μαγνητική διαπερατότητα παίρνει διαφορετικές τιμές μόνο για ορισμένα μέταλλα όπως ο σίδηρος και το νικέλιο)

$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ η ηλεκτρική επιτρεπτότητα η οποία προσδιορίζεται ως το γινόμενο της ηλεκτρικής επιτρεπτότητας στο κενό επί την διηλεκτρική σταθερά (προσδιορίζεται από το μοντέλο των Hallikainen et al. 1985)

2. Βιβλιογραφική Αναφορά Μοντέλων Οπισθοσκέδασης

2.1. Μοντέλο Dubois

Το μοντέλο οπισθοσκέδασης των Dubois et al. 1995 περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.4.2. ως προς τις σχέσεις υπολογισμού, τα εύρη εγκυρότητας των υπεισερχόμενων στις σχέσεις υπολογισμού παραμέτρων και τα δεδομένα αναφοράς βάσει των οποίων θεμελιώθηκαν οι σχέσεις. Στην δημοσίευση [19] το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης της οπισθοσκέδασης συγκρίνεται μόνο σε σχέση με την αντιστροφή του μοντέλου (κάνοντας χρήση των μετρήσεων σκεδασόμετρου) για τον έμμεσο προσδιορισμό της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα in-situ και μοντελοποιημένων τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας να ισούται με 4.2%. Στην δημοσίευση των Baghdadi et al. 2015 συγκρίθηκαν τα σύνολα μοντελοποιημένων και SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης (από πολλαπλούς SAR δέκτες που λειτουργούν στις X, C και L μπάντες) με τα αποτελέσματα της σύγκρισης να παρατίθενται πάλι στο κεφάλαιο 3.4.2. [20].

2.2. New Empirical Model (N.E.M.)

Το μοντέλο οπισθοσκέδασης “New Empirical” το οποίο δημιουργήθηκε σαν εξέλιξη του μοντέλου Dubois τεκμηριώθηκε βάσει επίγειων δεδομένων αναφοράς μετρήσεων ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας με την βαρυτομετρική μέθοδο και την μέθοδο T.D.R. και μετρήσεων του μέσου τετραγωνικού σφάλματος της κατανομής των υψομέτρων των επιφανειών μελέτης μέσω laser και needle pinmeters. Το πεδίο εφαρμογής για την ανάπτυξη του μοντέλου “New Empirical” αφορούσε σε αγροτικές εκτάσεις. Συγκρίνοντας τους συντελεστές οπισθοσκέδασης οι οποίοι προκύπτουν με εφαρμογή του μοντέλου “New Empirical” σε σχέση με τους συντελεστές οπισθοσκέδασης από τα SAR δεδομένα, ο συντελεστής προσδιορισμού της μεταβλητότητας βρέθηκε ίσος με $R^2 = 0.57$ και 0.41 για την VV και HV πόλωση αντίστοιχα, κάτι το οποίο αντιστοιχεί σε μέτριο προς υψηλό βαθμό προσαρμογής των μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης σε σχέση με αυτών από τα SAR δεδομένα ενώ η απόκλιση μεταξύ συνόλων SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης ελαχιστοποιείται [20].

2.3. Μοντέλο Oh

Για τις εκδόσεις του μοντέλου οπισθοσκέδασης των Oh et. al 2002 και Oh et al. 2004, η τεκμηρίωση τους έγινε με χρήση αερομεταφερόμενων SAR δεκτών και σκεδασόμετρων και με επίγεια σύνολα δεδομένων ανάλογα με αυτά που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Στις αντίστοιχες δημοσιεύσεις το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης της οπισθοσκέδασης γίνεται βάσει των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν για τον ταυτόχρονο έμμεσο προσδιορισμό με χρήση συντελεστών οπισθοσκέδασης από όλες τις διαθέσιμες πολώσεις (HH, HV, VV) [25], [26]. Στην δημοσίευση των Choker et al. όπου η σύγκριση των συνόλων SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης έγινε μέσω της απόκλισης των 2 συνόλων και των δεικτών RMSE, δεν παρατηρήθηκε με βάση τα παραπάνω κριτήρια κάποια ουσιαστική διαφορά για τις εκδόσεις από τα έτη 2002 και 2004.

2.4. Integral Equation Model (I.E.M.)

Το φυσικό μοντέλο οπισθοσκέδασης I.E.M. τεκμηριώθηκε βάσει μαθηματικών και φυσικών θεωρημάτων με τα αποτελέσματα διαφόρων ερευνών στην εφαρμογή του να μην είναι ικανοποιητικά λόγω της μεγάλης ευαισθησίας της συνάρτησης συσχέτισης του μοντελοποιημένου συντελεστή οπισθοσκέδασης στις μεταβολές της τραχύτητας μέσω του δείκτη $kHrms$ [28]. Η συγκεκριμένη διαπίστωση επιβεβαιώνεται και από τις μεγάλες τιμές του δείκτη R.M.S.E. ο οποίος ενίοτε ξεπερνά και τα 10 dB

3. Εφαρμογή Ανάλυσης Μοντέλων Οπισθοσκέδασης για τον Προσδιορισμό της Εδαφικής Υγρασίας

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, θα γίνει μια ανάλυση των φυσικών, ημι-εμπειρικών και εμπειρικών μοντέλων οπισθοσκέδασης που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα α) βάσει της ακρίβειας (με την στατιστική αλλά και την περιγραφική έννοια) με την οποία οι μοντελοποιημένες τιμές των συντελεστών οπισθοσκέδασης στα σύνολα δεδομένων κάθε σταθμού προσεγγίζουν τις πραγματικές παρατηρήσεις από τις SAR απεικονίσεις Sentinel-1, και β) βάσει της ακρίβειας με την οποία τα μοντέλα “αντιστρέφονται” για να εξαχθεί η εδαφική υγρασία μέσω μιας διαδικασίας μαθηματικής βελτιστοποίησης. Ειδικότερα, θα γίνει η περιγραφή του τρόπου με τον οποίο έγινε η συλλογή των πρωτογενών δορυφορικών και επίγειων συνόλων δεδομένων (εδαφική υγρασία, υετός κ.α.). Έπειτα, θα περιγραφούν οι επεξεργασίες των συνόλων δεδομένων οι οποίες απαιτούνταν για την εφαρμογή των μοντέλων οπισθοσκέδασης καθώς και για την ανάλυση των αποτελεσμάτων (στατιστική σύγκριση συνόλων δεδομένων και εξαγωγή εδαφικής υγρασίας). Το πεδίο εφαρμογής αφορά 10 σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. (International Soil Moisture Network) σε διάφορες περιοχές (Η.Π.Α., Αφρική, Αυστραλία) για τις οποίες δύναται να συλλεχθούν ταυτόχρονα επίγεια και δορυφορικά δεδομένα.

3.2. Περιοχές Ενδιαφέροντος

3.2.1. Εισαγωγή - Γενικά Στοιχεία

Οι περιοχές ενδιαφέροντος (Areas of Interest) αφορούν σε εκτάσεις για τις οποίες τα εικονοστοιχεία ραδιομετρικά και γεωμετρικά διορθωμένων Sentinel-1 SAR απεικονίσεων και τα δεδομένα εδαφικής υγρασίας, θερμοκρασίας και υετού μπορούν να συλλεχθούν σχεδόν ταυτόχρονα για την ανάλυση της δυνατότητας έμμεσου προσδιορισμού της εδαφικής υγρασίας. Η μέγιστη έκταση των συγκεκριμένων περιοχών επιλέχθηκε να είναι το 1 τετραγωνικό χιλιόμετρο ενώ από γεωγραφικής απόψεως επιλέχθηκαν περιοχές οι οποίες έχουν χαμηλό ποσοστό κάλυψης βλάστησης λόγω της αλληλεπίδρασης της μικροκυματικής ακτινοβολίας με τα διάφορα στρώματα της βλάστησης και μικρό αριθμό ημερών ή/και νυκτών με θερμοκρασίας υπό του μηδενός, καθόσον σε αυτές τις συνθήκες το έδαφος παγώνει και αναδεικνύονται άλλες συμπεριφορές. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι περιοχές ενδιαφέροντος ορίστηκαν βάσει της επιλογής ομοειδών εκτάσεων εντός της ζώνης του ενός τετραγωνικού χιλιομέτρου, όπως αυτές προέκυψαν από φωτοερμηνεία οπτικών δορυφορικών εικόνων πολύ υψηλής ανάλυσης και δεικτών N.D.V.I. (Normalized Difference Vegetation Index) οι οποίοι για Sentinel-2 απεικονίσεις δίνονται από την σχέση:

$$NDVI = \frac{B8-B4}{B8+B4} \cdot (56)$$

όπου B8 το κόκκινο κανάλι του ορατού ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με κεντρική συχνότητα 664.6 nm

B4 το εγγύς υπέρυθρο κανάλι με κεντρική συχνότητα 832.8 nm

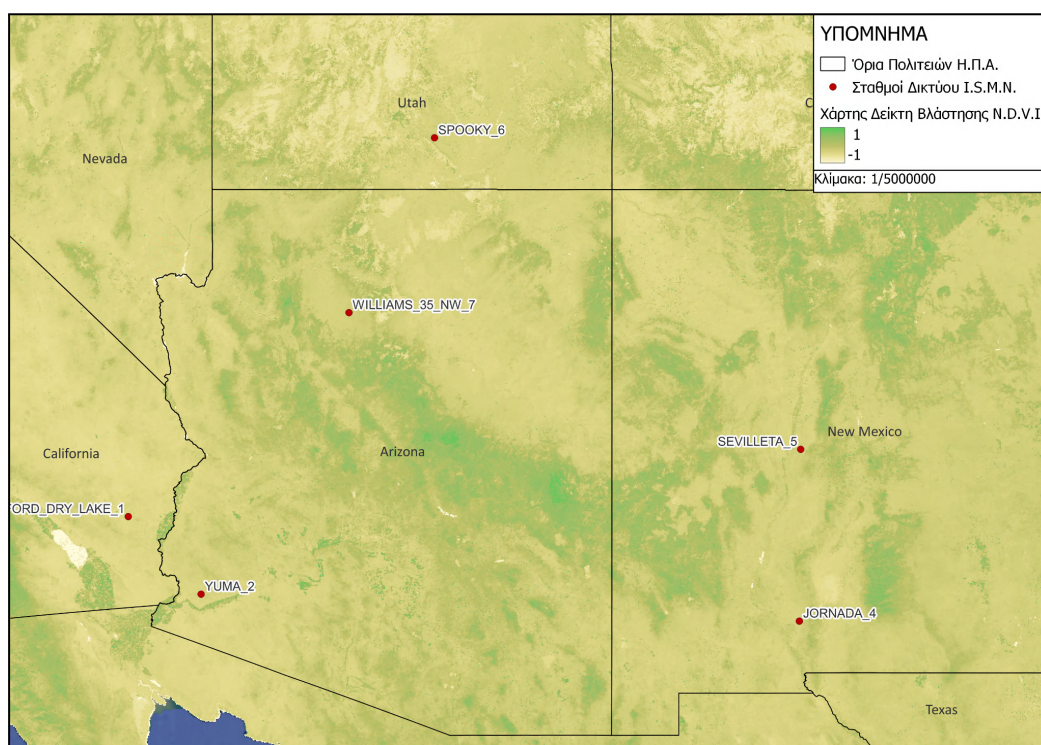
3.2.2. Περιοχές Ενδιαφέροντος - Η.Π.Α.

Στις Η.Π.Α. επιλέχθηκαν 6 σταθμοί του δικτύου I.S.M.N. για την πρακτική εφαρμογή της ανάλυσης των μοντέλων οπισθοσκέδασης για τον έμμεσο προσδιορισμό της εδαφικής υγρασίας. Λόγω του περιορισμού που θέτει η βλάστηση στην οπισθοσκέδαση του προσπίπτοντος στα διάφορα εδαφικά στρώματα SAR σήματος, επιλέχθηκαν άγονες ή ερημικές περιοχές στις Νοτιοδυτικές Η.Π.Α.. Ειδικότερα, στις συγκεκριμένες περιοχές παρατηρούνται χαμηλά ποσοστά επιφανειακής υγρασίας και βλάστησης όπως αυτά προκύπτουν από τους χαμηλούς μέσους χρονιαίους όρους των δεικτών N.D.V.I. και N.D.M.I. (Normalized Difference Moisture Index) από Sentinel-2 απεικονίσεις που φαίνονται στα παρακάτω σχήματα μαζί με άλλα κλιματολογικά και περιβαλλοντικά στοιχεία. Επιπλέον, η σχέση υπολογισμού του δείκτη N.D.M.I. για Sentinel-2 απεικονίσεις είναι η εξής:

$$NDMI = \frac{B8-B11}{B8+B11} \cdot (57)$$

όπου B8 το εγγύς υπέρυθρο κανάλι

B11 το μικροκυματικό υπέρυθρο (S.W.I.R.) κανάλι με κεντρική συχνότητα 1613.7 nm



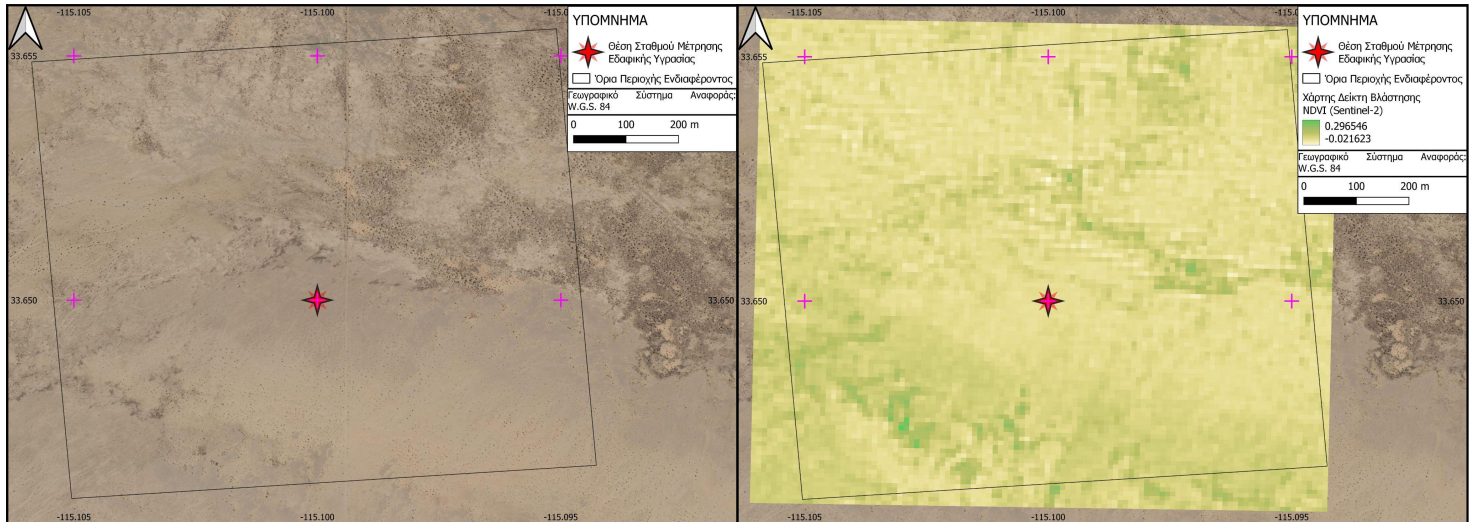
Σχήμα 19. Απόδοση της τοποθεσίας των σταθμών του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α. σε υπόβαθρο του χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. (προϊόν απεικονίσεων MODIS) όπου φαίνεται να βρίσκονται σε περιοχές με χαμηλό ποσοστό κάλυψης από βλάστηση.

Σταθμός	Χώρα	Κάλυψη Γης κατά WorldCover	Κλιματική Ταξινόμηση κατά Korpen	Χρονιαίος Μέσος Όρος Δείκτη NDVI	Χρονιαίος Μέσος Όρος Δείκτη NDMI
Ford Dry Lake	Η.Π.Α.	Bare / sparse vegetation	Hot Desert (BWh)	0.067	-0.140
Jornada	Η.Π.Α.	Shrubland	Cold Semi-arid (BSk)	0.177	-0.121
Sevilleta	Η.Π.Α.	Grassland	Cold Semi-arid (BSk)	0.142	-0.121
Spooky	Η.Π.Α.	Bare / sparse vegetation	Cold Semi-arid (BSk)	0.160	-0.113
Williams 35 NW	Η.Π.Α.	Grassland	Humid Continental (DSb)	0.094	-0.197

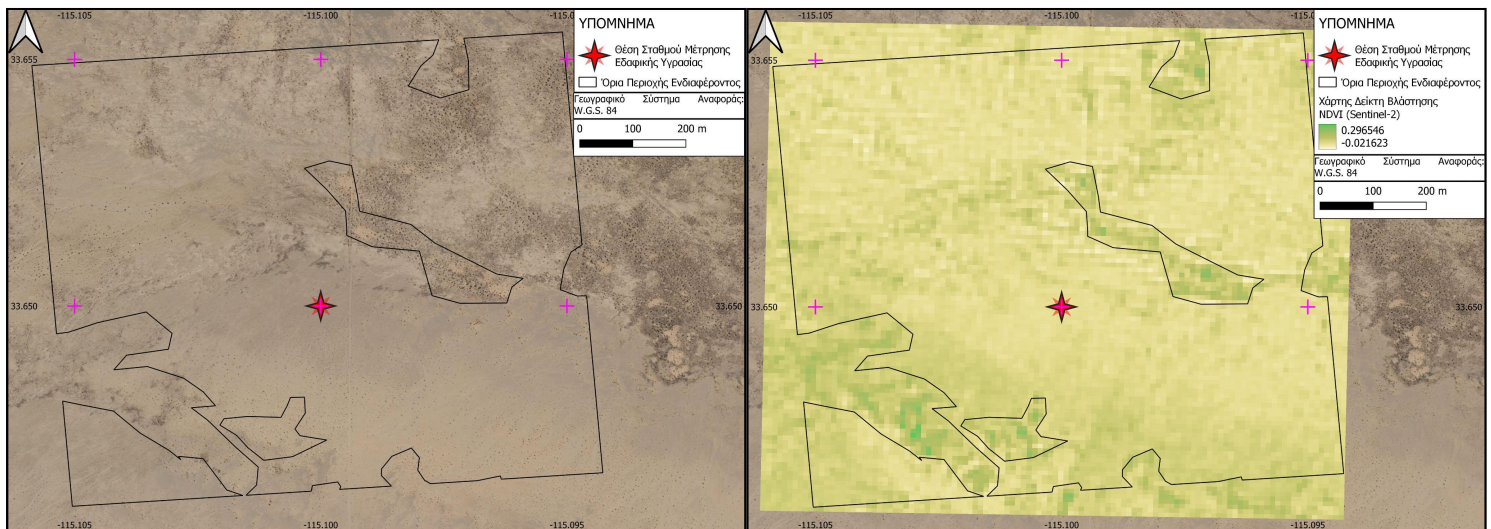
Πίνακας 1. Πίνακας στον οποίο παρατηρούνται για κάθε σταθμό του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α. οι χαρακτηρισμοί κάλυψης γης κατά WorldCover, η κλιματική ταξινόμηση με βάση την κλίμακα του Korpen καθώς και οι χρονιαίοι μέσοι όροι των δεικτών N.D.V.I. και N.D.M.I. από Sentinel-2 απεικονίσεις.

Παρακάτω ακολουθούν οι περιγραφές των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των σταθμών του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α. μαζί με τα αντίστοιχα τους σχήματα.

1. Σταθμός “Ford Dry Lake”: Ο συγκεκριμένος σταθμός βρίσκεται εντός της ερήμου “Colorado” στο νοτιοανατολικό τμήμα της πολιτείας της Καλιφόρνια σε υψόμετρο 123.88 μέτρων από το επίπεδο της θάλασσας. Η βλάστηση της συγκεκριμένης περιοχής μπορεί να χαρακτηριστεί ως αραιή και ξηρή βάσει του χρονιαίου μέσου όρου του δείκτη N.D.V.I. με τα κυριότερα είδη που επικρατούν να είναι διάφοροι θάμνοι, αλυκές κ.α. [32]. Από κλιματολογικής απόψεως, βάσει της κλίμακας του Korpen η ευρύτερη περιοχή λαμβάνει τον χαρακτηρισμό “BWh - Κλίμα Θερμής Ερήμου” με μέσο χρονιαίο όρο υετού της τάξης των 0.007 χιλιοστών, μέση χρονιαία θερμοκρασία εδάφους τους 27.25 βαθμούς Κελσίου και ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία εδάφους τους 1.3 και 55 βαθμούς Κελσίου αντίστοιχα. Τέλος, από εδαφολογικής απόψεως επικρατούν οι αμμώδεις εδαφικοί κόκκοι με ποσοστό 79% [33].



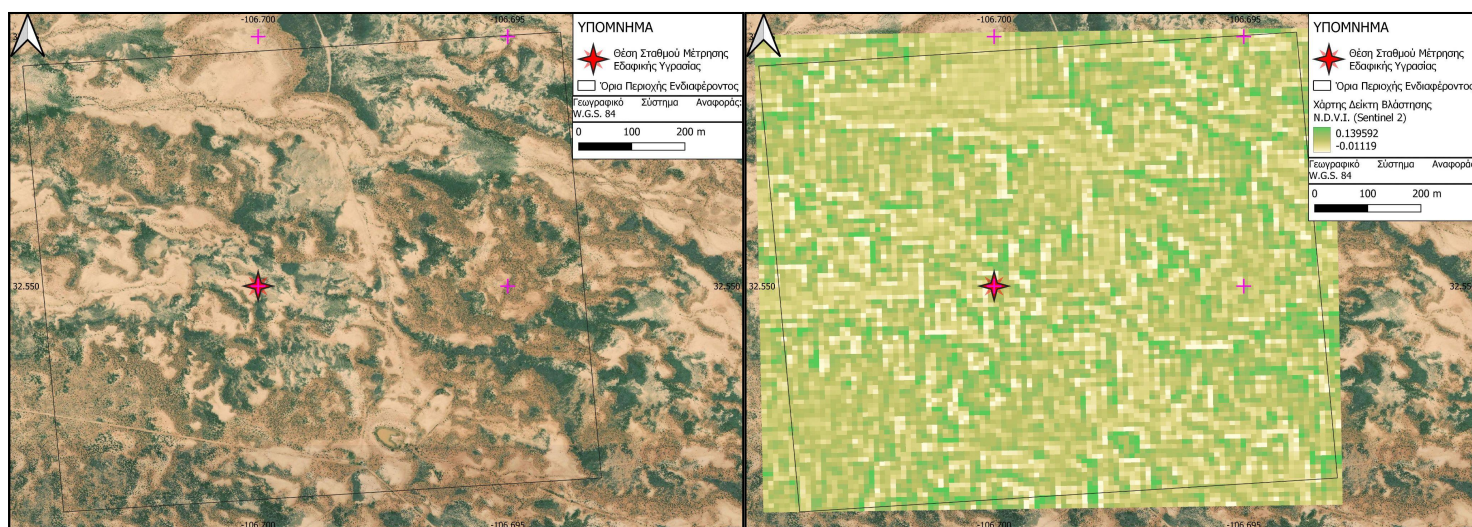
Σχήμα 20. Χάρτης απεικόνισης των μέγιστων ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Ford Dry Lake” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).



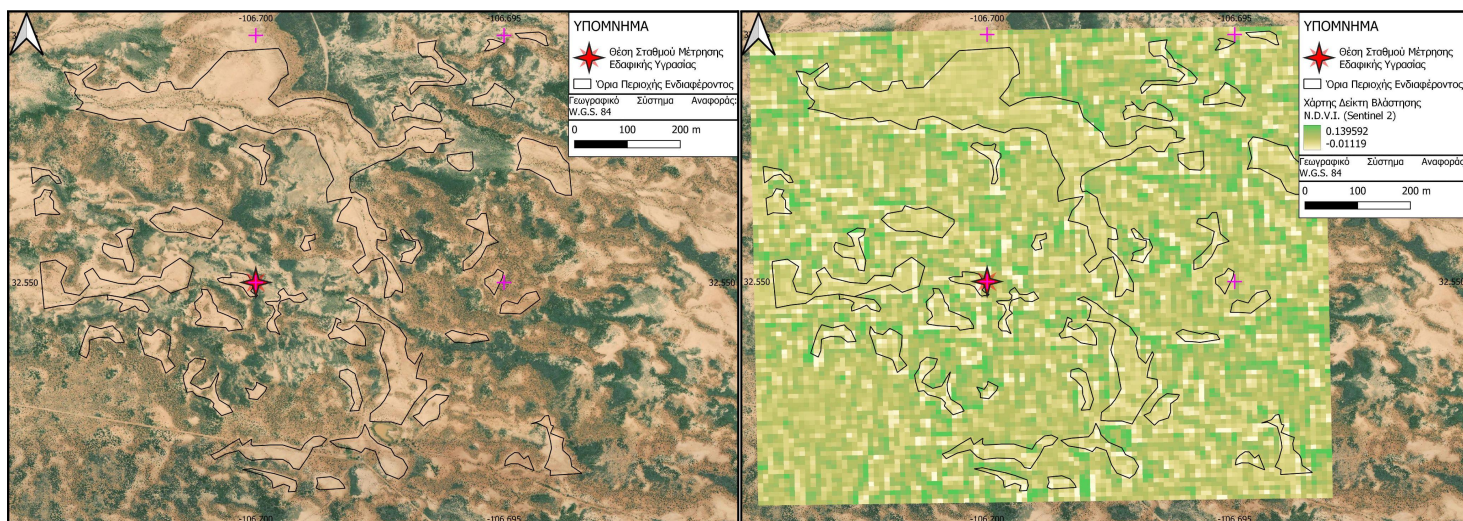
Σχήμα 21. Χάρτης απεικόνισης των αποκομμένων βάσει φωτοερμηνείας ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Ford Dry Lake” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

2. Σταθμός “Jornada”: Ο συγκεκριμένος σταθμός βρίσκεται εντός της ερήμου Chihuahua στο νότιο τμήμα της πολιτείας του Νέου Μεξικού σε υψόμετρο 1328.93 μέτρων από το επίπεδο της θάλασσας. Τα είδη βλάστησης που κυριαρχούν είναι είδη όπως ο θάμνος Κρεοσώπου (*Larrea tridentata*), είδη ντάλαας (*Psoralea scorpius*) και άλλα πόα φυτά [34]. Ο χρονιαίος μέσος όρος του δείκτη N.D.V.I. από απεικονίσεις Sentinel-2 της περιοχής αντιστοιχεί σε θαμνώδη έκταση ενώ ο αρνητικός χρονιαίος μέσος όρος του δείκτη N.D.M.I. αντιστοιχεί σε περιοχή που αντιμετωπίζει φαινόμενα λειψυδρίας. Επιπλέον, από κλιματολογικής απόψεως η περιοχή λαμβάνει τον χαρακτηρισμό “BSk - Ψυχρό Ημι-ξηρό Κλίμα” με μέσο χρονιαίο όρο υετού της τάξης των 0.031 χιλιοστών, μέση χρονιαία θερμοκρασία εδάφους τους 22.76 βαθμούς Κελσίου και ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία αντίστοιχα τους 0 και 42.4 βαθμούς Κελσίου. Τέλος, από εδαφολογικής απόψεως το ήμισυ

των εδαφικών κόκκων είναι αμμώδεις (50%), ενώ το υπόλοιπο 21% και 29% είναι πυλώδεις και αργιλώδεις αντίστοιχα [33].



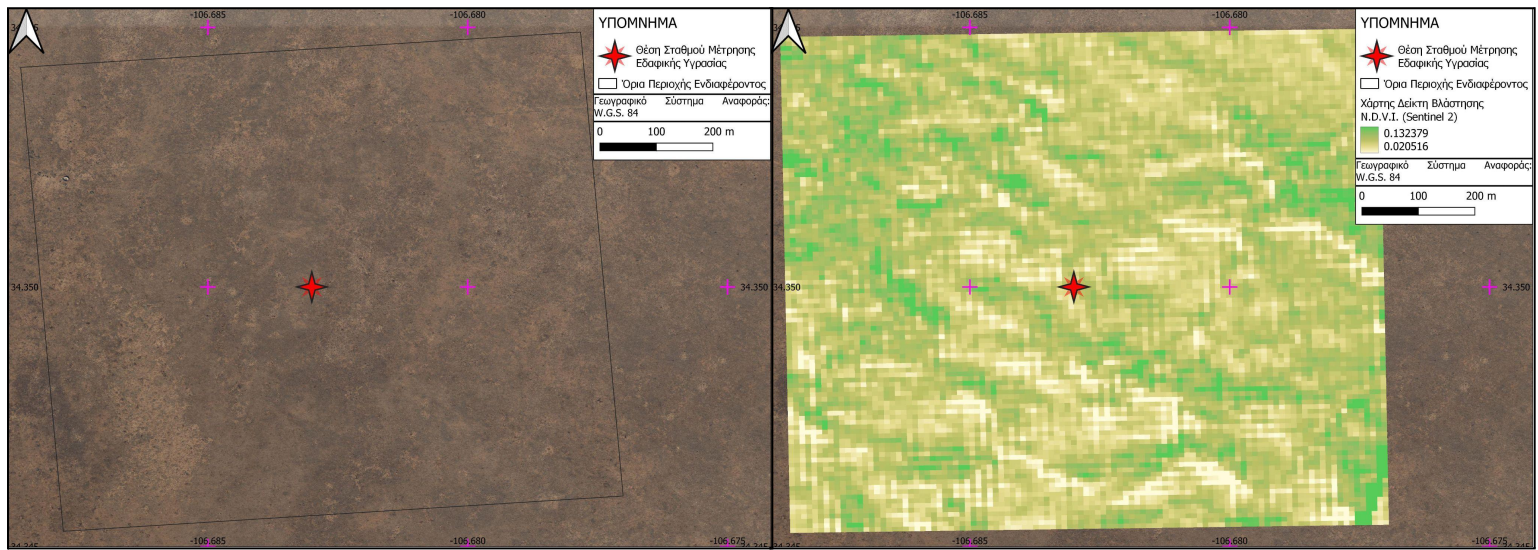
Σχήμα 22. Χάρτης απεικόνισης των μέγιστων ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Jornada” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).



Σχήμα 23. Χάρτης απεικόνισης των αποκομμένων βάσει φωτοερμηνείας ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Jornada” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

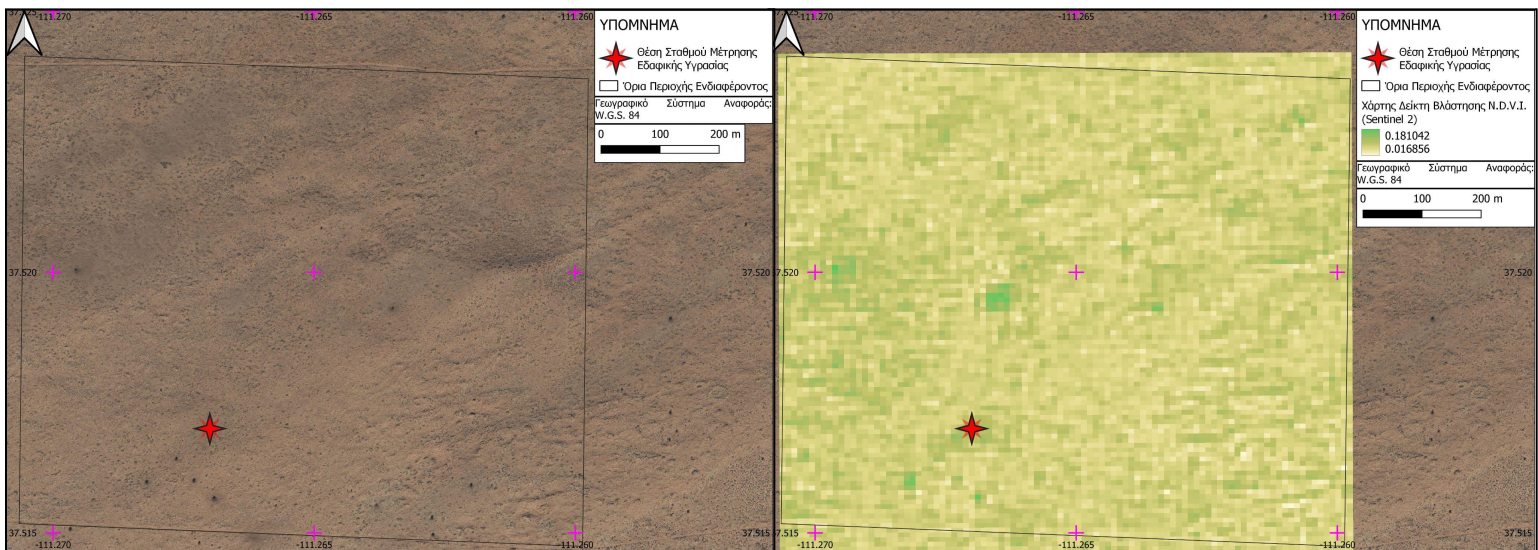
3. Σταθμός “Sevilleta”: Ο συγκεκριμένος σταθμός βρίσκεται πάλι στην πολιτεία του Νέου Μεξικού στο βόρειο τμήμα της ερήμου Chihuahua πλησίον του ποταμού Rio Grande σε υψόμετρο 1595.02 μέτρων. Ο χρονιαίος μέσος όρος του δείκτη N.D.V.I. αντιστοιχεί σε περιοχή με θαμνώδεις εκτάσεις ενώ ο δείκτης N.D.M.I. σε άνυδρη έκταση. Το κλίμα στην περιοχή δέχεται τον χαρακτηρισμό “BSk - Ψυχρό Ημι-ξηρό Κλίμα”, ο χρονιαίος μέσος όρος του νετού είναι της τάξης των 0.033 χιλιοστών, η μέση χρονιαία θερμοκρασία εδάφους είναι της τάξης των 21.40 βαθμών κελσίου ενώ η ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία εδάφους της

τάξης των -3 και 50.2 βαθμών κελσίου αντίστοιχα. Τέλος, η εδαφική σύσταση ταυτίζεται με αυτή της περιοχής γύρω από τον σταθμό “Jornada” [33].

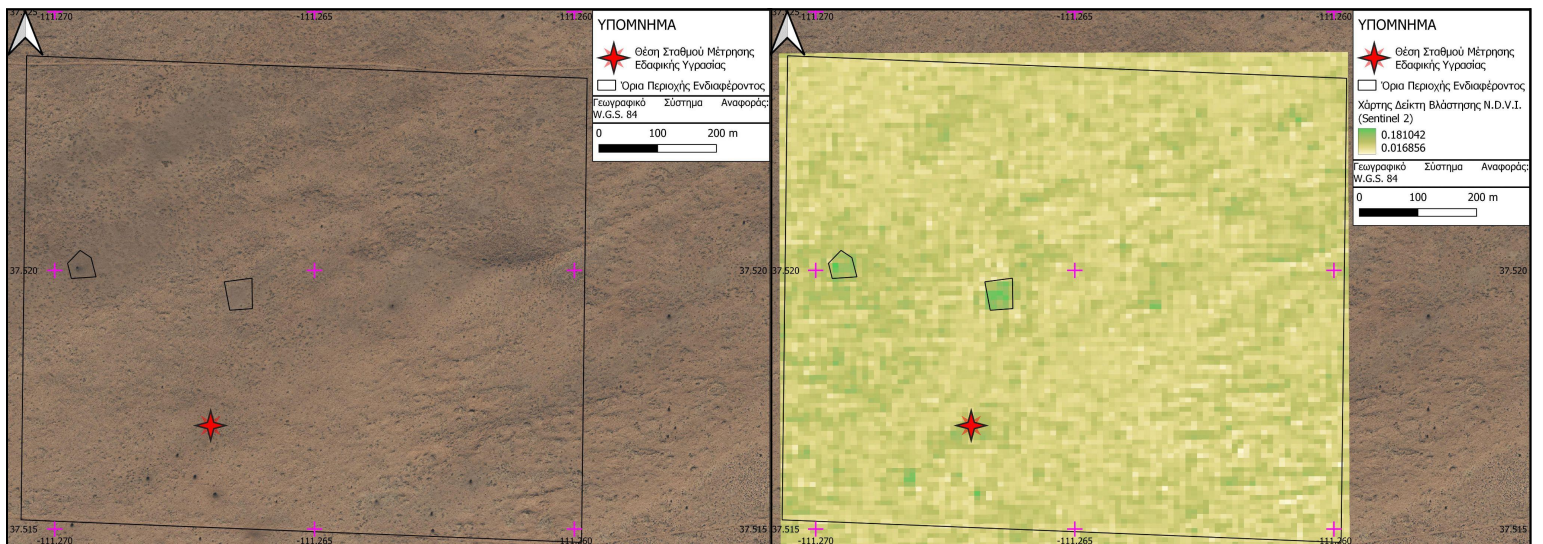


Σχήμα 24. Χάρτης απεικόνισης των μέγιστων ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Sevilleta” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

4. Σταθμός “Srooky”: Ο συγκεκριμένος σταθμός βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα της πολιτείας Γιούτα σε κοντινή απόσταση από τα φαράγγια του ποταμού Escalante και την έρημο Mojave σε υψόμετρο 1627.02 μέτρων. Η βλάστηση αποτελείται κυρίως από θάμνους, διάσπαρτα δέντρα και θάμνους (μέσος χρονιαίος όρος δείκτη N.D.V.I. ίσος με 0.16). Το κλίμα της περιοχής λαμβάνει τον χαρακτηρισμό “BSk -Ψυχρό Ημι-ξηρό Κλίμα”, ο χρονιαίος μέσος όρος του νετού είναι της τάξης των 0.022 χιλιοστών, η μέση χρονιαία θερμοκρασία εδάφους ίση με 16.08 βαθμούς κελσίου ενώ η ελάχιστη και μέγιστη ετήσια θερμοκρασία ίση με -5.9 και 42.5 βαθμούς κελσίου αντίστοιχα. Απο εδαφολογικής απόψεως, κυριαρχούν τα εδάφη με αργιλώδεις και αμμώδεις κόκκους (37% και 39% αντίστοιχα) [33].

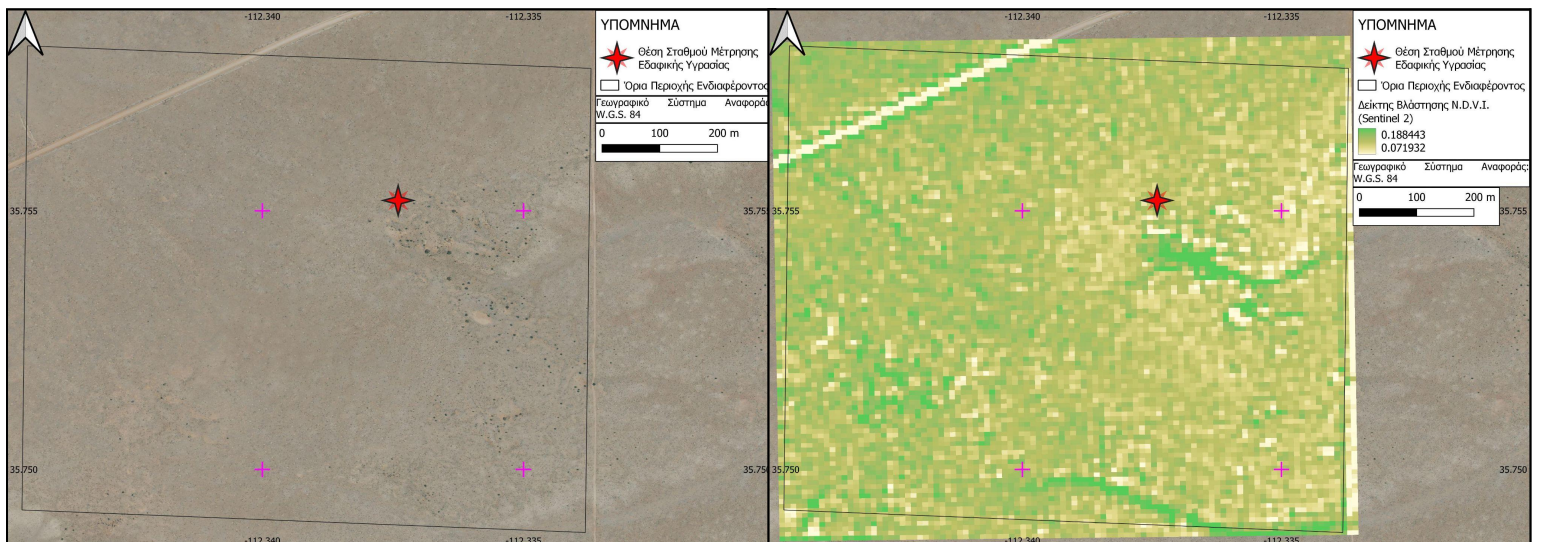


Σχήμα 25. Χάρτης απεικόνισης των μέγιστων ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Spooky” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2.

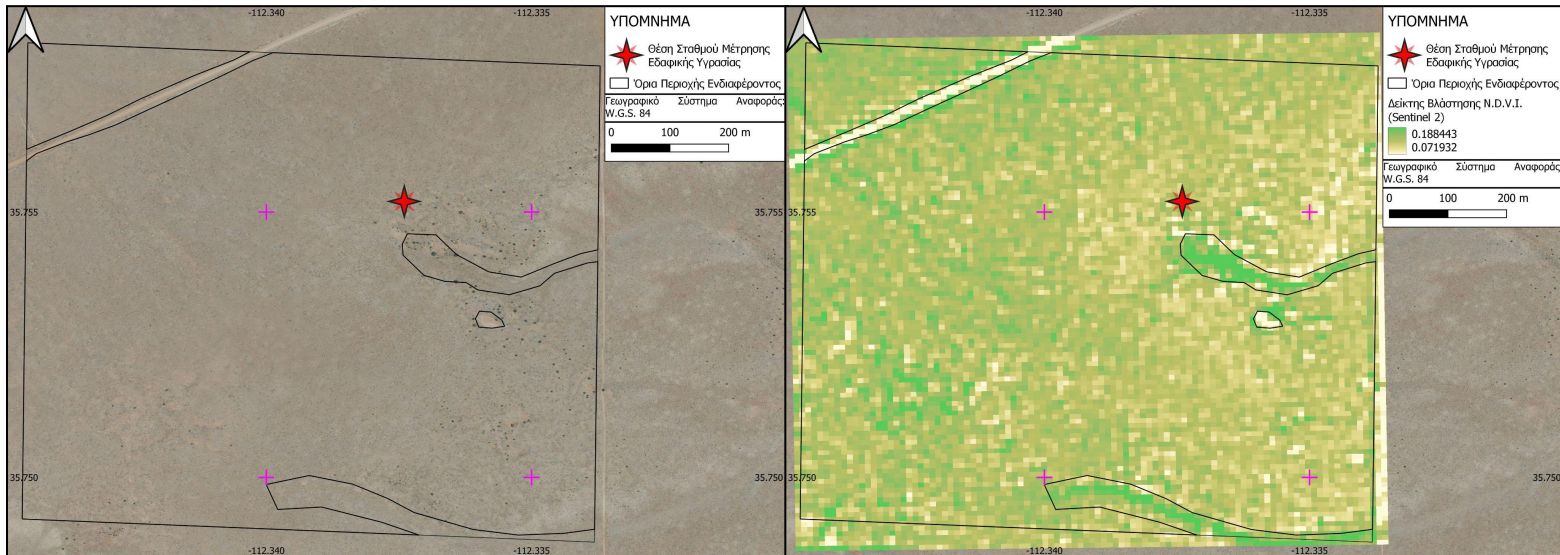


Σχήμα 26. Χάρτης απεικόνισης των αποκομμένων βάσει φωτοερμηνείας ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Spooky” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

5. Σταθμός Williams 35 NW: Ο συγκεκριμένος σταθμός βρίσκεται στην πολιτεία της Αριζόνα σε κοντινή απόσταση από το Grand Canyon και σε υψόμετρο 1826 μέτρων. Η επικρατούσα βλάστηση είναι τα διάφορα είδη διάσπαρτων θάμνων και χαμηλών δέντρων (μέσος χρονιαίος όρος δείκτη N.D.V.I. ίσος με 0.094). Από κλιματολογικής απόψεως, η περιοχή στην οποία βρίσκεται ο σταθμός είναι η πιο ψυχρή από όσες έχουν αναλυθεί μέχρι στιγμής με χαρακτηρισμό κατά Korpen “DSb - Υγρό Ηπειρωτικό”, χρονιαίο μέσο όρο νετού ίσο με 0.039 χιλιοστά (ο υψηλότερος από όλους τους υπόλοιπους σταθμούς του δικτύου στις Η.Π.Α.), μέση χρονιαία θερμοκρασία ίση με 14.41 βαθμούς κελσίου και ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία στο έτος ίση με -4 και 42.6 βαθμούς κελσίου αντίστοιχα. Τέλος, από εδαφολογικής απόψεως, οι εδαφικοί κόκκοι είναι κατά κύριο λόγο αμμώδεις (79%) [33].



Σχήμα 27. Χάρτης απεικόνισης των μέγιστων ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Williams 35 NW” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).



Σχήμα 28. Χάρτης απεικόνισης των αποκομμένων βάσει φωτοερμηνείας ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Williams 35 NW” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

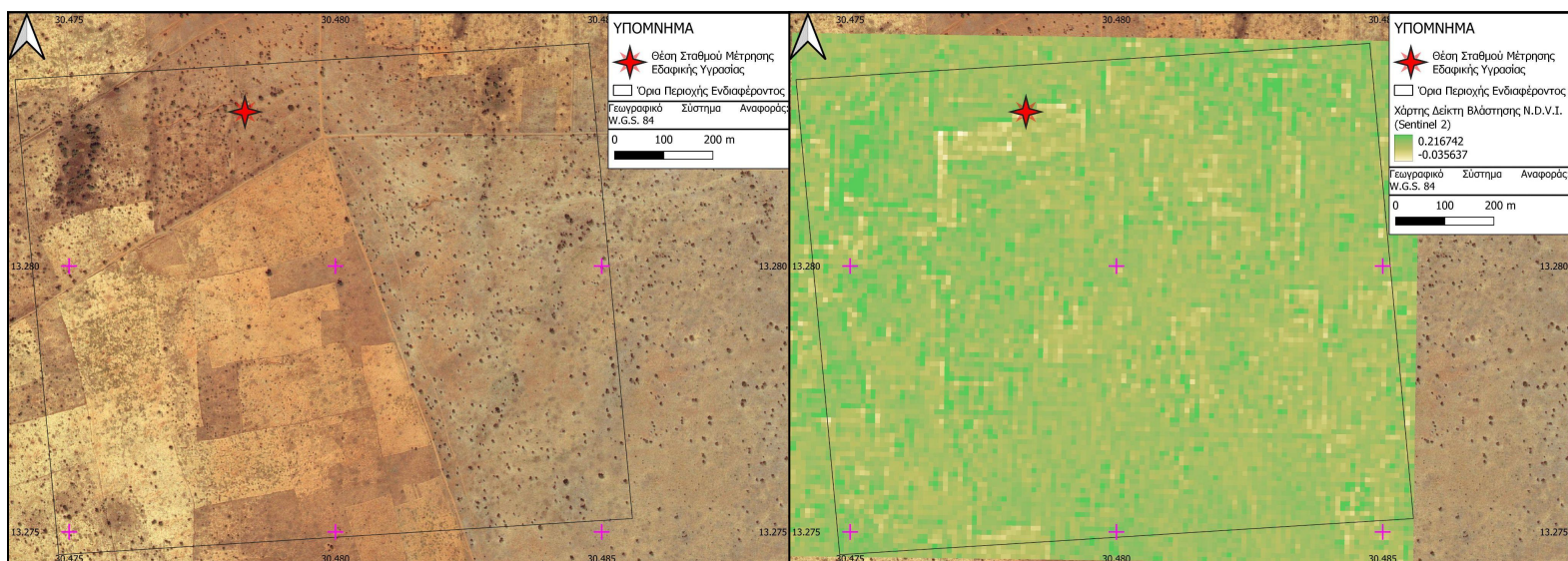
3.2.3. Περιοχές Ενδιαφέροντος - Σουδάν - Νίγηρας

Στα Αφρικανικά κράτη του Σουδάν και του Νίγηρα χρησιμοποιήθηκαν 3 σταθμοί του δικτύου I.S.M.N. για την πρακτική εφαρμογή της μοντελοποίησης της οπισθοσκέδασης και του έμμεσου προσδιορισμού της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας βάσει των μοντέλων οπισθοσκέδασης μέσω μαθηματικής βελτιστοποίησης. Γενικά, και οι 3 σταθμοί βρίσκονται στην περιοχή της Σαχέλ η οποία είναι μια μεταβατική ζώνη από την έρημο της Σαχάρα στις Αφρικανικές Σαβάνες με την βλάστηση να αποτελείται κυρίως από θαμνώδεις εκτάσεις και βοσκότοπους και το κλίμα να χαρακτηρίζεται ως θερμό και ξηρό. Παρακάτω ακολουθούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των περιοχών των σταθμών μαζί με τα αντίστοιχα σχήματά τους.

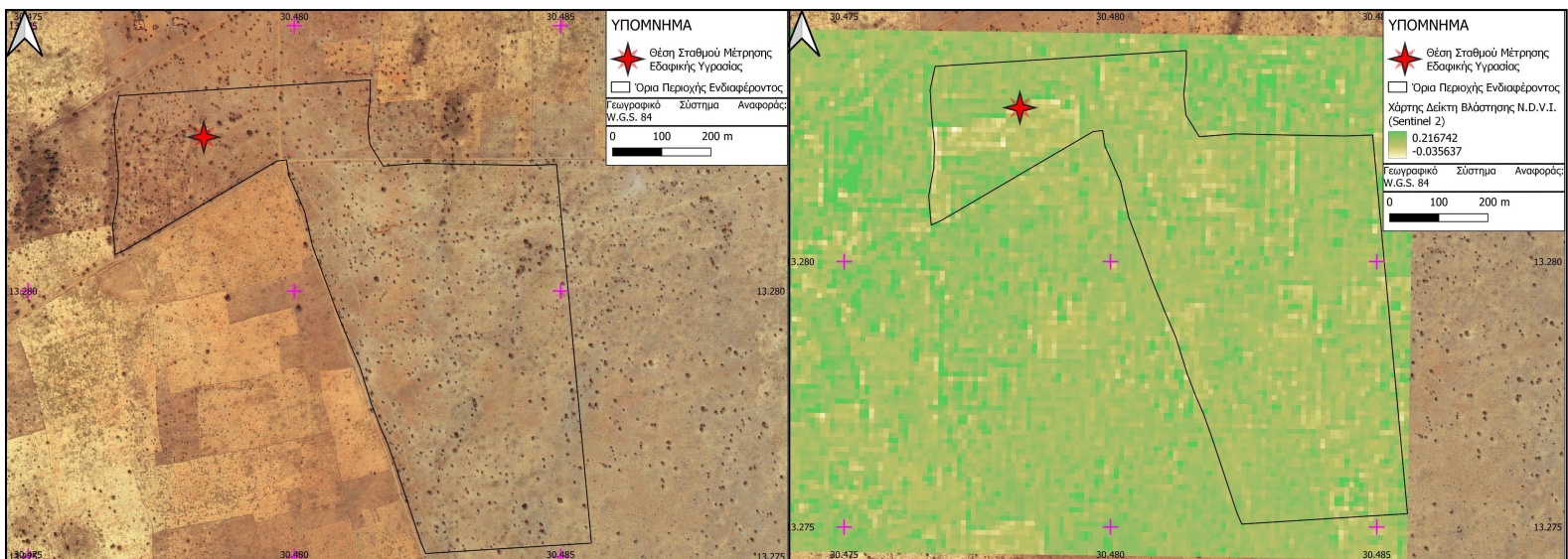
1. Σταθμός “Damukiyah”: Ο συγκεκριμένος σταθμός του δικτύου I.S.M.N. βρίσκεται στο κεντρικό Σουδάν στην επαρχία Kordofan της οποίας τα πεδινά τμήματα (όπου βρίσκεται και ο σταθμός) είναι κυρίως ερημικά με αρκετά αραιή βλάστηση, με το κλίμα να λαμβάνει τον χαρακτηρισμό “BWh - Κλίμα Θερμής Ερήμου” ενώ από εδαφολογικής απόψεως να κυριαρχούν οι αμμώδεις εδαφικοί κόκκοι (89%) [33].

Σταθμός	Χώρα	Κάλυψη Γης κατά WorldCover	Κλιματική Ταξινόμηση κατά Koppen	Χρονιαίος Μέσος Όρος Δείκτη NDVI	Χρονιαίος Μέσος Όρος Δείκτη NDMI
Damukiyah	Σουδάν	Grassland/Cropland	Hot Desert (BWh)	0.171	-0.117
Tondikiboro	Νίγηρας	Grassland	Hot Semi-arid (BSh)	0.140	-0.119
Wankama	Νίγηρας	Grassland	Hot Semi-arid (BSh)	0.141	-0.126

Πίνακας 2. Πίνακας στον οποίο παρατηρούνται για κάθε σταθμό του δικτύου I.S.M.N. στο Σουδάν και τον Νίγηρα, οι χαρακτηρισμοί κάλυψης γης κατά WorldCover, η κλιματική ταξινόμηση με βάση την κλίμακα του Koppen καθώς και οι χρονιαίοι μέσοι όροι των δεικτών N.D.V.I. και N.D.M.I. από Sentinel-2 απεικονίσεις.

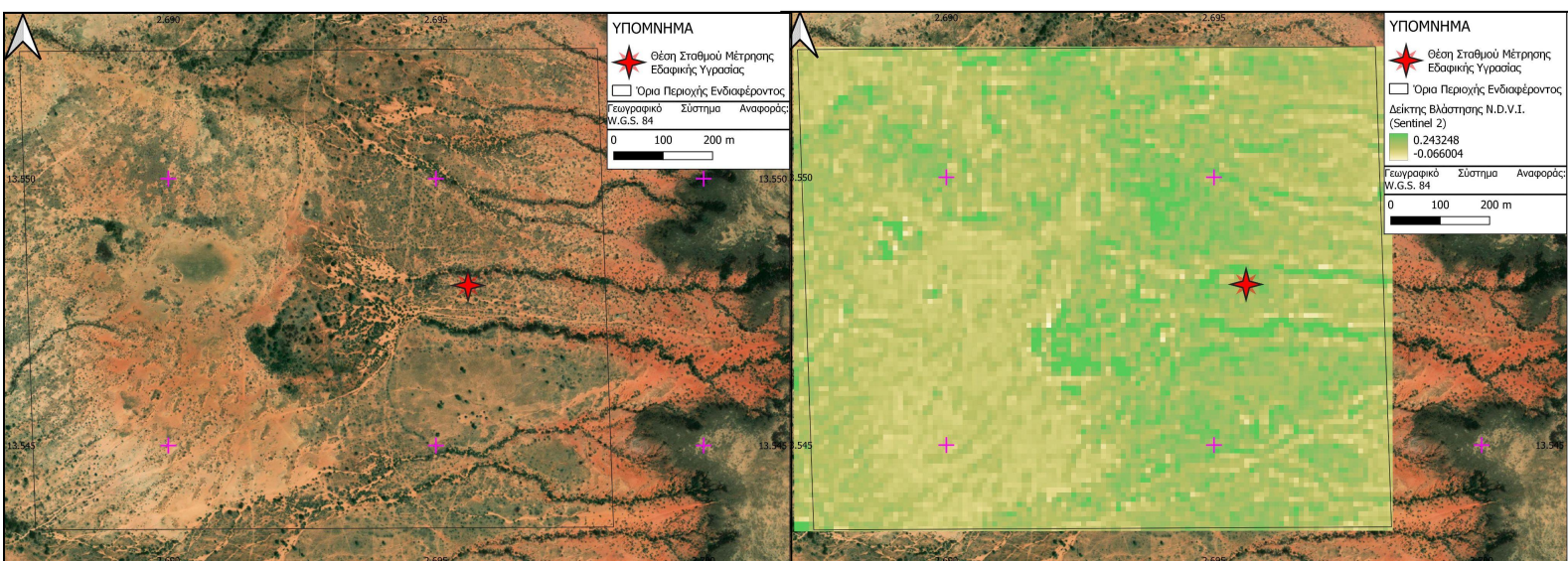


Σχήμα 29. Χάρτης απεικόνισης των μέγιστων ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Damukiyah” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

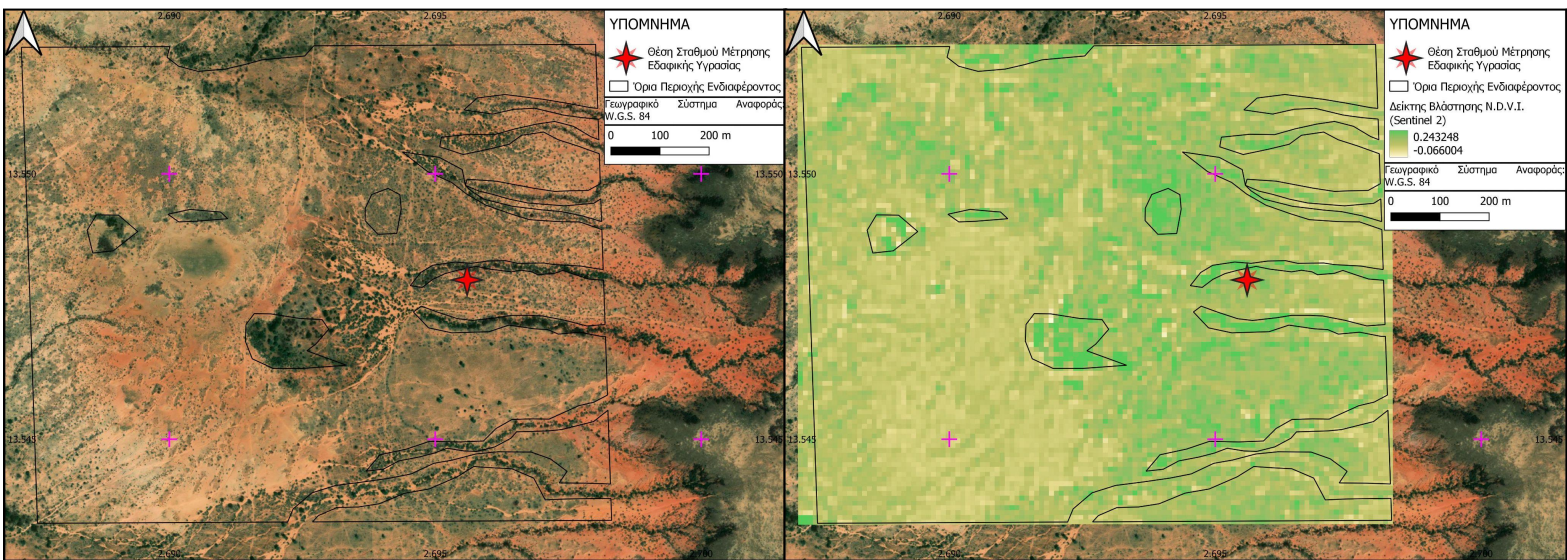


Σχήμα 30. Χάρτης απεικόνισης των αποκομμένων βάσει φωτοερμηνείας ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Damukiyah” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

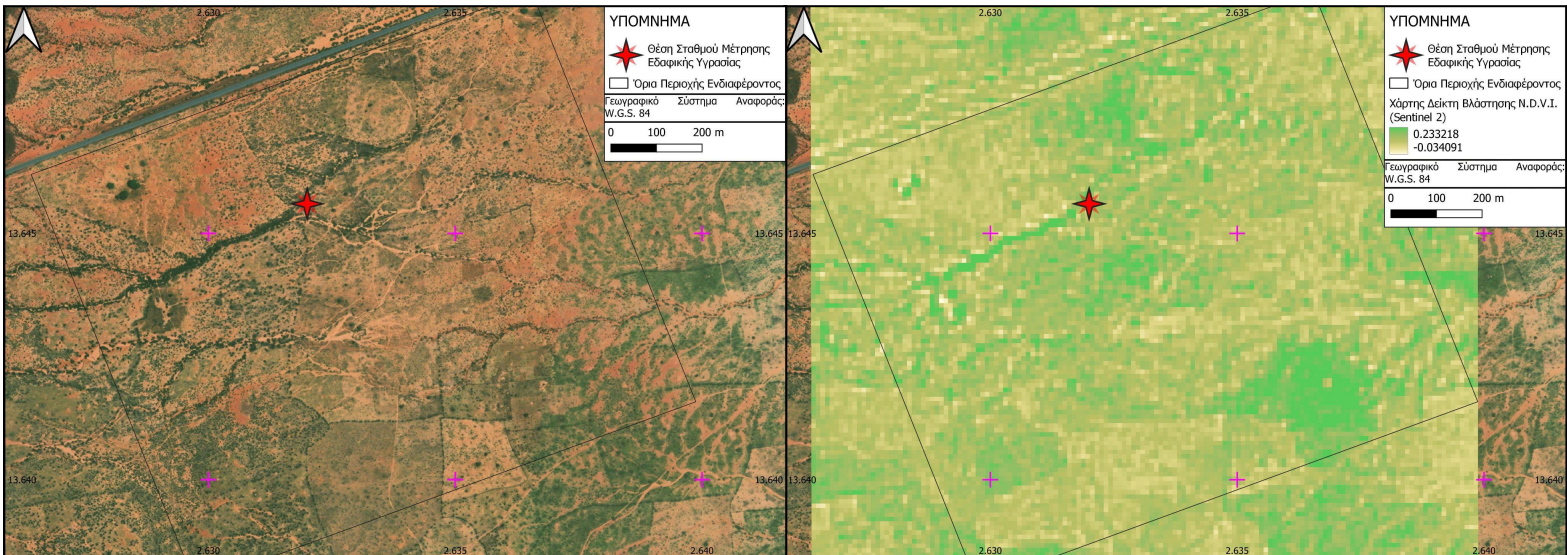
2. Σταθμοί “Tondikiboro” και “Wankama”: Στους συγκεκριμένους σταθμούς που βρίσκονται στο νοτιοδυτικό τμήμα του Νίγηρα (κοντά στην πρωτεύουσα της χώρας), το κλίμα χαρακτηρίζεται ως θερμό ημι-ξηρό (χαρακτηρισμός κατά Koppen BSh), η βλάστηση φαίνεται να αποτελείται από ποικιλία δέντρων Σαβάνας, λιβάδια και θάμνους ενώ από εδαφολογικής απόψεως κυριαρχούν οι αμμώδεις εδαφικοί κόκκοι (90% και για τους 2 σταθμούς) [33].



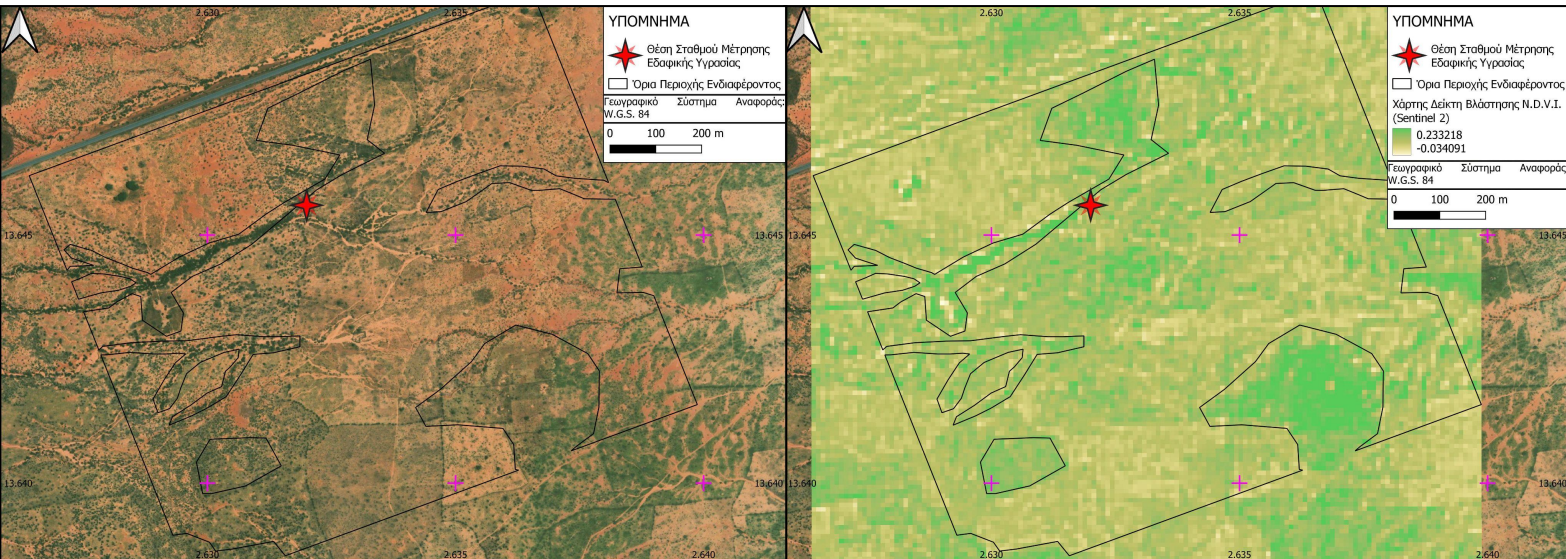
Σχήμα 31. Χάρτης απεικόνισης των μέγιστων ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Tondikiboro” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα)



Σχήμα 32. Χάρτης απεικόνισης των αποκομμένων βάσει φωτοερμηνείας ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Tondikiboro” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα)



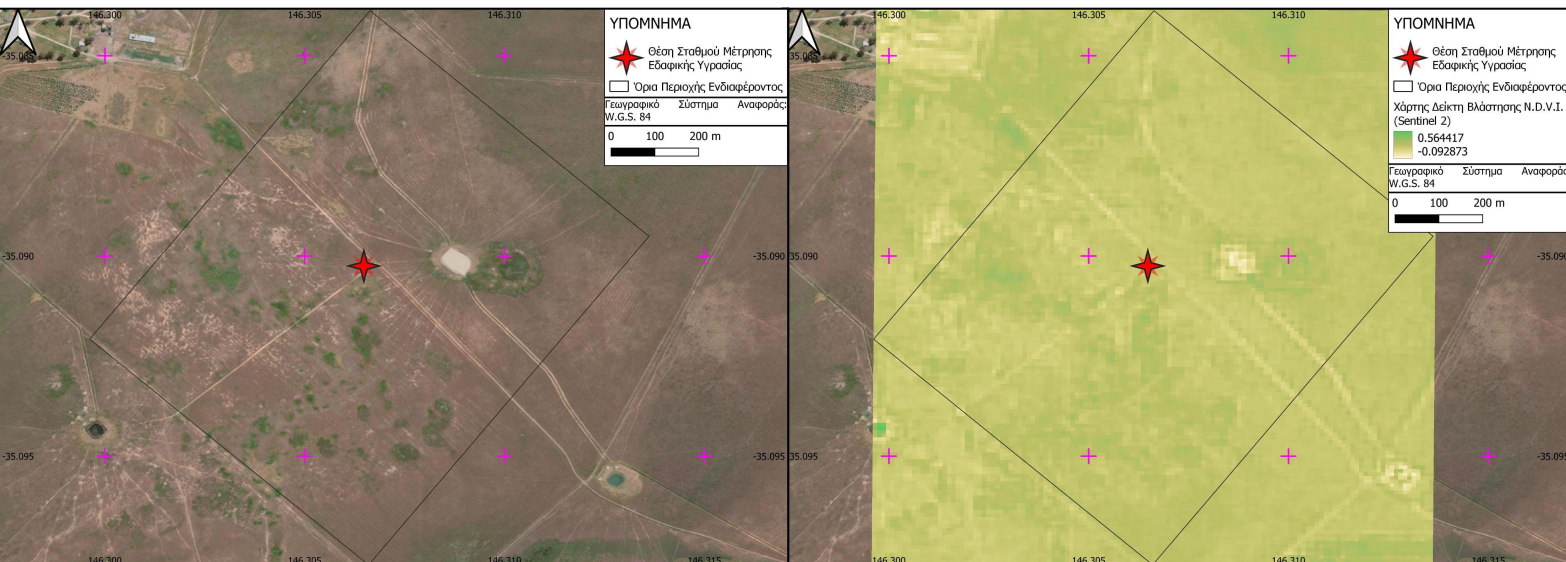
Σχήμα 33. Χάρτης απεικόνισης των μέγιστων ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Wankama” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα)



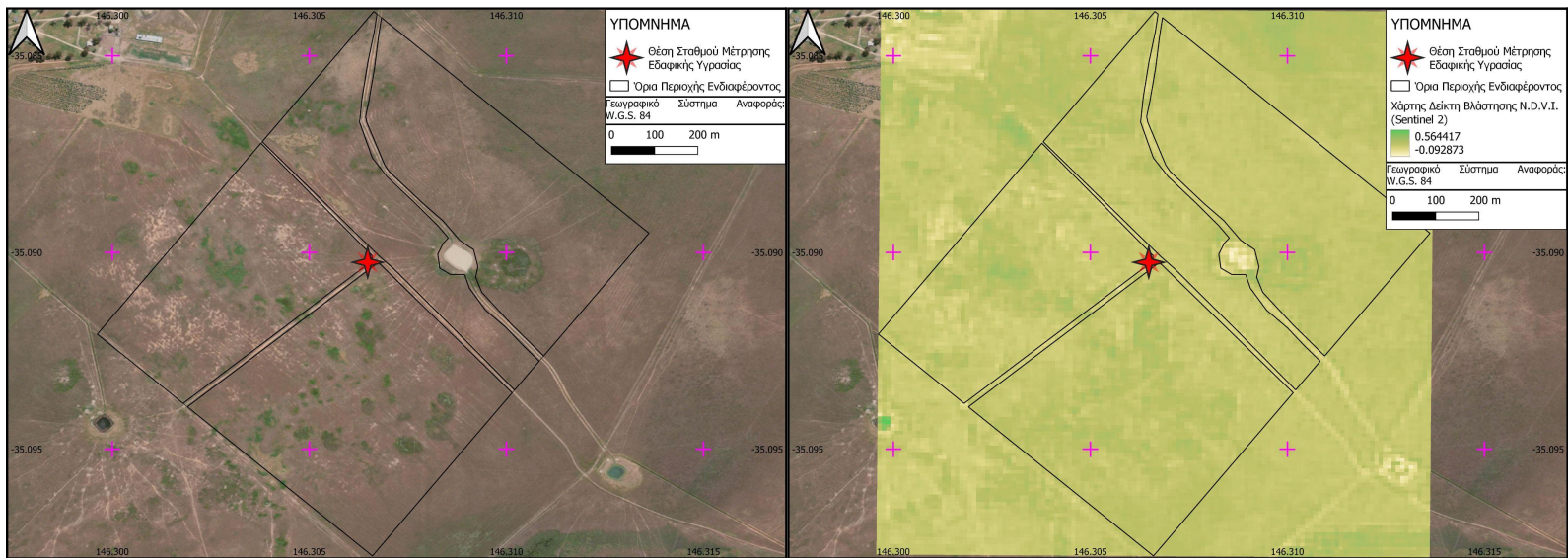
Σχήμα 34. Χάρτης απεικόνισης των αποκομμένων βάσει φωτοερμηνείας ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Wankama” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

3.2.4. Περιοχές Ενδιαφέροντος - Αυστραλία

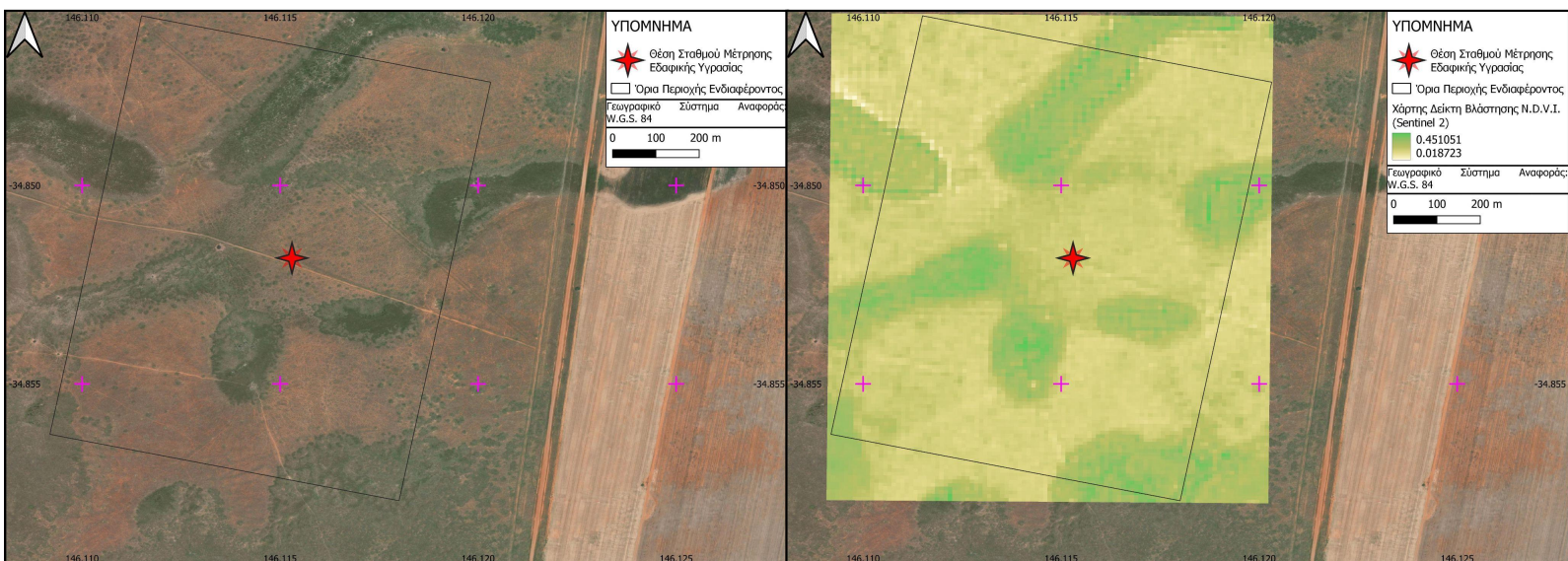
Στην Αυστραλία επιλέχθηκαν 2 σταθμοί (“Widgiewa” και “Yamma Road”) στο πλαίσιο της εξεταζόμενης πρακτικής εφαρμογής οι οποίοι βρίσκονται στο νοτιοδυτικό τμήμα της πολιτείας της Νέας Νότιας Ουαλίας. Στο συγκεκριμένο τμήμα το κλίμα χαρακτηρίζεται ως ψυχρό ημι-ξηρό (χαρακτηρισμός κατά Korpen - BSk) με την βλάστηση να περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο τύπους γρασιδιού οι οποίοι κατανέμονται με συνέχεια στην περιοχή (υψηλές τιμές του δείκτη N.D.V.I. και στους 2 σταθμούς). Παρόλα αυτά, η περιοχή παράλληλα χαρακτηρίζεται και ως άνυδρη λόγω των σχετικά χαμηλών χρονιαίων μέσων όρων υετού (περίπου 0.23 χιλιοστά και για τους 2 σταθμούς) και τους αρνητικούς χρονιαίους μέσους όρους του δείκτη N.D.M.I.. Σχετικά με την θερμοκρασία του εδάφους στους σταθμούς, στον χρόνο τα ανώτατα όρια κυμαίνονται σε θερμοκρασίες άνω των 35 βαθμών κελσίου, τα κατώτα όρια στο εύρος 2 έως 6 βαθμών κελσίου με την μέση θερμοκρασία να ισούται με 19 βαθμούς περίπου και για τους 2 σταθμούς. Τέλος, από τα διαθέσιμα εδαφολογικά στοιχεία παρατηρείται ότι και στους 2 σταθμούς κυριαρχούν οι αμμώδεις εδαφικοί κόκκοι [33].



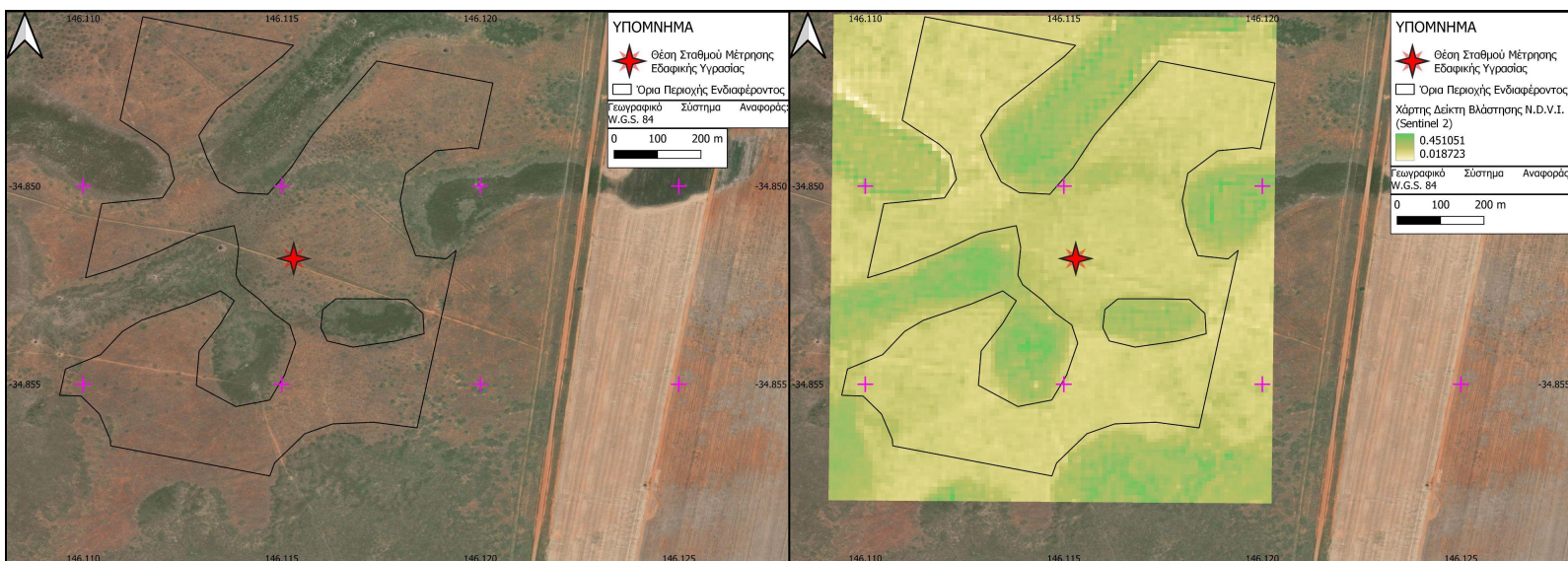
Σχήμα 35. Χάρτης απεικόνισης των μέγιστων ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Widgiewa” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).



Σχήμα 36. Χάρτης απεικόνισης των αποκομμένων βάσει φωτοερμηνείας ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Widgiewa” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).



Σχήμα 37. Χάρτης απεικόνισης των μέγιστων ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Yamma Road” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).



Σχήμα 38. Χάρτης απεικόνισης των αποκομμένων βάσει φωτοερμηνείας ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Yamma Road” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

3.3 Συλλογή Πρωτογενών Δεδομένων

3.3.1. Συλλογή Επίγειων Δεδομένων

Για κάθε περιοχή ενδιαφέροντος η οποία εντάσσεται στο πεδίο μελέτης της εφαρμογής των μοντέλων οπισθοσκέδασης για τον έμμεσο προσδιορισμό της εδαφικής υγρασίας με χρήση SAR απεικονίσεων, συλλέχθηκαν ορισμένα επίγεια σύνολα δεδομένων. Αυτά τα σύνολα δεδομένων περιείχαν κατ’ ελάχιστον χρονοσειρές μετρήσεων ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας από όργανα μέτρησης που χρησιμοποιούσαν την διηλεκτρική μεθοδολογία (βλέπε κεφάλαιο 2.1.4.) και το χρονικό τους εύρος μπορούσε να περιλαμβάνει και ένα ικανό σύνολο Sentinel-1 SAR απεικονίσεων της περιοχής ενδιαφέροντος. Συγκεκριμένα, αυτό σημαίνει ότι οι χρονοσειρές των μετρήσεων εδαφικής υγρασίας θα πρέπει να έχουν χρονικά εύρη μετά τον Απρίλιο του 2014 (μήνας πρώτης λειτουργίας δορυφόρου Sentinel-1A) και κατά προτίμηση να εκτείνονται κατ’ ελάχιστον μέχρι τα έτη 2019 και πάνω, λόγω του γεγονότος ότι από την έναρξη λειτουργίας του δορυφόρου Sentinel-1B τον Απρίλιο του 2016, βελτιώθηκε η χρονική ανάλυση του αστερισμού των δορυφόρων Sentinel-1A και Sentinel-1B. Επιπλέον, από ορισμένα όργανα μέτρησης εδαφικής υγρασίας παρήχθησαν συμπληρωματικά και χρονοσειρές μετρήσεων θερμοκρασίας εδάφους ενώ από βροχογράφους ανατρεπόμενου κάδου ή μετρήσεις παλμών βροχόπτωσης (ραγδαία έκκλιση CO_2 από την βροχόπτωση) παρήχθησαν και χρονοσειρές υετού (χρησιμοποιήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο) με τη συνήθη χρονική διαφορά μεταξύ 2 διαδοχικών μετρήσεων είναι της τάξης της μιας ώρας.

Στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α., για την παραγωγή των χρονοσειρών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας και θερμοκρασίας εδάφους χρησιμοποιήθηκαν όργανα μέτρησης που αξιοποιούν την διηλεκτρική μέθοδο της σειράς “Stevens Hydraprobe”. Τα συγκεκριμένα όργανα μέτρησης μπορούν να μετρήσουν την ογκομετρική εδαφική υγρασία με τυπική ακρίβεια της τάξης των $0.001 m^3/m^3$ η οποία βέβαια συνήθως καταλήγει να κυμαίνεται στο εύρος

$0.01 \text{ m}^3/\text{m}^3 - 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ λόγω της επίδρασης των διαφόρων χαρακτηριστικών του εδάφους στη μέτρηση. Επίσης, τα συγκεκριμένα όργανα μέτρησης χρησιμοποιούν μια μεθοδολογία η οποία διαφέρει από την μεθοδολογία T.D.R. που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.1.4. και περιλαμβάνει τη μέτρηση του πηλίκου του πλάτους του εκπεμπόμενου ραδιοκύματος στην συχνότητα των 50 MHz εντός του κυματοδηγού του οργάνου μέτρησης και του πλάτους του ανακλώμενου από το εδαφικό στρώμα (σε συγκεκριμένο βάθος) ραδιοκύματος, την εφαρμογή μιας αριθμητικής λύσης των εξισώσεων του Maxwell για τον προσδιορισμό της κυματικής αντίστασης και τέλος την εξαγωγή της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας της διηλεκτρικής σταθεράς [35]. Τέλος, αναφέρεται και ότι ο σταθμός “Williams 35 NW” αποτελεί μέρος του δικτύου U.S.C.R.N. (U.S. Climate Reference Network) της Υπηρεσίας Ατμόσφαιρας και Ωκεανών των Η.Π.Α. ενώ οι υπόλοιποι σταθμοί αποτελούν μέρος του δικτύου S.C.A.N. (Soil Climate Analysis Network) με τα άνωθεν δίκτυα να έχουν ως σκοπό την συλλογή χρονοσειρών διαφόρων κλιματικών μεταβλητών για την μελέτη της κλιματικής αλλαγής, την αντιμετώπιση συνεπειών από αυτήν κ.α..

Σταθμός	Όργανο Μέτρησης	Είδη Μετρήσεων	Μέθοδος Μέτρησης Υετού	Αρχή Μετρήσεων	Τέλος Μετρήσεων
Ford Dry Lake	Stevens Hydraprobe Digital Sdi 12 (2.5 Volt)	Ογκομετρική Εδαφική Υγρασία (m^3/m^3), Θερμοκρασία Εδάφους ($^{\circ}\text{C}$)	Μετρήσεις Παλμών Βροχόπτωσης	16-11-2011	07-12-2020
Jornada	Stevens Hydraprobe Digital Sdi 12 (2.5 Volt)	Ογκομετρική Εδαφική Υγρασία (m^3/m^3), Θερμοκρασία Εδάφους ($^{\circ}\text{C}$)	Μετρήσεις Παλμών Βροχόπτωσης	20-10-2009	29-01-2021
Sevilleta	Stevens Hydraprobe Digital Sdi 12 (2.5 Volt)	Ογκομετρική Εδαφική Υγρασία (m^3/m^3), Θερμοκρασία Εδάφους ($^{\circ}\text{C}$)	Μετρήσεις Παλμών Βροχόπτωσης	24-05-2003	13-01-2022
Spooky	Stevens Hydraprobe Digital Sdi 12 (2.5 Volt)	Ογκομετρική Εδαφική Υγρασία (m^3/m^3), Θερμοκρασία Εδάφους ($^{\circ}\text{C}$)	Μετρήσεις Παλμών Βροχόπτωσης	14-04-2010	19-08-2022
Williams 35 NW	Stevens Hydraprobe II Sdi 12	Ογκομετρική Εδαφική Υγρασία (m^3/m^3), Θερμοκρασία Εδάφους ($^{\circ}\text{C}$)	Μετρήσεις Παλμών Βροχόπτωσης	26-08-2008	19-08-2022

Πίνακας 3. Πίνακας απεικόνισης βασικών στοιχείων σχετιζόμενων με τις επίγειες μετρήσεις στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α..

Έπειτα, αναφορικά με τις μετρήσεις εδαφικής υγρασίας στους σταθμούς που βρίσκονται στον Νίγηρα και το Σουδάν, αυτές πραγματοποιήθηκαν με το όργανο μέτρησης T.D.R. της εταιρείας Campbell Scientific και μοντέλων CS615 και CS616 στο πλαίσιο ερευνών του οικολογικού και μετεωρολογικού παρατηρητηρίου AMMA - CATCH (African Monsoon Multidisciplinary Analysis - Coupling the Tropical Atmosphere and the Hydrological Cycle) [36] και των Ardo et al. (2013) [37]. Τέλος, σε σχέση με τις μετρήσεις εδαφικής υγρασίας των σταθμών που βρίσκονται στην Αυστραλία, αυτές

έγιναν πάλι με το όργανο “Stevens Hydraprobe” στο πλαίσιο της παρακολούθησης της εδαφικής υγρασία στην λεκάνη απορροής του ποταμού Murrumbidgee [38].

Σταθμός	Όργανο Μέτρησης	Είδη Μετρήσεων	Αρχή Μετρήσεων	Τέλος Μετρήσεων
Damukiyah	Campbell Scientific CS615	Ογκομετρική Εδαφική Υγρασίας (m^3/m^3)	16-11-2011	07-12-2020
Tondikiboro	Campbell Scientific CS616	Ογκομετρική Εδαφική Υγρασίας (m^3/m^3)	20-10-2009	31-12-2018
Wankama	Campbell Scientific CS616	Ογκομετρική Εδαφική Υγρασίας (m^3/m^3)	24-05-2003	31-12-2018

Πίνακας 4. Πίνακας απεικόνισης βασικών στοιχείων σχετιζόμενων με τις επίγειες μετρήσεις στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στο Σουδάν και τον Νίγηρα.

Σταθμός	Όργανο Μέτρησης	Είδη Μετρήσεων	Μέθοδος Μέτρησης Υετού	Αρχή Μετρήσεων	Τέλος Μετρήσεων
Widgiewa	Stevens Hydraprobe Digital Sdi 12 (2.5 Volt)	Ογκομετρική Εδαφική Υγρασίας (m^3/m^3), Θερμοκρασία Εδάφους ($^{\circ}C$)	Βροχογράφος Ανατρεπόμενου Κάδου	16-11-2011	07-12-2020
Yamma Road	Stevens Hydraprobe Digital Sdi 12 (2.5 Volt)	Ογκομετρική Εδαφική Υγρασίας (m^3/m^3), Θερμοκρασία Εδάφους ($^{\circ}C$)	Βροχογράφος Ανατρεπόμενου Κάδου	20-10-2009	31-12-2018

Πίνακας 5. Πίνακας απεικόνισης βασικών στοιχείων σχετιζόμενων με τις επίγειες μετρήσεις στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στην Αυστραλία.

3.3.2. Συλλογή SAR Απεικονίσεων Sentinel-1

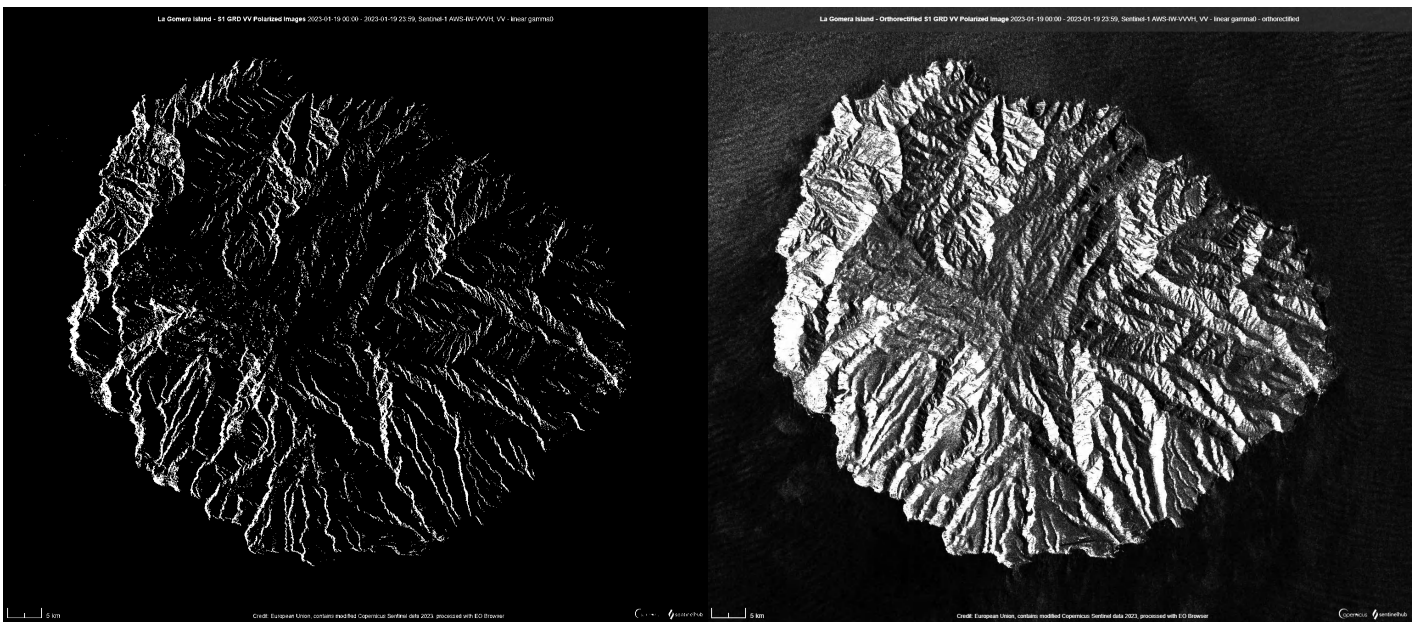
Για κάθε σταθμό του δικτύου I.S.M.N. στις 3 γενικές περιοχές της πρακτικής εφαρμογής συλλέχθηκαν διατεταγμένα σύνολα SAR απεικονίσεων (αποκομμένων στα μέγιστα όρια και στα προσαρμοσμένα βάσει φωτοερμηνείας όρια των περιοχών ενδιαφέροντος γύρω από κάθε σταθμό) από την αρχή λειτουργίας του δορυφόρου Sentinel-1A μέχρι την τελική ημερομηνία των επίγειων μετρήσεων. Οι απεικονίσεις ελήφθησαν από τις πλατφόρμες του Google Earth Engine [40] μέσω ενός κώδικα Javascript και της πλατφόρμας E.O. (Earth Observation) Browser της Sentinel Hub. Οι διαφορές των 2 πηγών δεδομένων έγκειται στο γεγονός ότι από την πλατφόρμα του Google Earth Engine τα σύνολα των SAR απεικονίσεων που ελήφθησαν έχουν διορθωθεί ραδιομετρικά (μετατροπή ψηφιακών τιμών εικονοστοιχείων σε τιμές συντελεστή οπισθοσκέδασης σ°) και γεωμετρικά (γεωαναφορά απεικόνισης) με χρήση των αλγορίθμων του SITBX (Sentinel-1 Toolbox) ενώ από την πλατφόρμα EO Browser ελήφθησαν κατευθείαν χρονοσειρές του μέσου όρου των συντελεστών οπισθοσκέδασης γ° από τα εικονοστοιχεία ραδιομετρικά και γεωμετρικά διορθωμένων απεικονίσεων για την κάθε περιοχής ενδιαφέροντος (η ίδια διαδικασία λαμβάνει χώρα σε ύστερο στάδιο και για τις γεωμετρικά και ραδιομετρικά διορθωμένες SAR απεικονίσεις για την εξάλειψη του θορύβου από τις τελικές τιμές των συντελεστών οπισθοσκέδασης).

Στις χρονοσειρές των μέσων όρων των εικονοστοιχείων των SAR απεικονίσεων στις περιοχές ενδιαφέροντος από την πλατφόρμα E.O. Browser, επιπλέον έχει γίνει η γεωαναφορά στο σύστημα αναφοράς W.G.S. 84 των σειρών Sentinel-1 SAR απεικονίσεων που χρησιμοποιήθηκαν [41]. Η σχέση των κανονικοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης γ^0 και σ^0 αποτυπώνεται μέσω της παρακάτω εξίσωσης (στην πράξη δεν έγινε κάποια τέτοια μετατροπή):

$$\sigma^0 = \gamma^0 \cos\theta \quad (58)$$

όπου θ η γωνία πρόσπτωσης του SAR σήματος

Γενικότερα, οι 2 άνωθεν εκφράσεις του συντελεστή οπισθοσκέδασης σχετίζονται με την επιφάνεια από την οποία οπισθοσκεδάζεται το SAR σήμα, όπου ο συντελεστής σ^0 σχετίζεται με μια οριζόντια εφαπτόμενη επιφάνεια στο ελλειψοειδές αναφοράς (π.χ. W.G.S. 84) ενώ ο συντελεστής γ^0 σχετίζεται με μια επιφάνεια η οποία είναι εφαπτομένη στο ελλειψοειδές αναφοράς αλλά και κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης του SAR σήματος. Τέλος, ο κύριος τρόπος με τον οποίο μπορούν να διακριθούν φωτοερμηνευτικά οι ραδιομετρικά διορθωμένες SAR απεικονίσεις με συντελεστή οπισθοσκέδασης σ^0 και οι ραδιομετρικά διορθωμένες SAR απεικονίσεις με συντελεστή οπισθοσκέδασης γ^0 είναι μέσω της εξάλειψης της σκίασης των ορεινών πλαγιών.



Σχήμα 39. Απόσπασμα από 2 Sentinel-1 SAR απεικονίσεις της νήσου La Gomera (Κανάρια Νησιά), όπου σε μια εκ των οποίων έχει γίνει χρήση του συντελεστή οπισθοσκέδασης γ_0 (δεξιά εικόνα) και σε μια στην οποία έχει γίνει χρήση του συντελεστή οπισθοσκέδασης σ_0 (αριστερή εικόνα).

Σταθμός	Πλήθος SAR Απεικονίσεων (Google Earth Engine)	Μήκος Χρονοσειράς Μέσων Όρων Συντελεστών Οπισθοσκέδασης γ^0
Ford Dry Lake	103	80
Jornada	104	103
Sevilleta	110	139
Spooky	148	133
Williams 35 NW	144	151

Πίνακας 6. Πίνακας απεικόνισης βασικών στοιχείων σχετιζόμενων με τις SAR απεικονίσεις (από μόνο μια τροχιά) στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α..

Σταθμός	Πλήθος SAR Απεικονίσεων (Google Earth Engine)	Μήκος Χρονοσειράς Μέσων Όρων Συντελεστών Οπισθοσκέδασης γ^0
Damukiyah	111	115
Tondikiboro	95	107
Wankama	102	107

Πίνακας 7. Πίνακας απεικόνισης βασικών στοιχείων σχετιζόμενων με τις SAR απεικονίσεις στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. (από μόνο μια τροχιά) στο Νίγηρα και το Σουδάν.

Σταθμός	Πλήθος SAR Απεικονίσεων (Google Earth Engine)	Μήκος Χρονοσειράς Μέσων Όρων Συντελεστών Οπισθοσκέδασης γ^0
Widgiewa	158	144
Yamma Road	174	144

Πίνακας 8. Πίνακας απεικόνισης βασικών στοιχείων σχετιζόμενων με τις SAR απεικονίσεις στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. (από μόνο μια τροχιά) στην Αυστραλία.

3.4 Επεξεργασία Δεδομένων

3.4.1. Προεπεξεργασία Επίγειων και Δορυφορικών Συνόλων Δεδομένων

Έχοντας συλλέξει όλα τα απαραίτητα επίγεια (εδαφική υγρασία, θερμοκρασία και υετός) και δορυφορικά (τμήματα ραδιομετρικά και γεωμετρικά διορθωμένων Sentinel-1 απεικονίσεων ή χρονοσειρές του μέσου όρου των εικονοστοιχείων/ συντελεστών οπισθοσκέδασης γ^0 της περιοχής ενδιαφέροντος) σύνολα δεδομένα για κάθε περιοχή ενδιαφέροντος, οι πρώτες επεξεργασίες των συγκεκριμένων δεδομένων αφορούσαν στην χρονική ταύτιση των δύο συνόλων δεδομένων. Ειδικότερα, η χρονική ταύτιση αφορά στην προσέγγιση των πλησιέστερων χρονικών στιγμών μεταξύ

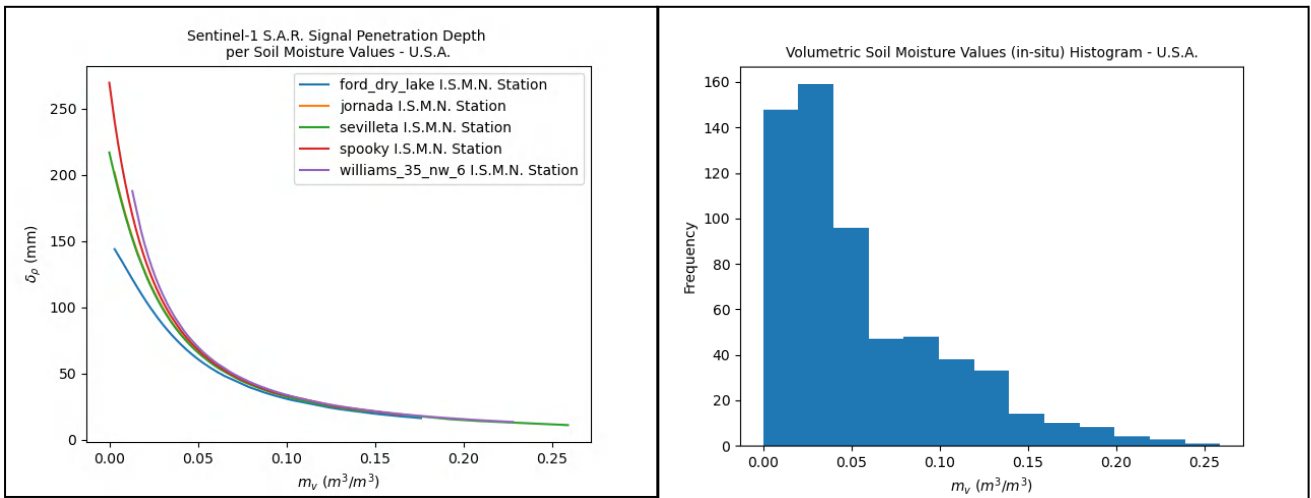
λήψεων Sentinel-1 απεικονίσεων των περιοχών ενδιαφέροντος και μετρήσεων εδαφικής υγρασίας, θερμοκρασίας και νετού στο σύνολο δεδομένων κάθε σταθμού. Να σημειωθεί ότι όταν σαν δεδομένα εισόδου δίνονται σύνολα γεωμετρικά και ραδιομετρικά διορθωμένων Sentinel-1 GRD απεικονίσεων, για κάθε ημερομηνία και χρονική στιγμή λήψης εξάγεται ο μέσος όρος των εικονοστοιχείων (συντελεστής οπισθοσκέδασης σ_0) της περιοχής ενδιαφέροντος για την εξάλειψη του φαινομένου της κηλίδωσης (τυχαίος θόρυβος στις Radar απεικονίσεις). Τελικό αποτέλεσμα κάθε χρονικής ταύτισης μεταξύ επίγειων και δορυφορικών δεδομένων της περιοχής ενδιαφέροντος ήταν ένας συγκεντρωτικός πίνακας με όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό των συνόλων δεδομένων μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης.

Date	s0_SAR_HV (dB)	s0_SAR_VV (dB)	Inc_Ang (rad)	SM (m ³ /m ³)	Precip (mm)	Below_Freezing_Temp	e_real (Hallikainen)	e_imag (Hallikainen)
2014/10/13	-20.783855	-13.116277	0.64556882378	0.1019	0	False	5.7042327904177	0.67451461546965
2014/10/25	-25.360672	-17.594414	0.64556882378	0.0999	0	False	5.6124944377657	0.65431015263565
2014/11/06	-25.501684	-17.69292	0.64556882378	0.0872	0	False	5.0514796816288	0.5340942892896
2014/11/30	-25.198	-16.043184	0.64556882378	0.1064	0	False	5.9140163623072	0.7212409936224
2014/12/12	-25.692762	-17.447884	0.64556882378	0.0911	0	False	5.2198029969097	0.56952513658365
2014/12/24	-25.586945	-17.558146	0.64556882378	0.078	0	False	4.66630423688	0.45573156946
2015/01/05	-21.734385	-14.04813	0.64556882378	0.0746	0	False	4.5316350112012	0.4286261301954
2015/01/17	-25.339937	-17.612993	0.64556882378	0.2186	0	False	12.6542179298572	2.4531600393474
2015/01/29	-25.473202	-17.412857	0.64556882378	0.1681	0	False	9.2612952550977	1.53874585427965

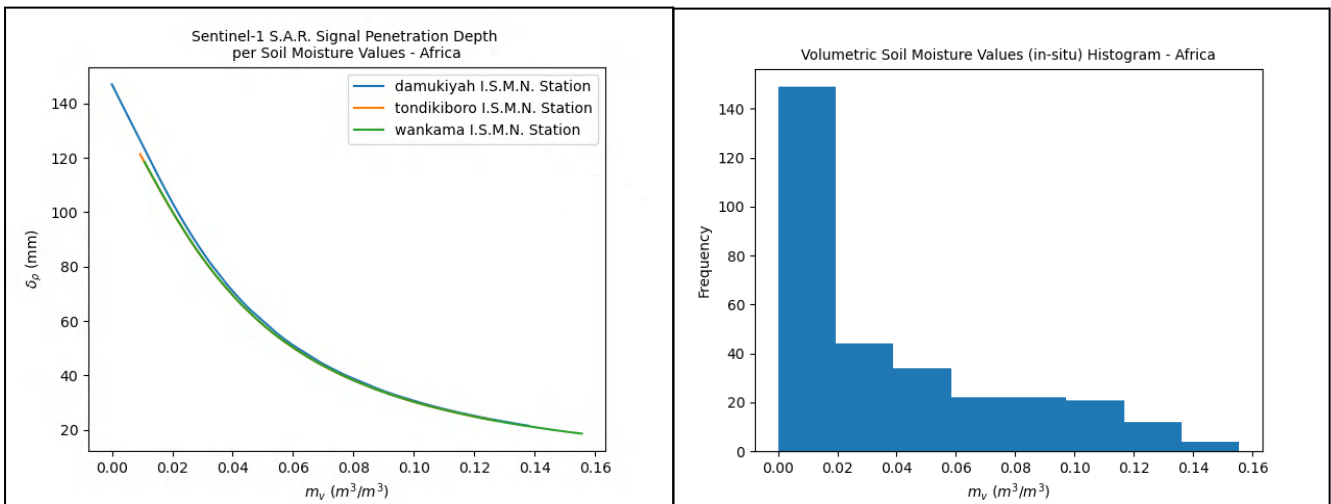
Πίνακας 9. Απόσπασμα συγκεντρωτικού πίνακα που περιέχει επίγεια δεδομένα (εδαφική υγρασία, νετός), δορυφορικά δεδομένα (συντελεστές οπισθοσκέδασης στις HV και VV πολώσεις) και άλλα στοιχεία (πραγματική και φανταστική συνιστώσα σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς).

Επιπλέον, μιας και κάθε σύνολο επίγειων μετρήσεων του δικτύου I.S.M.N. συνοδεύεται από ορισμένους δείκτες οι οποίοι δείχνουν την ποιότητα της κάθε μέτρησης, πριν την χρονική ταύτιση των επίγειων δεδομένων με τις σειρές δεδομένων από τις Sentinel-1 απεικονίσεις, απαλείφθηκαν ορισμένα σημεία δεδομένων στα οποία παρατηρούνταν λανθασμένες τιμές. Ορισμένοι λόγοι που μπορούν να οδηγήσουν σε λανθασμένες τιμές είναι κυρίως τα συστηματικά σφάλματα των οργάνων μέτρησης τα οποία μπορεί να οδηγήσουν παραδείγματος χάρι στην καταγραφή ραγδαίων μεταβολών στην εδαφική υγρασία χωρίς κάποιο γεγονός βροχόπτωσης ή στην εμφάνιση αρνητικών τιμών εδαφικής υγρασίας. Οι κύκλοι τήξης και πήξης της εδαφικής υγρασίας μπορεί να οδηγήσουν στην καταγραφή μεγάλων αυξομειώσεων των τιμών εδαφικής υγρασίας λόγω της μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του παγωμένου νερού, κάτι που μειώνει την αξιοπιστία της χρονοσειράς λόγω της αύξησης της τυπικής απόκλισης [42]. Βέβαια, οι τιμές εδαφικής υγρασίας για τις οποίες παρατηρούνταν θερμοκρασίας εδάφους ή/και αέρα μικρότερες του μηδέν δεν απορρίφθηκαν για να διερευνηθεί η επίδραση τους στην μοντελοποίηση της οπισθοσκέδασης και στον έμμεσο προσδιορισμό της εδαφικής υγρασίας.

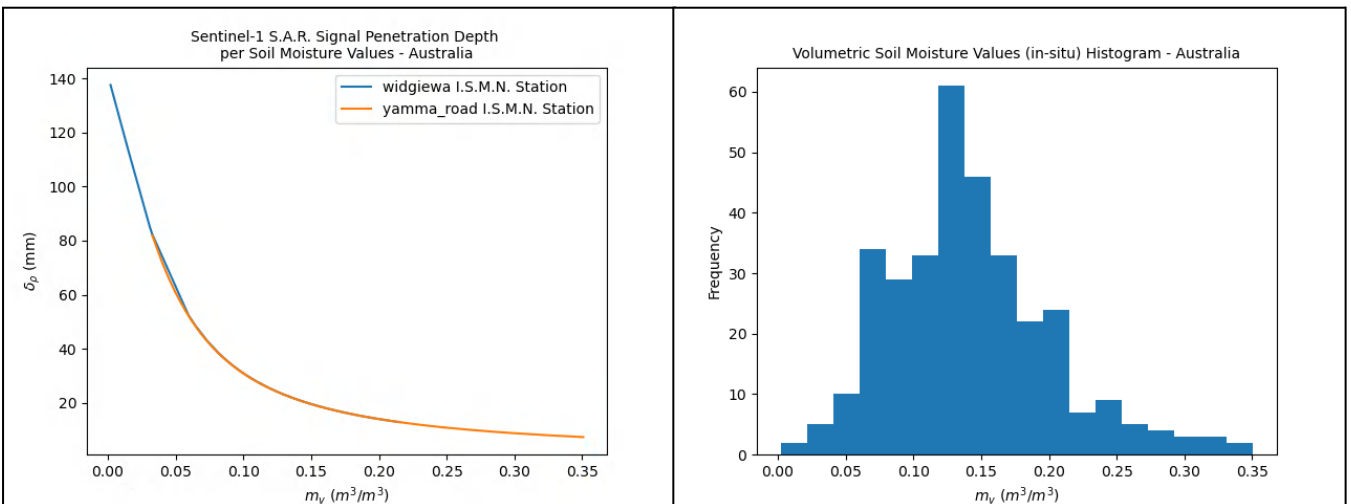
Κατόπιν, αφού απαλείφθηκαν οι τιμές εδαφικής υγρασίας οι οποίες ενδέχεται να ήταν προϊόν σφάλματος, απαλείφθηκαν και σύνολα δεδομένων εδαφικής υγρασίας και θερμοκρασίας από βάθη δειγματοληψίας μεγαλύτερα των 5 εκατοστών. Όπως αποδείχθηκε από τους Singh et al. 2018 και Bruckler et al. 1988, όταν αυξάνεται η ογκομετρική εδαφική υγρασία παρατηρείται μια εκθετική μείωση του βάρους διείσδυσης του SAR σήματος [16][43]. Εφαρμόζοντας την σχέση (17), παρόλο που τα ελάχιστη βάθη δειγματοληψίας ήταν στο εύρος των 5 cm - 5.8 cm, παρατηρήθηκε για τιμές ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας άνω του 7% το βάθος διείσδυσης να πέφτει κάτω από το συγκεκριμένο κατώφλι. Τέλος, με βάση τα σύνολα μετρήσεων προσδιορίστηκαν και τα σύνολα των συνιστωσών μιγαδικών διηλεκτρικών σταθερών (απαιτούνται για τη μοντελοποίηση των συντελεστών οπισθοσκέδασης με βάση τα μοντέλα Dubois και I.E.M.) από το εμπειρικό μοντέλο του Hallikainen.



Σχήμα 40. Διάγραμμα σύγκρισης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας και βάθους διείσδυσης για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α. (αριστερή εικόνα) και ιστόγραμμα τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τους ίδιους σταθμούς.



Σχήμα 41. Διάγραμμα σύγκρισης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας και βάθους διείσδυσης για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. σε Σουδάν και Νίγηρα (αριστερή εικόνα) και ιστόγραμμα τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τους ίδιους σταθμούς.



Σχήμα 42. Διάγραμμα σύγκρισης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας και βάθους διείσδυσης για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στην Αυστραλία (αριστερή εικόνα) και ιστόγραμμα τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τους ίδιους σταθμούς.

3.4.2. Εξαγωγή Συνόλων Δεδομένων Μοντελοποιημένων Συντελεστών Οπισθοσκέδασης - Ογκομετρικής Εδαφικής Υγρασίας

Με την δημιουργία των συγκεντρωτικών πινάκων που περιέχουν τα επίγεια και δορυφορικά σύνολα δεδομένων ανά περιοχή ενδιαφέροντος - σταθμό του δικτύου I.S.M.N., πλέον δύναται να δημιουργηθούν τα σύνολα δεδομένων μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης. Βέβαια, λόγω του γεγονότος ότι λείπει η πληροφορία της εδαφικής τραχύτητας για κάθε περιοχή ενδιαφέροντος καθώς με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία αυτή προσδιορίζεται στο πεδίο (με αναλογικές μεθόδους ή με σάρωση laser), τα σύνολα των μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης υπολογίστηκαν για 6 τιμές του δείκτη τραχύτητας $kHrms$ στο εύρος εγκυρότητας κάθε μοντέλου (π.χ. για το I.E.M. δίνεται το εύρος εγκυρότητας $0 \leq kHrms \leq 3$). Στην περίπτωση που στις σχέσεις υπολογισμού των μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης ζητούνται και/ή ο δείκτης τραχύτητας του μήκους συσχέτισης, αυτός προσδιορίστηκε έμμεσα από την σχέση $L = Hrms^2(1/e)$ που προτάθηκε από τους Taconet and Ciarletti 2007 [44] εκτός από το μοντέλο I.E.M. για το οποίο δίνεται και μια σχέση υπολογισμού του L από τους Baghdadi et al 2004 [31].

Έπειτα, για κάθε μοντέλο επιλέχθηκε το σύνολο δεδομένων μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης με τη μικρότερη διαφορά των μέσων όρων μεταξύ SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης $\overline{Bias} = \left| \overline{\sigma_0^{SAR}} - \overline{\sigma_0^{model}} \right|$ ενώ για το μοντέλο I.E.M. επιλέχθηκε και η συνάρτηση συσχέτισης (A.C.F.) για την οποία επιτυγχάνεται ο παραπάνω στόχος.

Date	s0_Dubois_VV_(dB) _kHrms=2.50	s0_N.E.M._HV_(dB) _kHrms=0.01	s0_Oh- 2004_VV_(dB)_kHrms =1.40	s0_IEM_VV_(dB)_Gauss_ACF _Brogioni_kHrms=1.26
13/10/2014	-19.94	-26.90	-13.97	-0.59
25/10/2014	-19.97	-26.93	-14.03	-0.72
6/11/2014	-20.17	-27.12	-14.44	-1.61
30/11/2014	-19.87	-26.84	-13.84	-0.29
12/12/2014	-20.11	-27.06	-14.31	-1.33
24/12/2014	-20.30	-27.25	-14.78	-2.29
5/1/2015	-20.35	-27.30	-14.92	-2.55
17/1/2015	-17.53	-25.20	-11.65	5.69
29/1/2015	-18.71	-25.94	-12.45	3.24
10/2/2015	-19.93	-26.89	-13.95	-0.55
22/2/2015	-18.34	-25.69	-12.16	4.06
6/3/2015	-19.48	-26.51	-13.25	1.12
18/3/2015	-20.01	-26.97	-14.11	-0.90
30/3/2015	-20.08	-27.04	-14.25	-1.22
11/4/2015	-20.06	-27.01	-14.20	-1.10

Πίνακας 10. Απόσπασμα πίνακα μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης (βάσει των μοντέλων Dubois, Νέου Εμπειρικού Μοντέλου, Μοντέλου Oh και I.E.M.) όπου φαίνεται και η τιμή του δείκτη τραχύτητας $kHrms$ για την οποία επιτυγχάνεται η μικρότερη διαφορά των μέσων όρων μεταξύ SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης.

Επίσης, έγινε και μια απόπειρα αφαίρεσης ακραίων τιμών (outliers) από τα σύνολα δεδομένων των μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης μέσω του υπολογισμού του διατεταρτημοριακού εύρους - I.Q.R. το οποίο υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (59)$$

όπου Q_1 το πρώτο εκατοστημόριο (διαχωρίζει το 25% των χαμηλότερων τιμών του συνόλου από το υπόλοιπο 75%)

Q_3 το τρίτο εκατοστημόριο (διαχωρίζει το 25% των υψηλότερων τιμών του συνόλου από το υπόλοιπο 75%)

Επομένως, με βάση το διατεταρτημοριακό εύρος υπολογίζονται τα όρια που διαχωρίζουν κατά προσέγγιση τις υψηλότερες και κατώτερες ακραίες τιμές του συνόλου από τις υπόλοιπες τιμές βάσει των σχέσεων:

$lim_{min} = Q_1 - 1.5IQR$ (60) (όριο διαχωρισμού κατώτερων ακραίων τιμών από τις υπόλοιπες τιμές του συνόλου)

$lim_{max} = Q_3 + 1.5IQR$ (61) (όριο διαχωρισμού υψηλότερων ακραίων τιμών από τις υπόλοιπες τιμές του συνόλου)

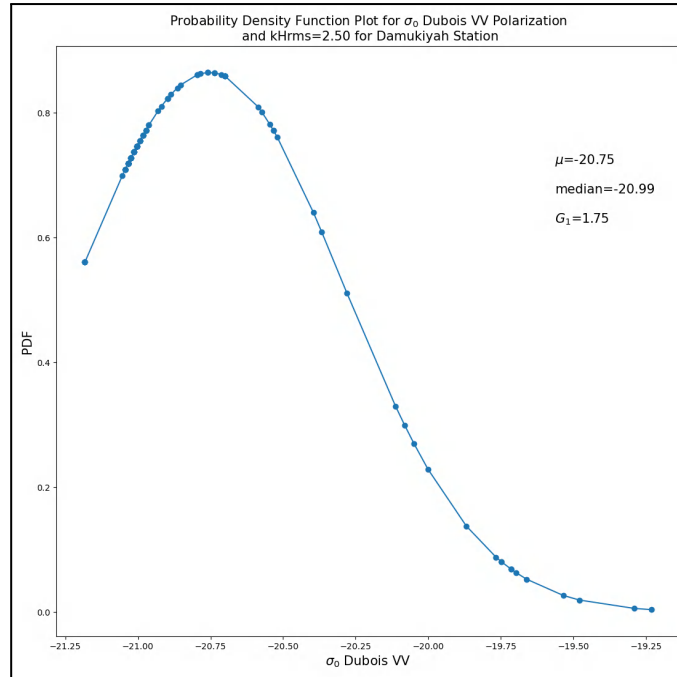
Ειδικότερα, αξιοποιήθηκε η μέθοδος της απαλοιφής ακραίων τιμών μέσω του διατεταρτημοριακού εύρους λόγω της μεγάλης διαφοράς μέσου όρου - διάμεσης τιμής και της λοξότητας των κατανομών των συνόλων των μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης. Η διαφορά μέσου όρου - διάμεσης τιμής και λοξότητας μπορεί να προσδιοριστεί θεωρώντας ότι τα σύνολα δεδομένων ανήκουν στην κανονική κατανομή και υπολογίζοντας την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κάθε τιμής από την σχέση:

$$pdf = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (62)$$

όπου μ ο μέσος όρος των τιμών των συνόλων

σ η τυπική απόκλιση

x οι επιμέρους τιμές των συνόλων



Σχήμα 43. Διάγραμμα απεικόνισης λοξής κατανομής τιμών μοντελοποιημένων κατά Dubois συντελεστών οπισθοσκέδασης (φαίνεται από την απόκλιση της κορυφής της χαρακτηριστικής καμπύλης της κανονικής κατανομής από την διάμεση τιμή του συνόλου τιμών) για την περιοχή ενδιαφέροντος “Damukiyah”.

Τελικά, έχοντας για κάθε περιοχή ενδιαφέροντος διαθέσιμα τα σύνολα τιμών SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης, μέσω μιας διαδικασίας μαθηματικής βελτιστοποίησης (ή αντιστροφής των μοντέλων οπισθοσκέδασης) εξήχθη η ογκομετρική εδαφική υγρασία για κάθε τιμή SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης. Αρχικά, για την αντιστροφή των μοντέλων οπισθοσκέδασης απαιτείται ο ορισμός μιας συνάρτησης κόστους όπως αυτή που αποτυπώνεται στην παρακάτω σχέση:

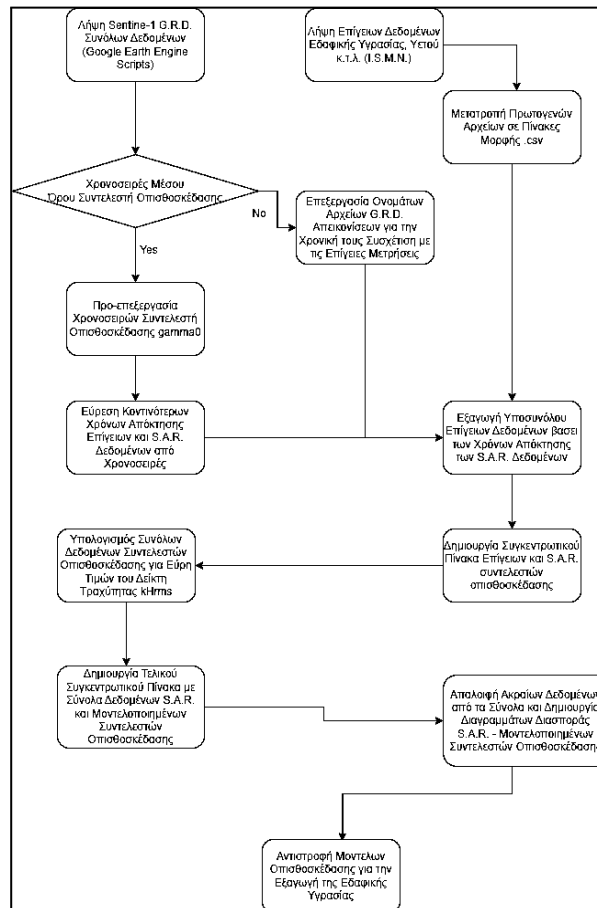
$$L = \sum_{i=1}^i \left| \sigma_{0,i}^{SAR} - \sigma_{0,i}^{model} \right|^2 \quad (63)$$

όπου $\sigma_{0,i}^{SAR}$ οι επιμέρους τιμές των συνόλων δεδομένων συντελεστών οπισθοσκέδασης πλήθους i από SAR απεικονίσεις

όπου $\sigma_{0,i}^{model}$ οι επιμέρους τιμές των συνόλων δεδομένων μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης πλήθους i στις οποίες η ογκομετρική εδαφική υγρασία εισέρχεται σαν άγνωστη παράμετρος

Έπειτα, με εφαρμογή της μεθόδου μαθηματικής βελτιστοποίησης S.L.SQ.P. (Sequential Least Squares Programming) η οποία δίνει την δυνατότητα εισαγωγής πεδίου ορισμού των τιμών ($[0, 1]$ για την ογκομετρική εδαφική υγρασία) καθώς και “φραγμάτων” στο πεδίο ορισμού των τιμών (π.χ. για το μοντέλο Oh-2004 τίθενται τα κάτω και άνω φράγματα 0.04 και 0.291 αντίστοιχα) υλοποιήθηκε ο

έμμεσος προσδιορισμός των συνόλων δεδομένων ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας από τα σύνολα δεδομένων SAR και μοντελοποιημένων τιμών συντελεστών οπισθοσκέδασης. Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα ροής των εργασιών (η υλοποίηση έγινε σε Python, Javascript στο περιβάλλον του Google Earth Engine και διαδικτυακές πλατφόρμες λήψης δεδομένων) που απαιτούνται για την εξαγωγή συνόλων δεδομένων μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης και ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας.



Σχήμα 44. Διάγραμμα ροής εργασιών για την την εξαγωγή συνόλων δεδομένων μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης και ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας.

3.5. Ανάλυση Αποτελεσμάτων

3.5.1. Εισαγωγή

Στο παρόν και τελευταίο κεφάλαιο της εφαρμογής των μοντέλων οπισθοσκέδασης για τον προσδιορισμό της εδαφικής υγρασίας, θα γίνει αρχικά μια στατιστική και περιγραφική σύγκριση/ανάλυση των συνόλων δεδομένων SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης για κάθε ένα από τα εμπειρικά και φυσικά μοντέλα οπισθοσκέδασης. Σε σχέση με την στατιστική ανάλυση/σύγκριση των συνόλων δεδομένων SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης, αξιοποιήθηκαν οι δείκτες του R.M.S.E. (ρίζα μέσης τετραγωνικής απόκλισης) και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 οι οποίοι δίνουν μια εκτίμηση του σφάλματος του

συνόλου των μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης και τον βαθμό προσαρμογής των SAR και μοντελοποιημένων συνόλων συντελεστών οπισθοσκέδασης βάσει της ευθείας $y = ax + b$ που ορίζεται μέσω της ανάλυσης ελαχίστων τετραγώνων. Οι σχέσεις των άνωθεν συντελεστών φαίνονται παρακάτω ενώ να σημειωθεί ότι για την ανάλυση των αποτελεσμάτων διατηρήθηκαν μόνο τα ζεύγη συνόλων τιμών SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης για τα οποία ισχύει $R^2 > 0.10$.

$$R. M. S. E. = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (64)$$

όπου n το μέγεθος των συνόλων δεδομένων

y_i οι επιμέρους τιμές των μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης (εξαρτημένη μεταβλητή της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων)

\hat{y}_i οι επιμέρους τιμές των μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης οι οποίοι υπολογίζονται μέσω της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων, άρα $\hat{y}_i = ax_i + b$ όπου x_i οι επιμέρους τιμές των SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης

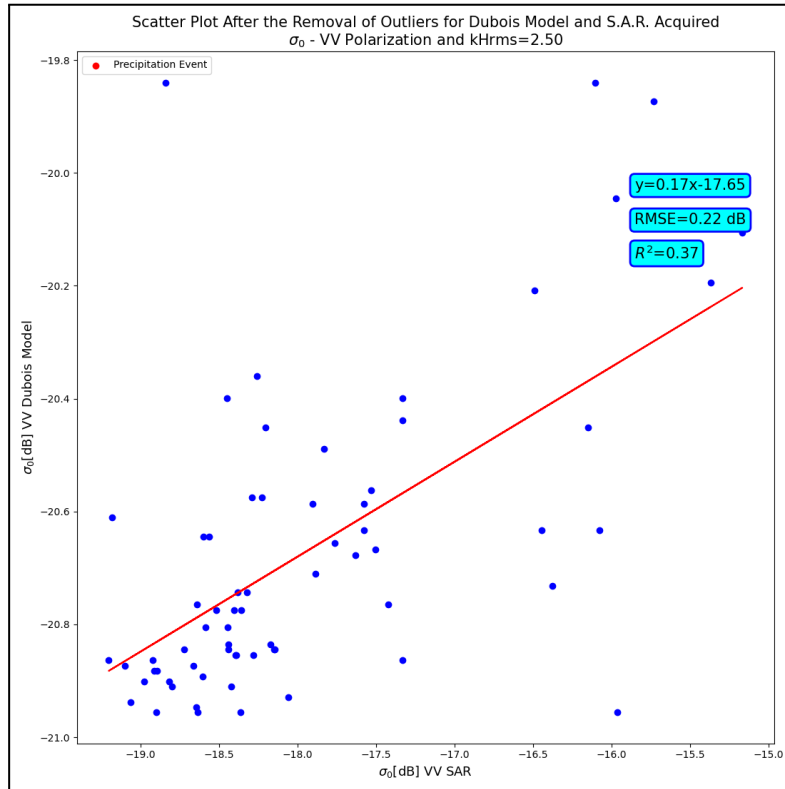
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (65)$$

όπου \bar{y} ο μέσος όρος των επιμέρους τιμών των μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης

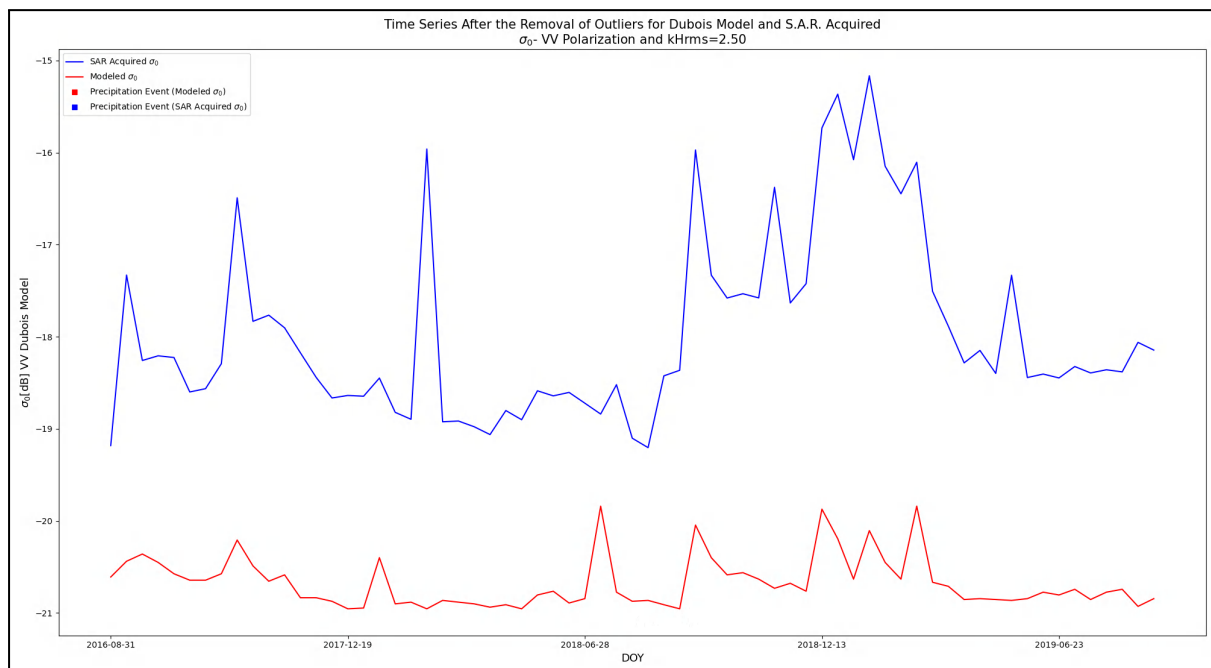
Η περιγραφική ανάλυση/σύγκριση των συνόλων δεδομένων SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης έγινε μέσω της δημιουργίας χρονοσειρών όπου φαίνεται η χρονική εξέλιξη των συντελεστών οπισθοσκέδασης και όπου μπορεί να παρατηρηθεί η ευαισθησία των μοντέλων οπισθοσκέδασης στο να προβλέπουν τις μεταβολές της οπισθοσκέδασης η οποία αφετέρου επηρεάζεται από την γωνία πρόσπτωσης του SAR σήματος στον στόχο, την εδαφική υγρασία του και την εδαφική τραχύτητα. Τέλος, με τον ίδιο τρόπο έγινε και η ανάλυση/σύγκριση των συνόλων μετρούμενων τιμών εδαφικής υγρασίας με επίγεια όργανα και των τιμών εδαφικής υγρασίας που προσδιορίζονται από την αντιστροφή (μαθηματική βελτιστοποίηση των μοντέλων οπισθοσκέδασης). Βέβαια, επιλέχθηκε μόνο το μοντέλο οπισθοσκέδασης I.E.M. (Integral Equation Model) για το οποίο επιτυγχάνονταν τα καλύτερα αποτελέσματα από άποψης προσαρμογής (δείκτης R^2) μεταξύ μετρημένων και μοντελοποιημένων τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας και ευαισθησίας μοντελοποιημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας στις μεταβολές της μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας στον χρόνο. Τέλος, να σημειωθεί ότι ομαδοποιήθηκαν τα σύνολα των σταθμών “Tondikiboro” και “Wankama” στον Νίγηρα και “Widgiewa” και “Yamma Road”, λόγω της χωρικής εγγύτητας τους και των παρόμοιων βιοκλιματικών συνθηκών. Λοιπές ομαδοποιήσεις δεν έγιναν καθώς οι μεγάλες διαφορές στις γωνίες πρόσπτωσης του SAR σήματος μεταξύ των σταθμών θα δημιουργούσε μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές των μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης, κάτι το οποίο θα καθιστούσε την στατιστική και περιγραφική ανάλυση/σύγκριση των συνόλων δεδομένων αδύνατη.

3.5.2. Στατιστική Ανάλυση/Σύγκριση Συνόλων Μοντελοποιημένων κατά Dubois Συντελεστών Οπισθοσκέδασης και SAR Συντελεστών Οπισθοσκέδασης

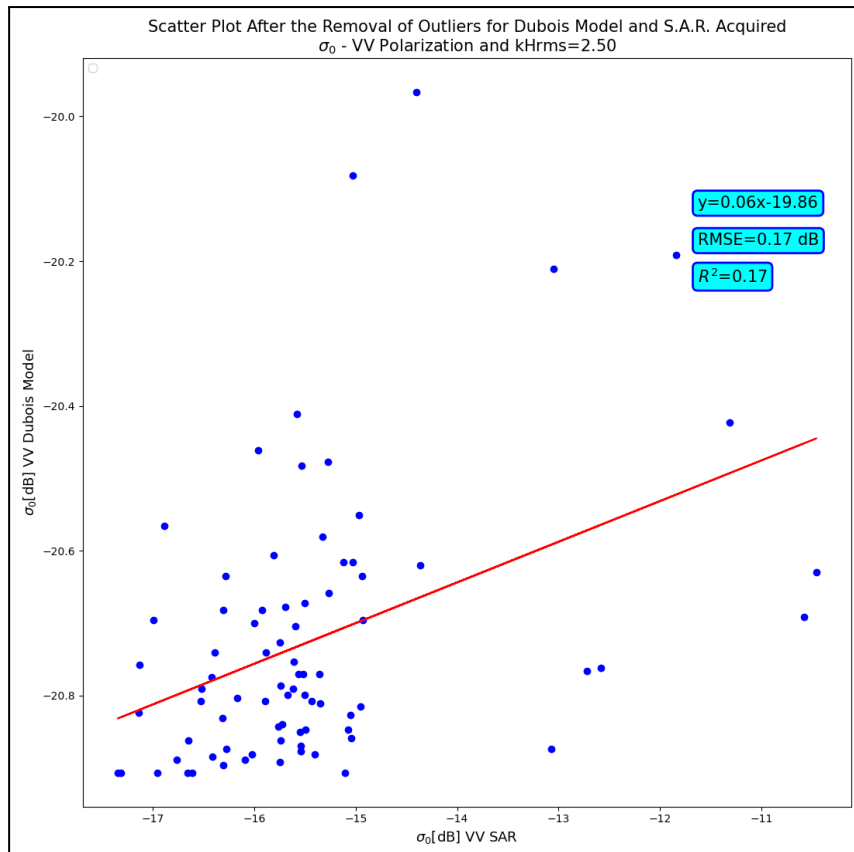
Στα παρακάτω σχήματα παρατίθενται τα διαγράμματα διασποράς και οι χρονοσειρές SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης κατά Dubois για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. που χρησιμοποιήθηκαν.



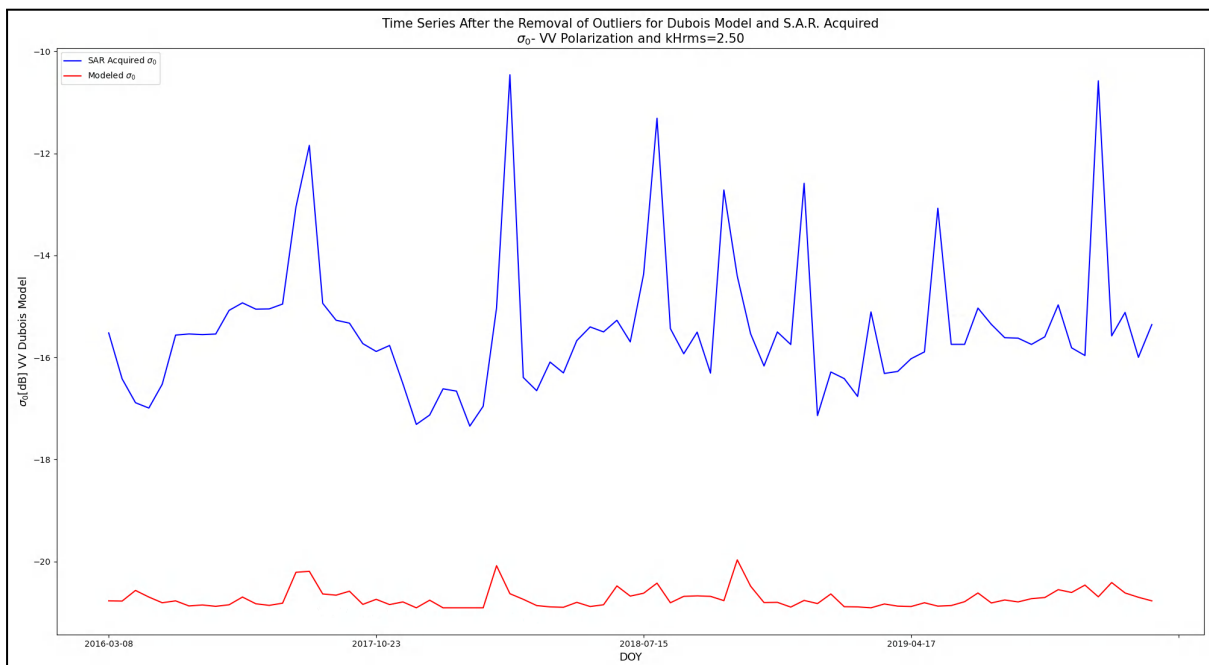
Σχήμα 45. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.



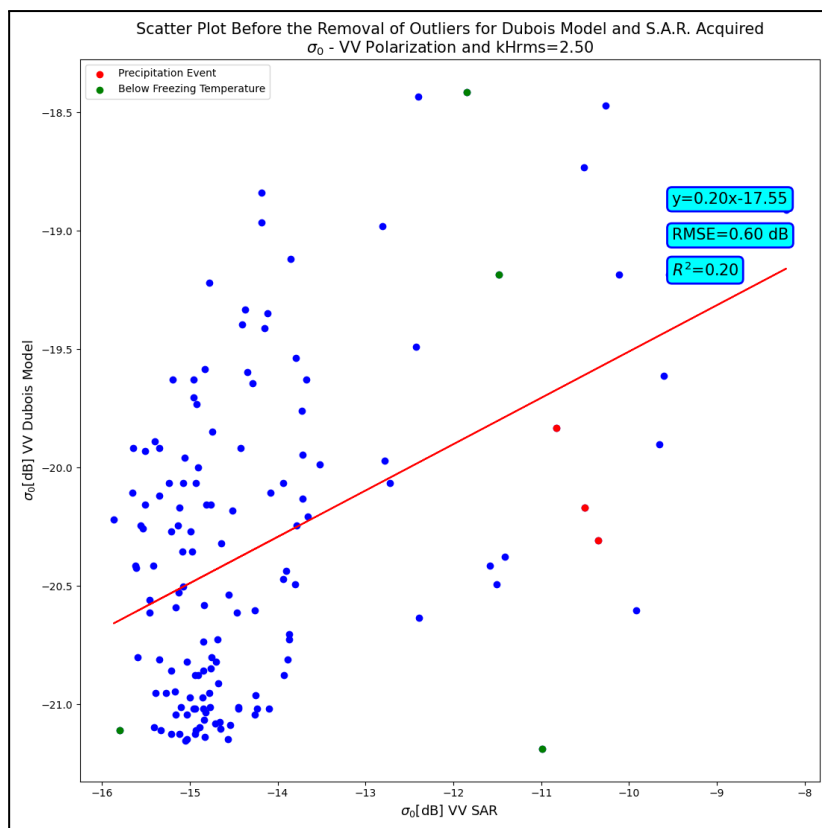
Σχήμα 46. Χρονοσειρά μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.



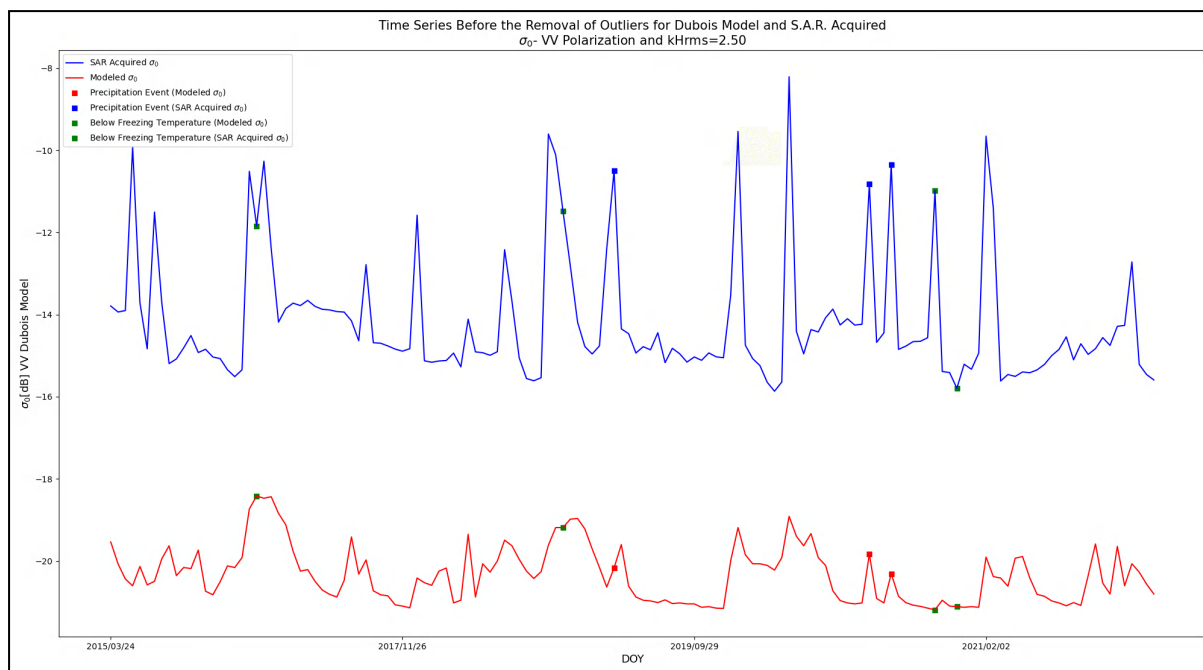
Σχήμα 47. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Jornada”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.



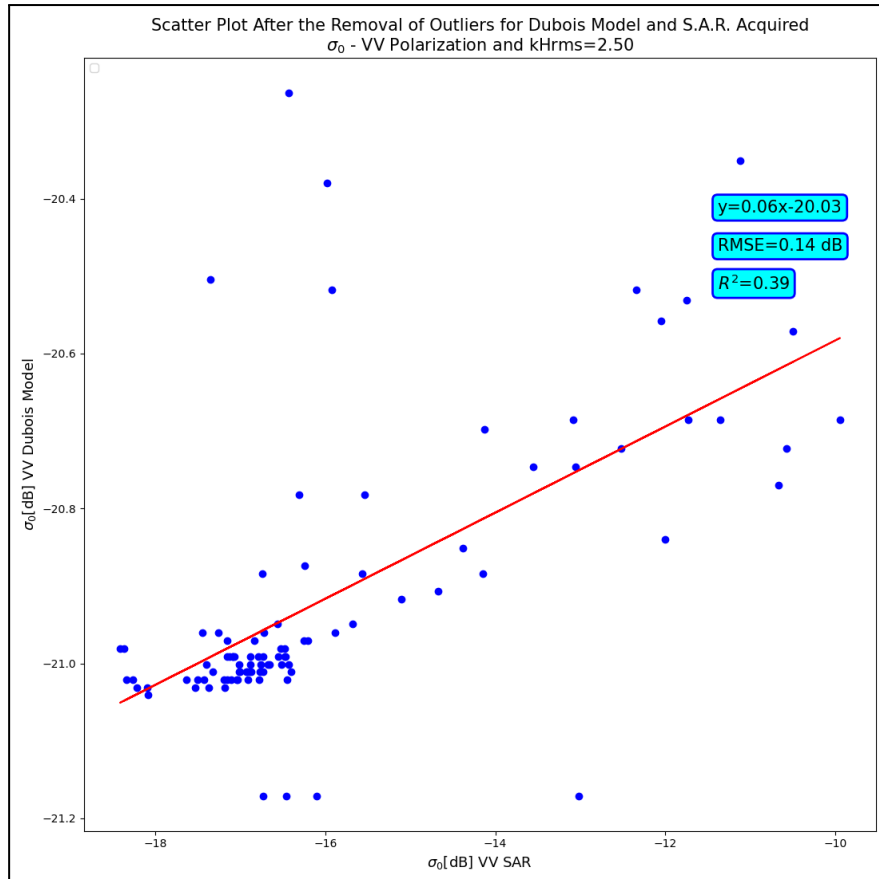
Σχήμα 48. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Jornada”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.



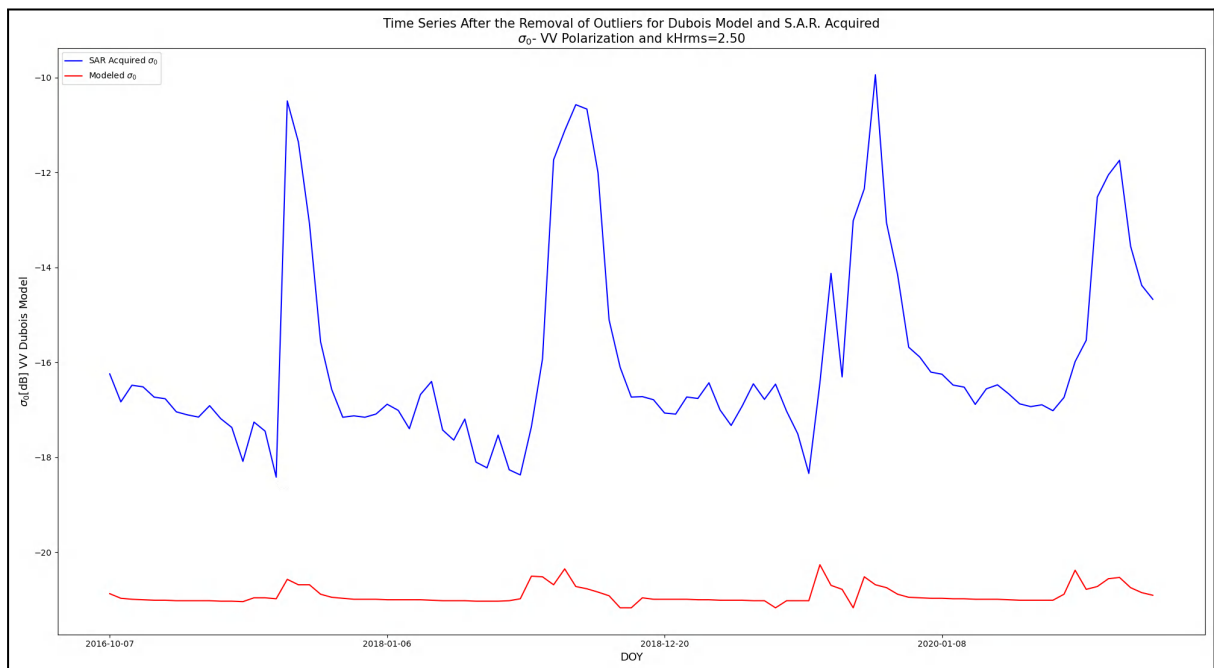
Σχήμα 49. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.



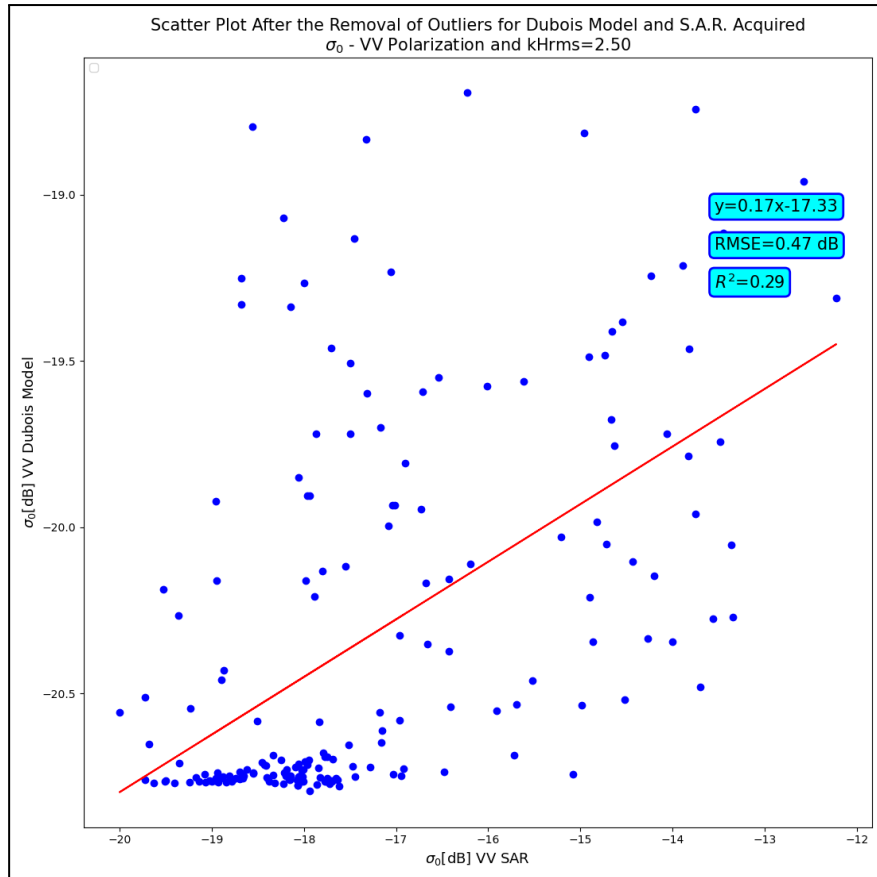
Σχήμα 50. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.



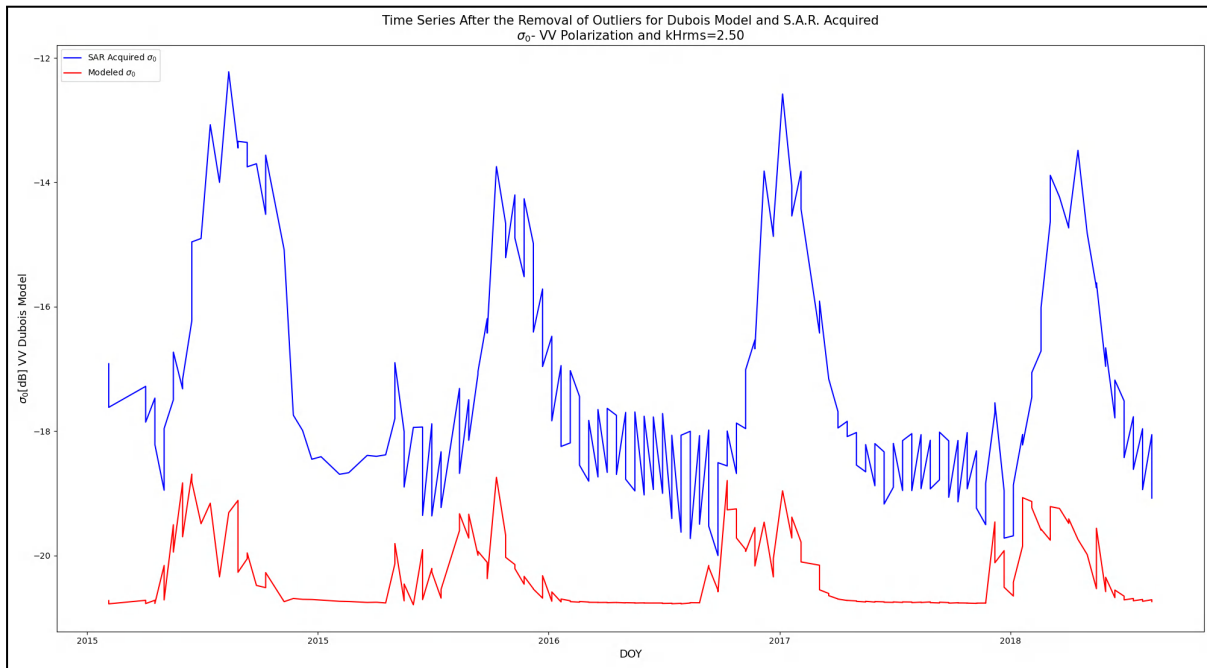
Σχήμα 51. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Damukiyah”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.



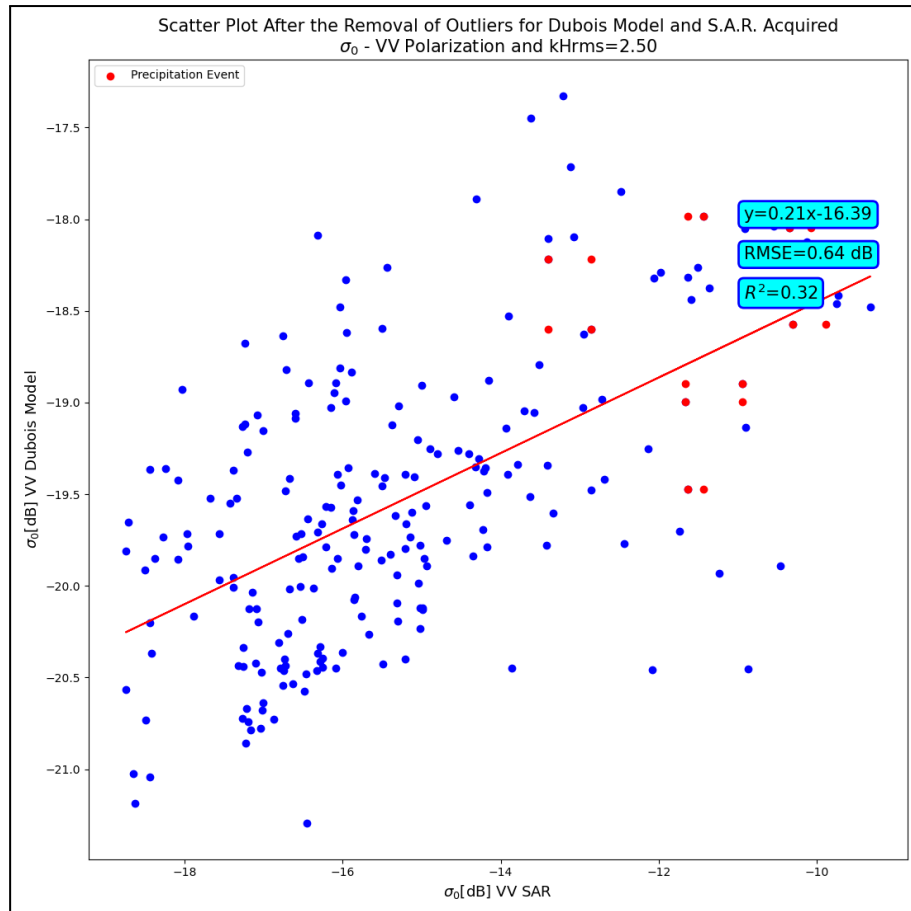
Σχήμα 52. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Damukiyah”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.



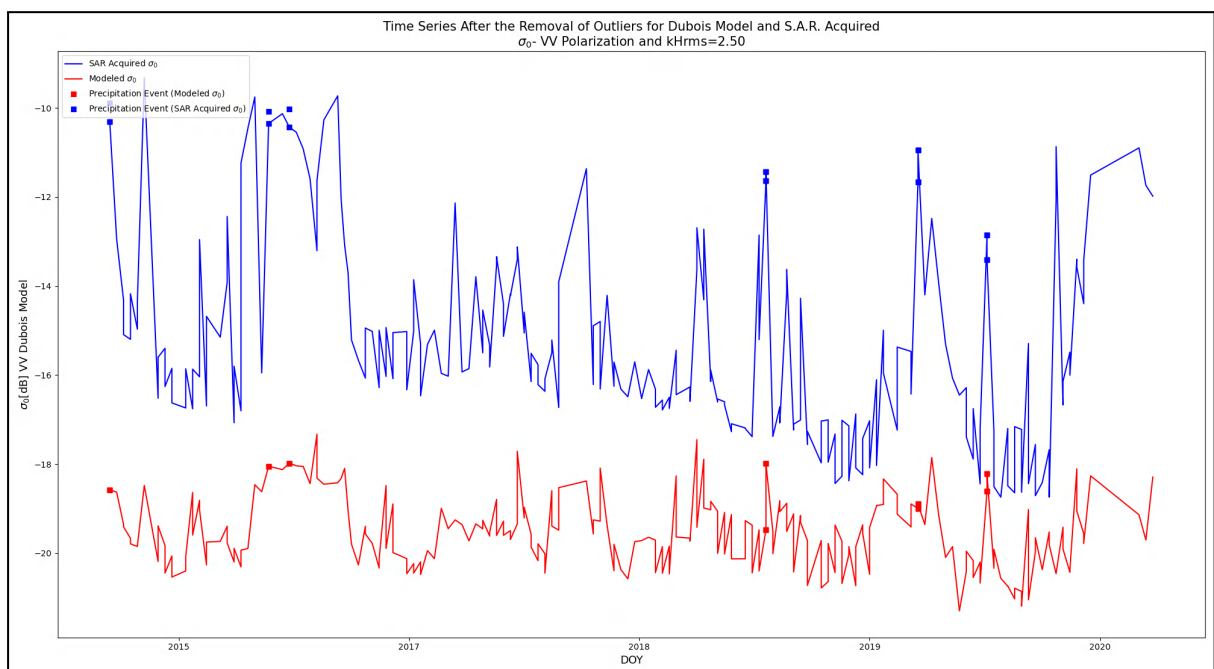
Σχήμα 53. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Tondikiboro” και “Wankama”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.



Σχήμα 54. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Tondikiboro” και “Wankama”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.



Σχήμα 55. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.



Σχήμα 56. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.

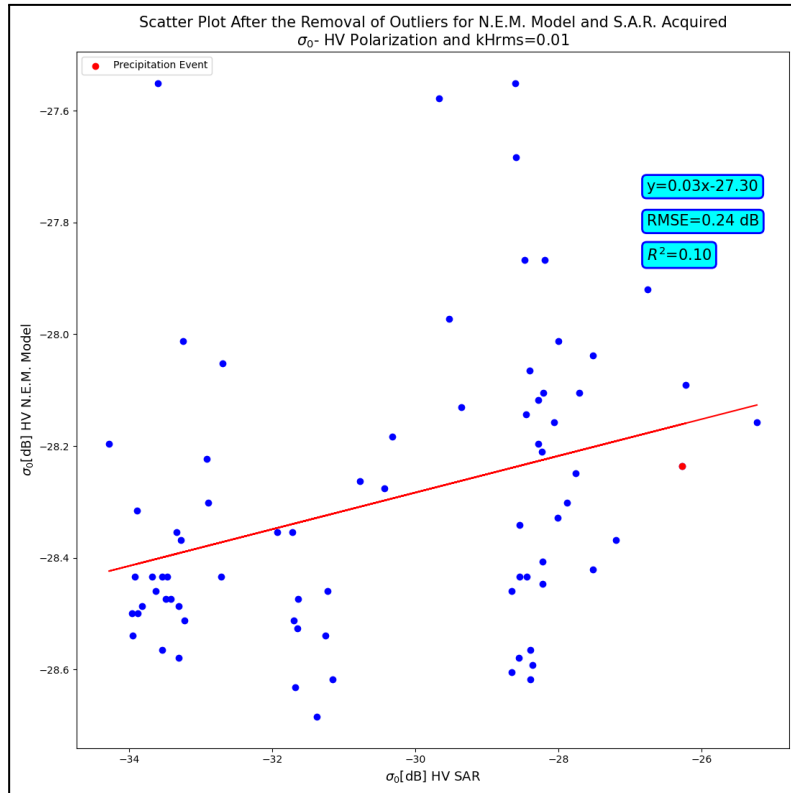
Σταθμός Δικτύου I.S.M.N.	Έκταση Περιοχής Ενδιαφέροντος	Είδος Πρωτογενών Δεδομένων S.A.R.	R^2	R.M.S.E. [dB]	Συντελεστής α Ευθείας Ε.Τ.	Συντελεστής β Ευθείας Ε.Τ.
Ford Dry Lake	Προσαρμοσμένη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.37	0.22	0.17	-17.65
Jomada	Μέγιστη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.17	0.17	0.06	-19.86
Williams 35 NW	Προσαρμοσμένη	Σύνολο S1 GRD Εικόνων	0.20	0.60	0.20	-17.55
Damukiyah	Προσαρμοσμένη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.39	0.14	0.06	-20.03
Africa Group	Προσαρμοσμένη	Σύνολο S1 GRD Εικόνων	0.29	0.47	0.17	-17.33
Australia Group	Προσαρμοσμένη	Σύνολο S1 GRD Εικόνων	0.33	0.75	0.25	-15.66

Πίνακας 11. Πίνακας στατιστικών και περιγραφικών στοιχείων ανάλυσης/σύγκρισης SAR και μοντελοποιημένων κατά Dubois συντελεστών οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N..

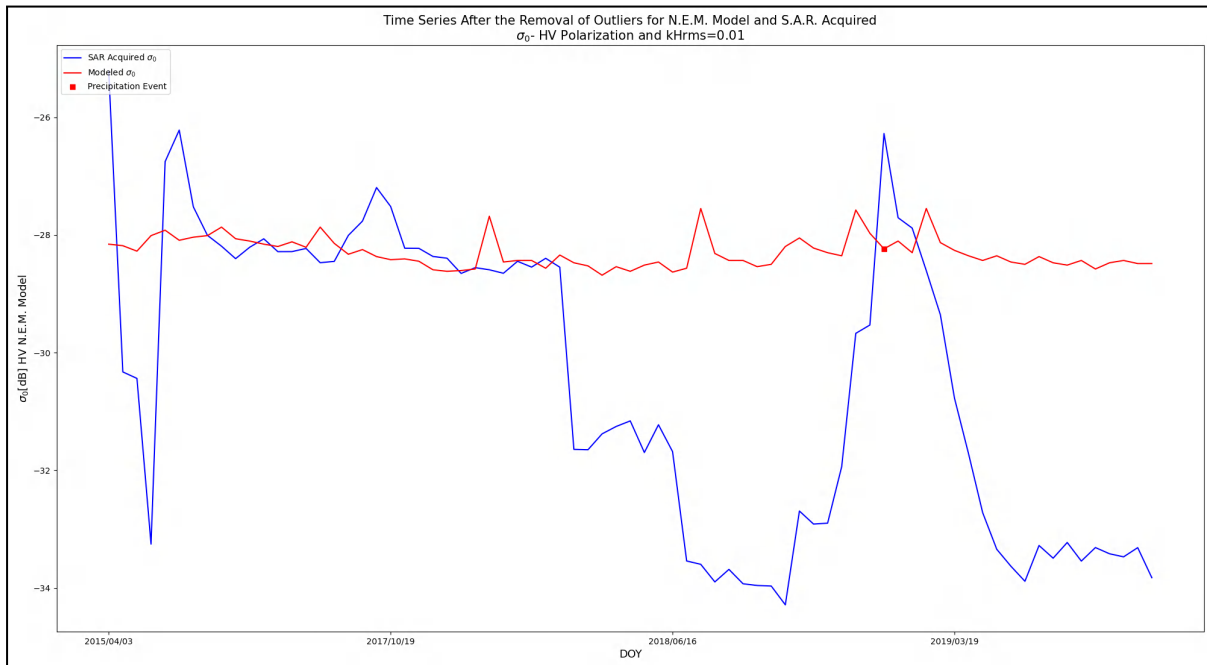
Αναφορικά με την ανάλυση των αποτελεσμάτων, ξεκινώντας από με τον βαθμό προσαρμογής των συνόλων μοντελοποιημένων κατά Dubois συντελεστών οπισθοσκέδασης στα σύνολα SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης, αυτή φαίνεται να επηρεάζεται μερικώς από την συχνότητα των βροχοπτώσεων με τους “ξηρότερους” σταθμούς (μικρότερη συχνότητα βροχοπτώσεων) “Ford Dry Lake” και “Damukiyah” να παρουσιάζουν τον καλύτερο βαθμό προσαρμογής (δείκτες τιμών R^2 ίσοι με 0.37 και 0.39 αντίστοιχα). Έπειτα, σχετικά με την ευαισθησία των τιμών μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης στην ανίχνευση των μεταβολών των τιμών SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης, αυτή θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μικρή και εντοπίζεται κυρίως σε πιο ραγδαίες μεταβολές των SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης. Τέλος, παρατηρείται σε όλους τους σταθμούς που μελετήθηκαν και μια σταθερή αρνητική διαφορά των 3-5 dB των μέσων όρων των συνόλων μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης σε σχέση με τους μέσους όρους των συνόλων SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης ενώ στα σύνολα μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης φαίνεται να ανιχνεύονται με επιτυχία τα περισσότερα καταγραφόμενα γεγονότα βροχόπτωσης.

3.5.3. Στατιστική Ανάλυση/Σύγκριση Μοντελοποιημένων κατά N.E.M. Συντελεστών Οπισθοσκέδασης και SAR Συντελεστών Οπισθοσκέδασης

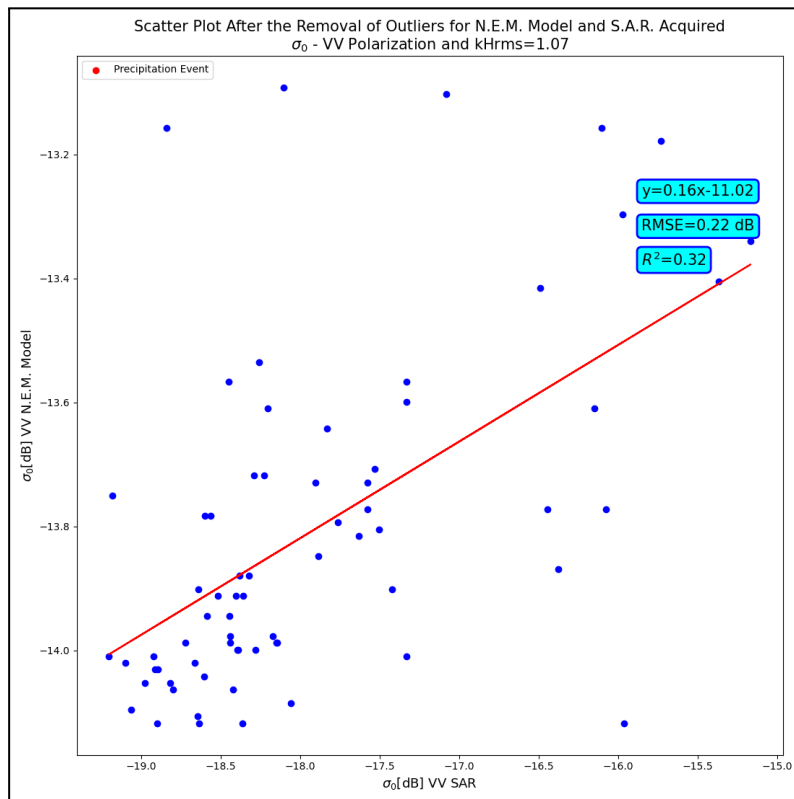
Παρακάτω παρουσιάζονται τα σχήματα των διαγραμμάτων διασποράς και οι χρονοσειρές SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης για το μοντέλο “New Empirical” (N.E.M.) και τις δύο διαθέσιμες πολώσεις HV και VV.



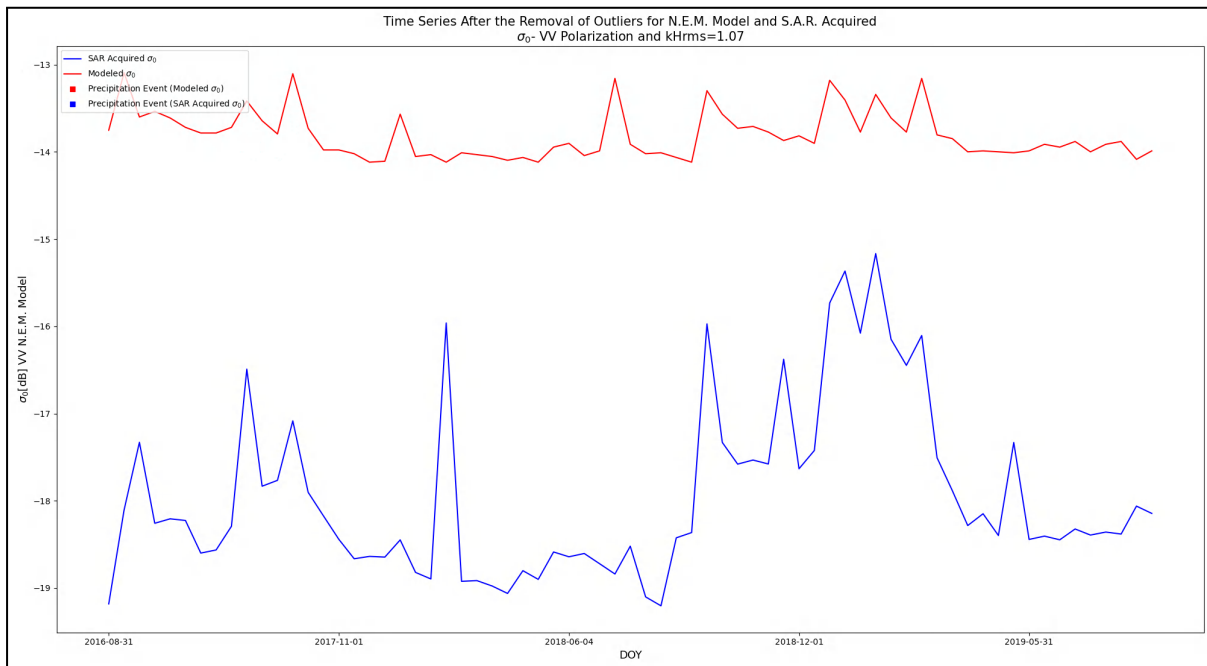
Σχήμα 57. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.



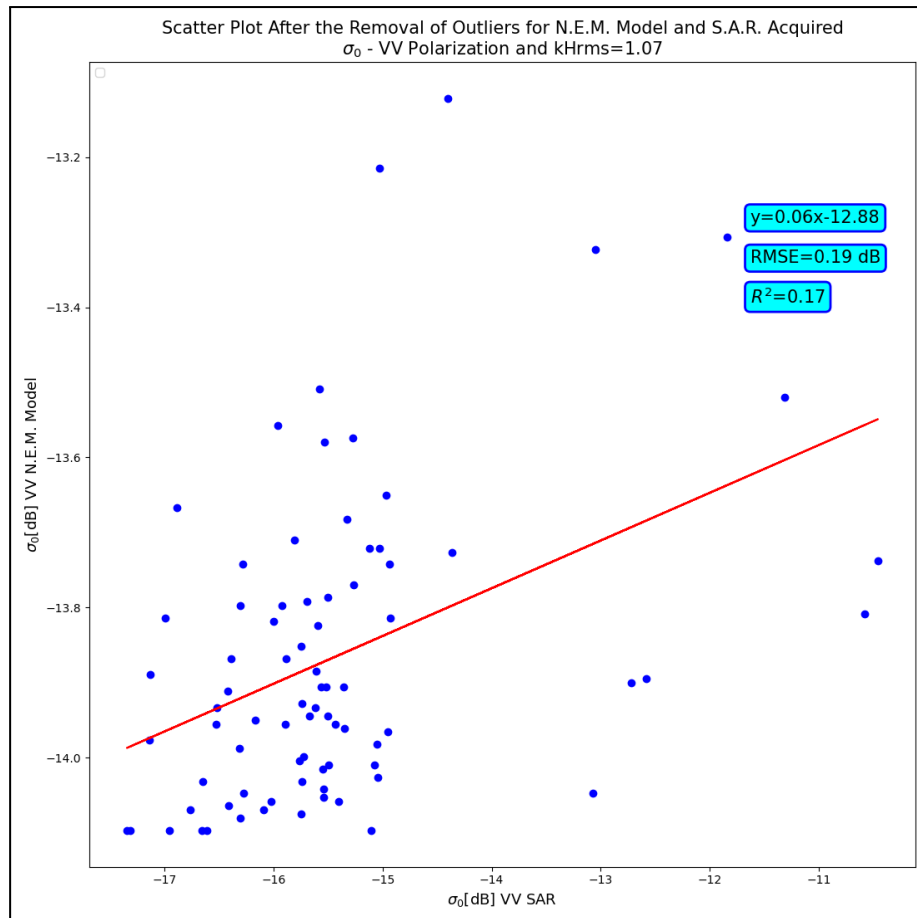
Σχήμα 58. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.



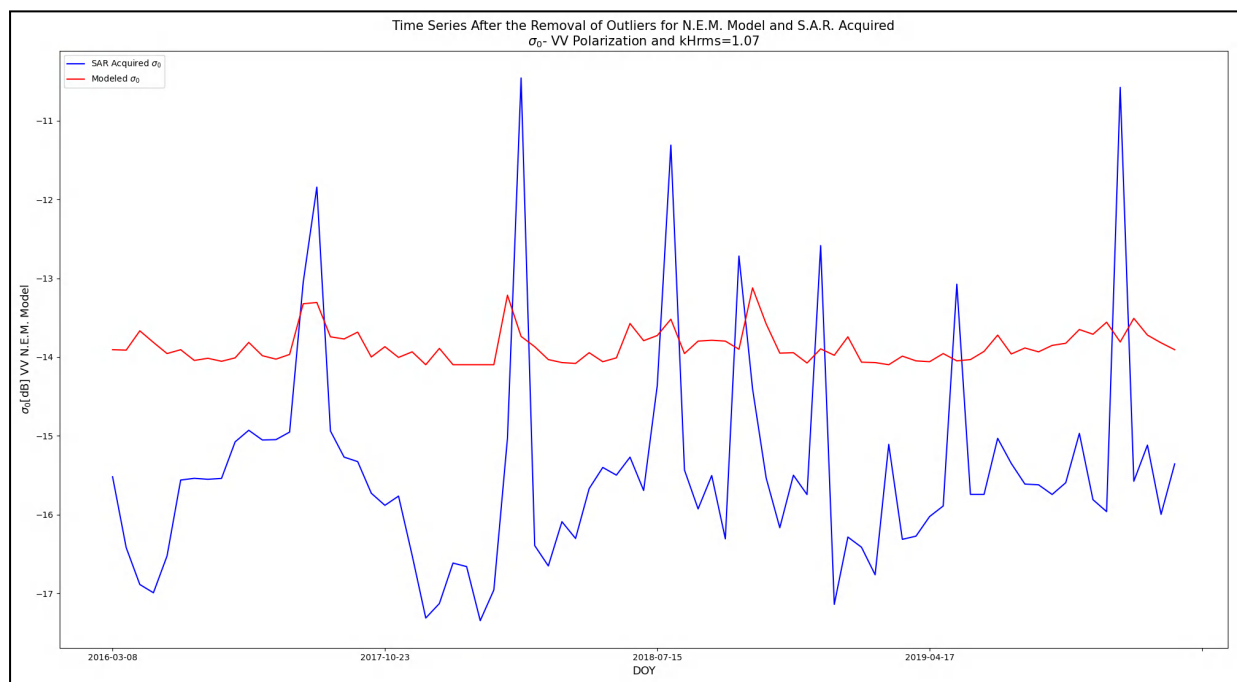
Σχήμα 59. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.



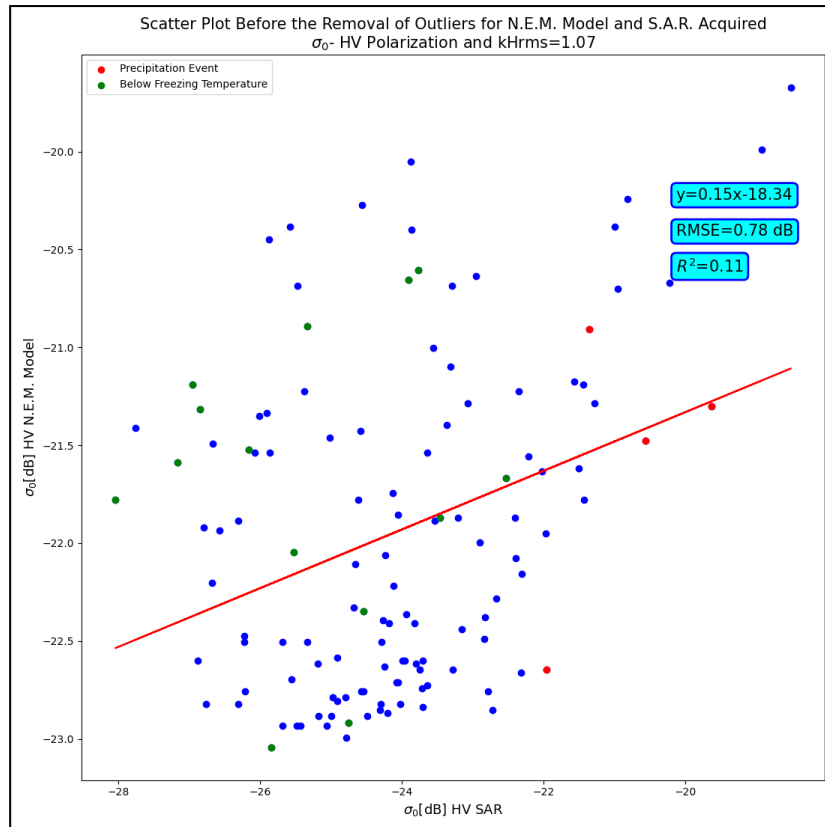
Σχήμα 60. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.



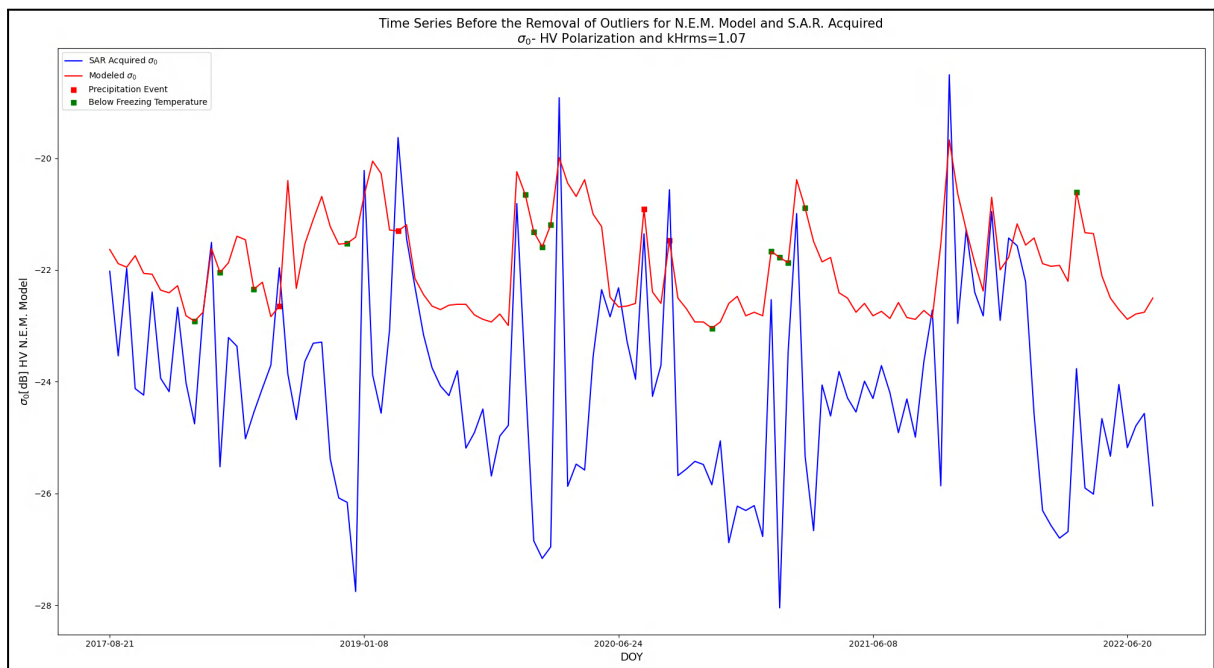
Σχήμα 61. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Jornada”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.



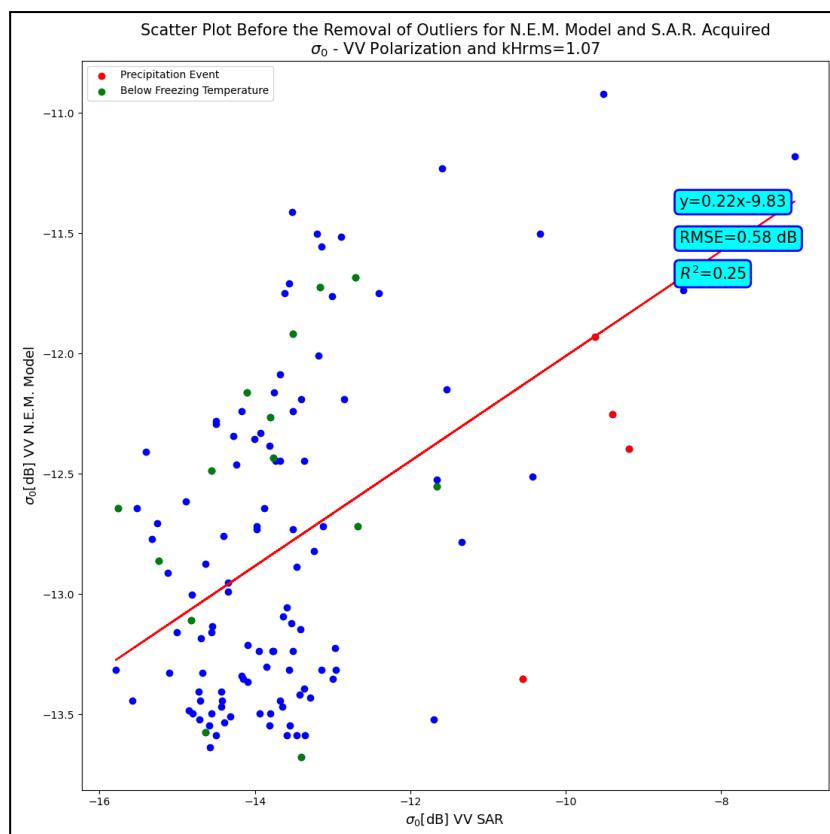
Σχήμα 62. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Jornada”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.



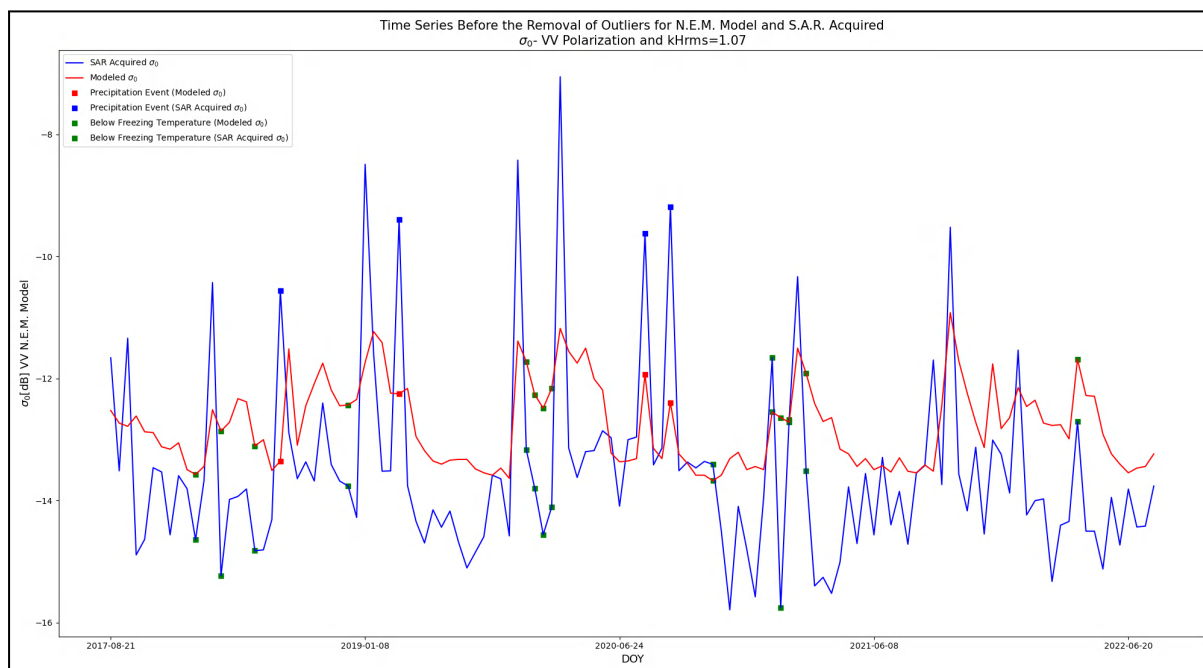
Σχήμα 63. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “New Empirical” και πόλωσης VH.



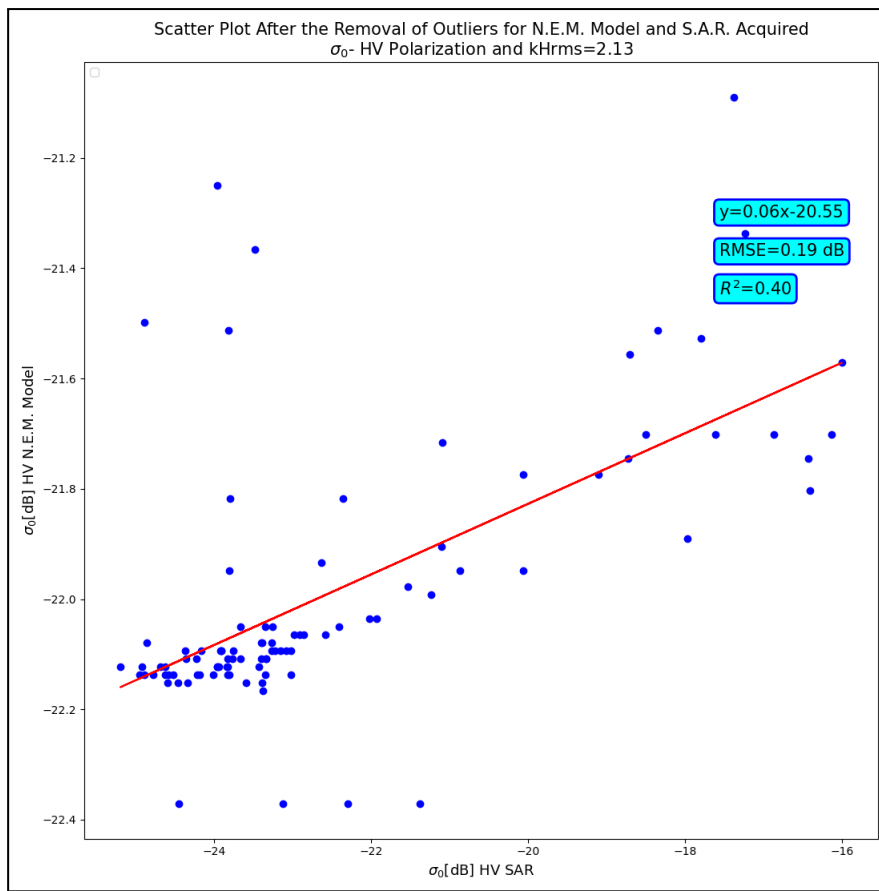
Σχήμα 64. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.



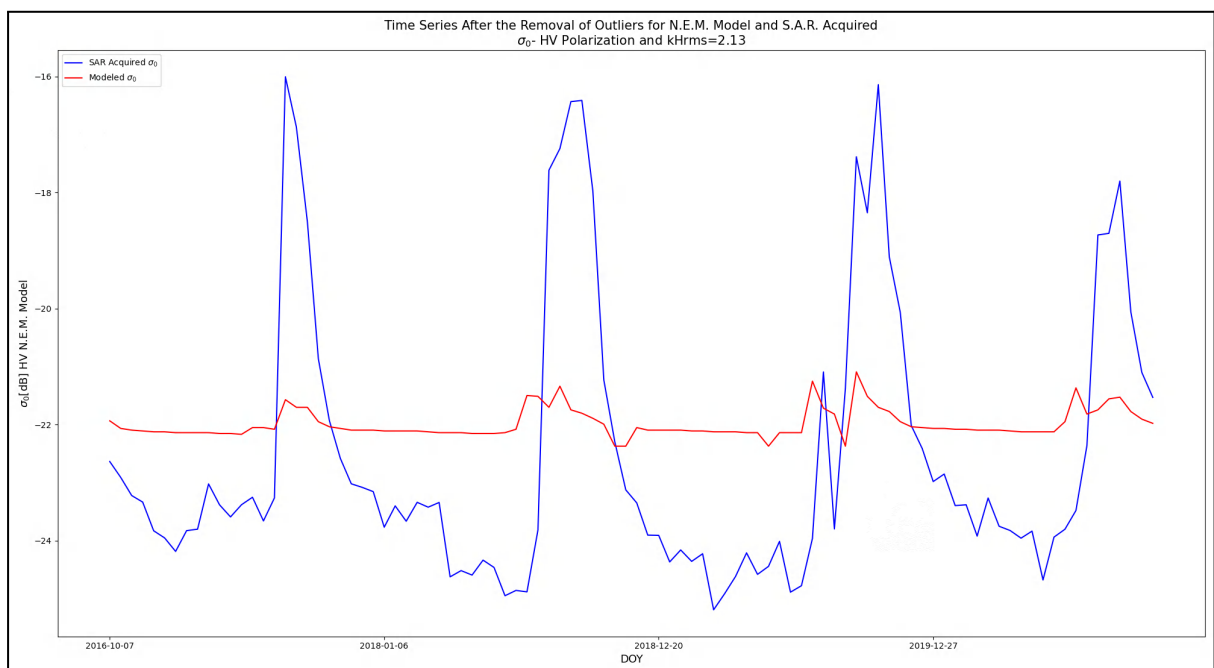
Σχήμα 65. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωσης VV.



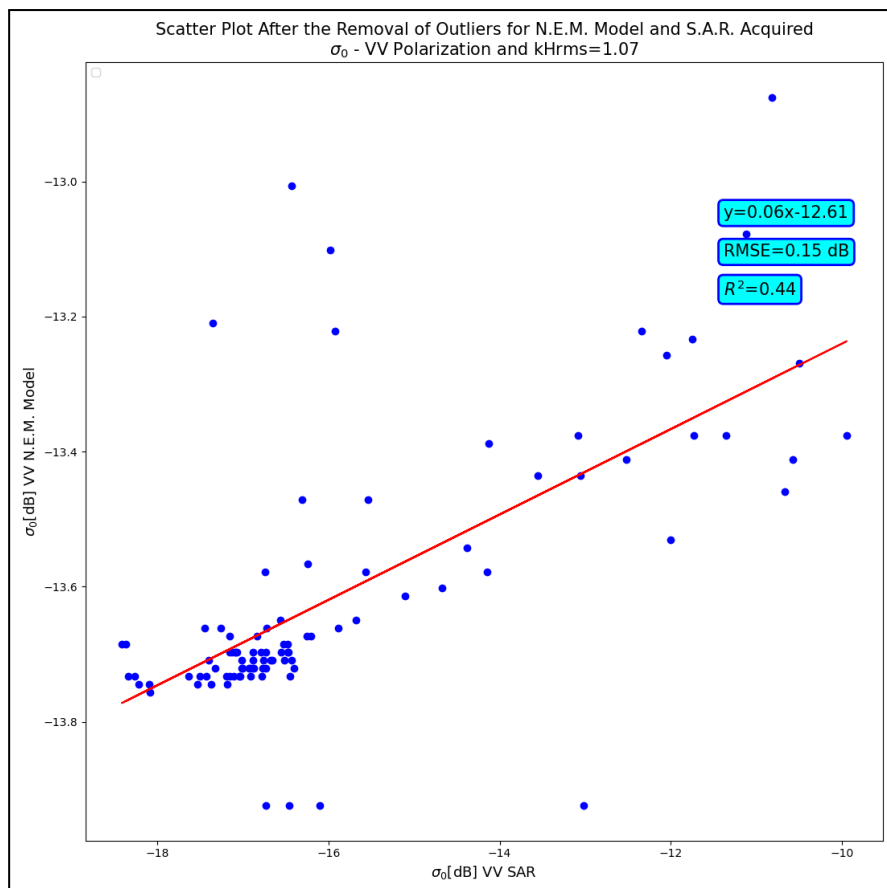
Σχήμα 66. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωσης VV.



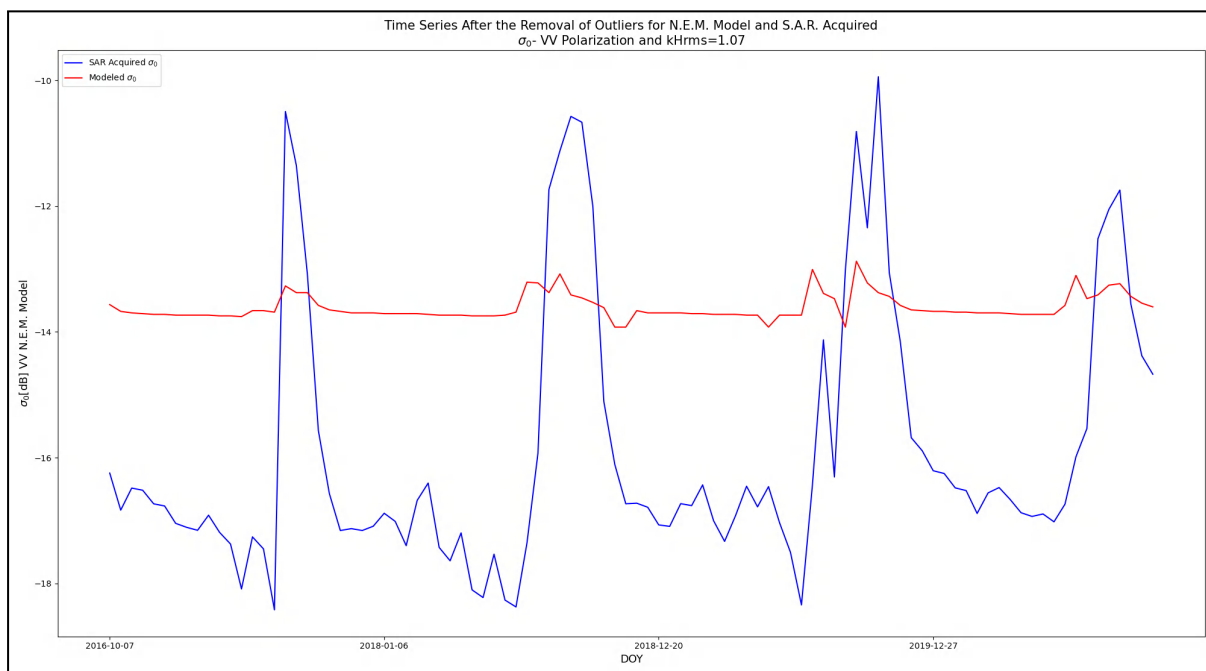
Σχήμα 67. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Damukiyah”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.



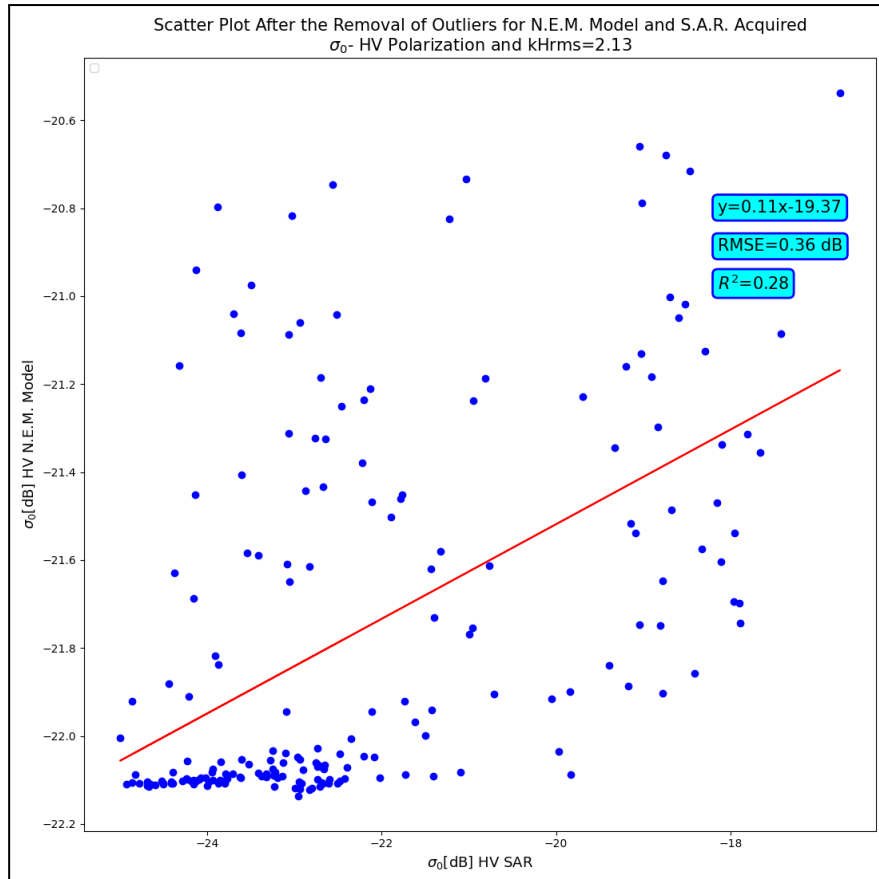
Σχήμα 68. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Damukiyah”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.



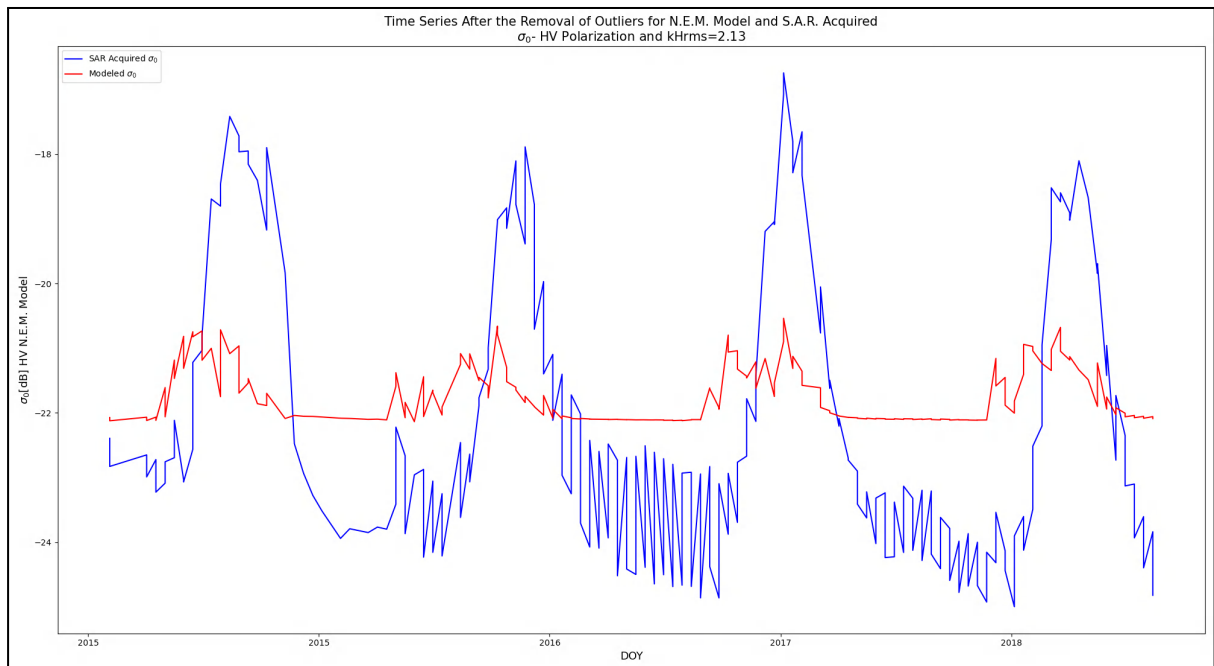
Σχήμα 69. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Damukiyah”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.



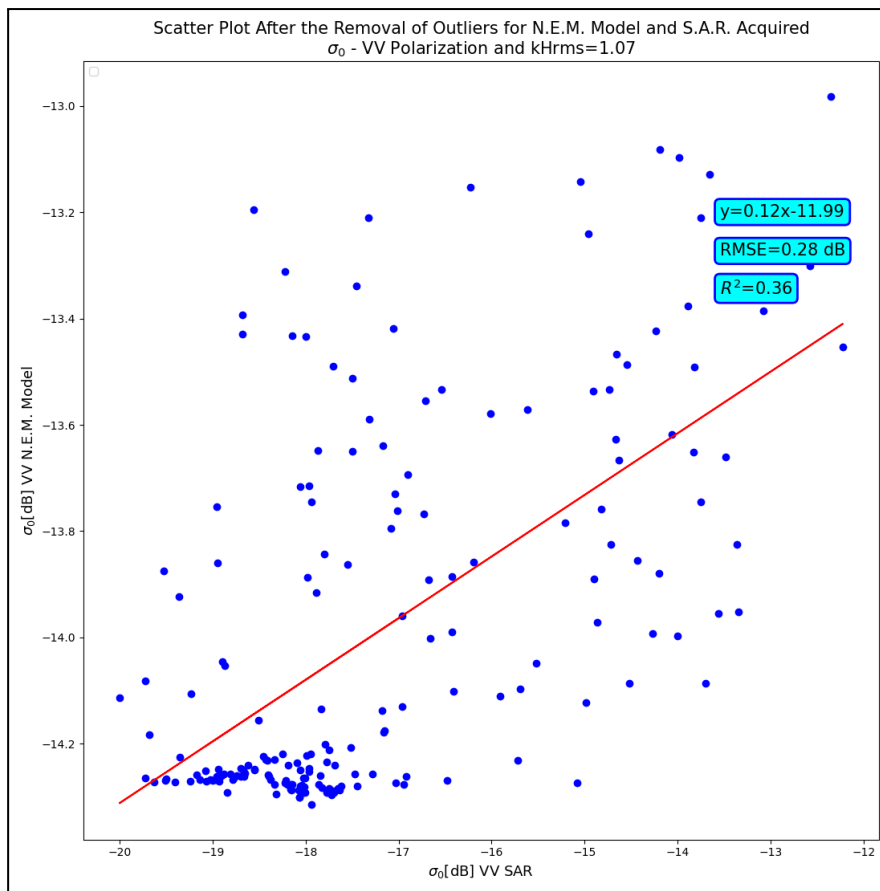
Σχήμα 70. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Damukiyah”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.



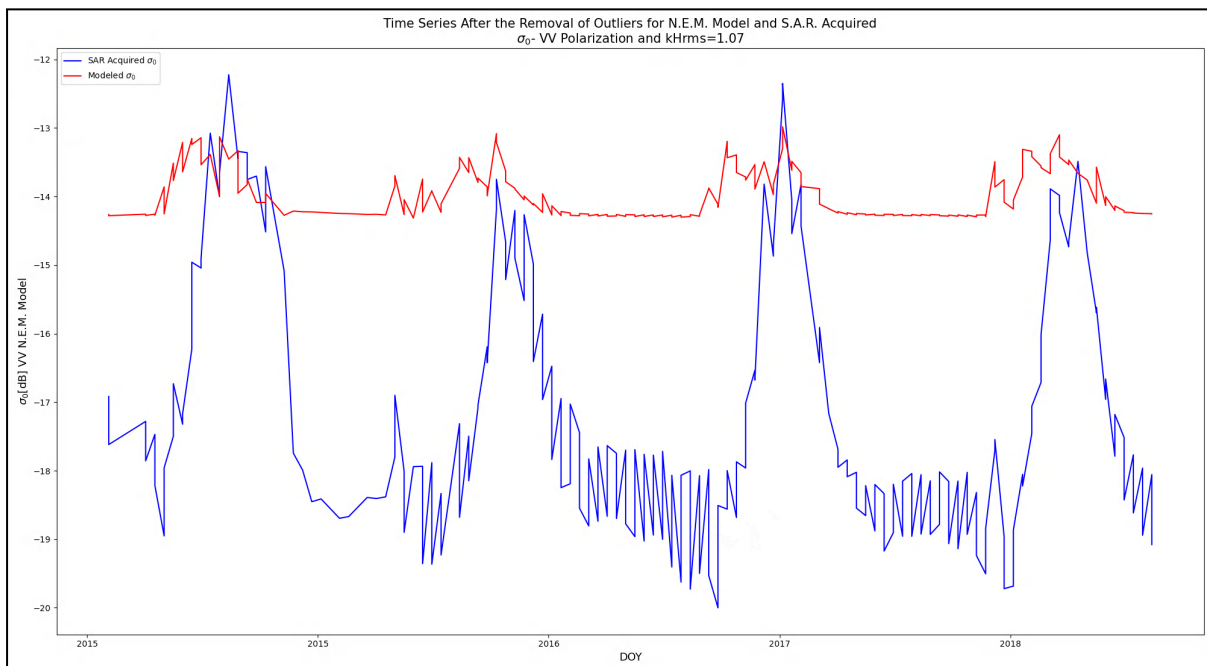
Σχήμα 71. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Tondikiboro” και “Wankama”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.



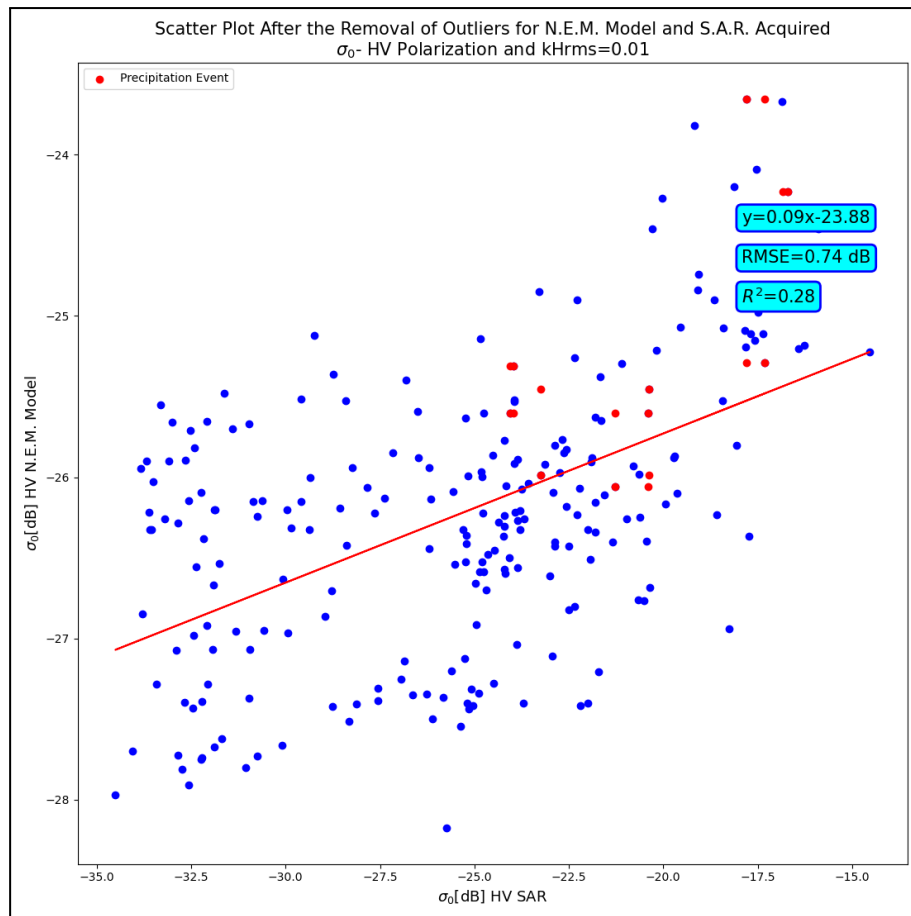
Σχήμα 72. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Tondikiboro” και “Wankama”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.



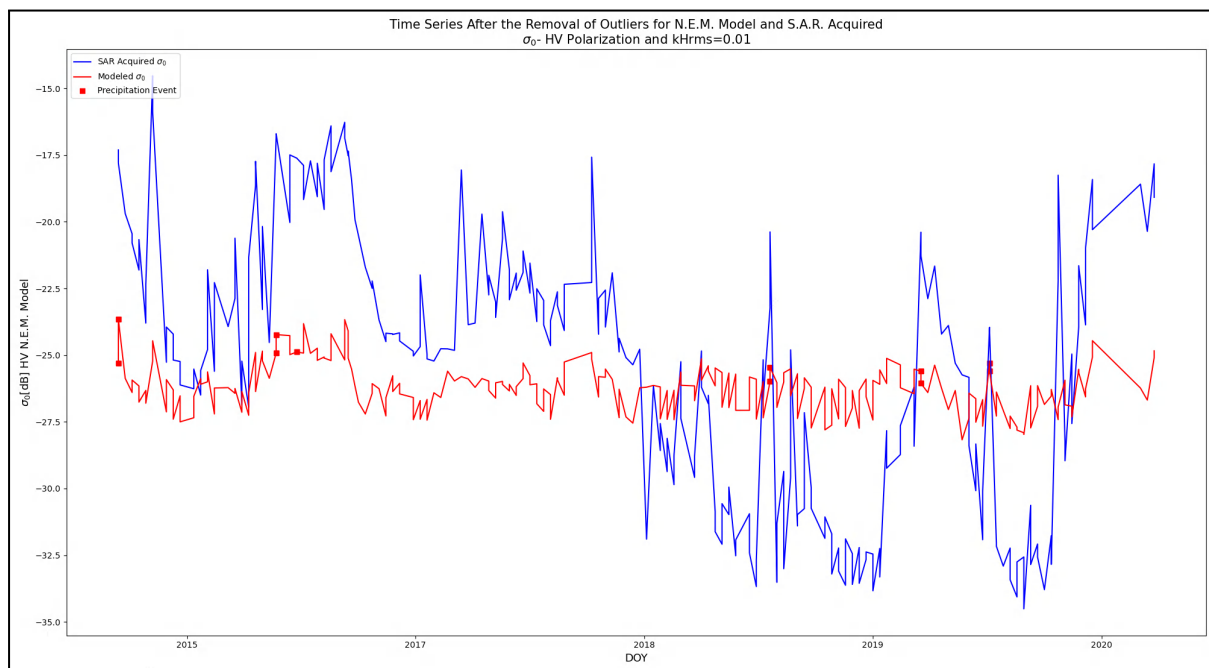
Σχήμα 73. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Tondikiboro” και “Wankama”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.



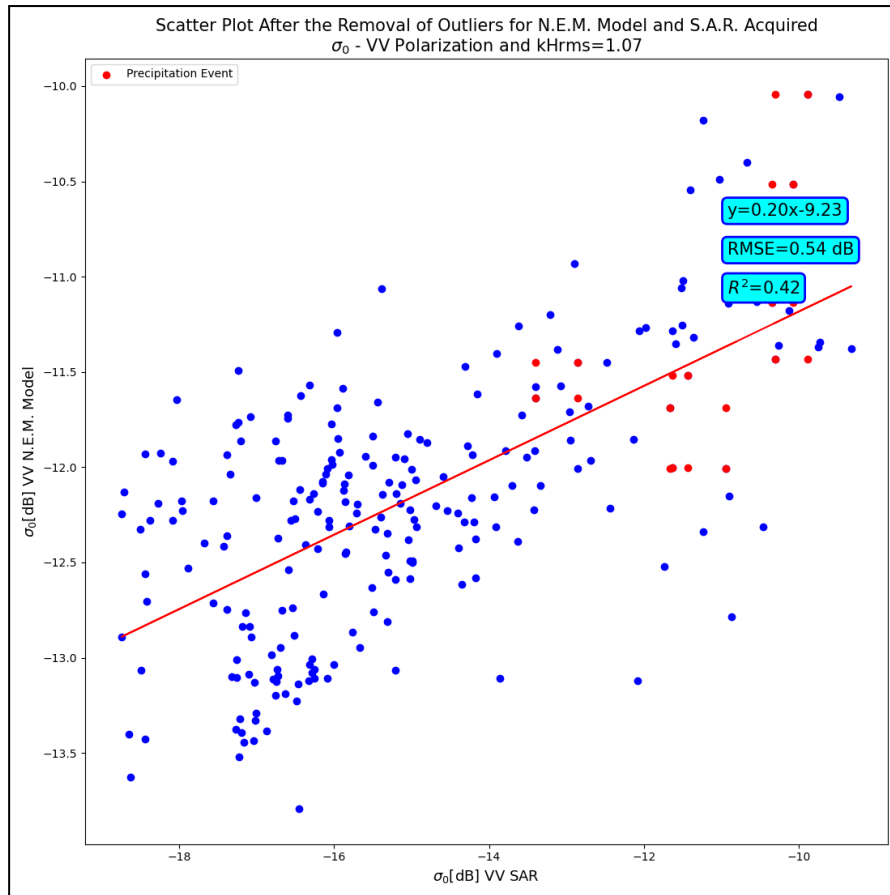
Σχήμα 74. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Tondikiboro” και “Wankama”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.



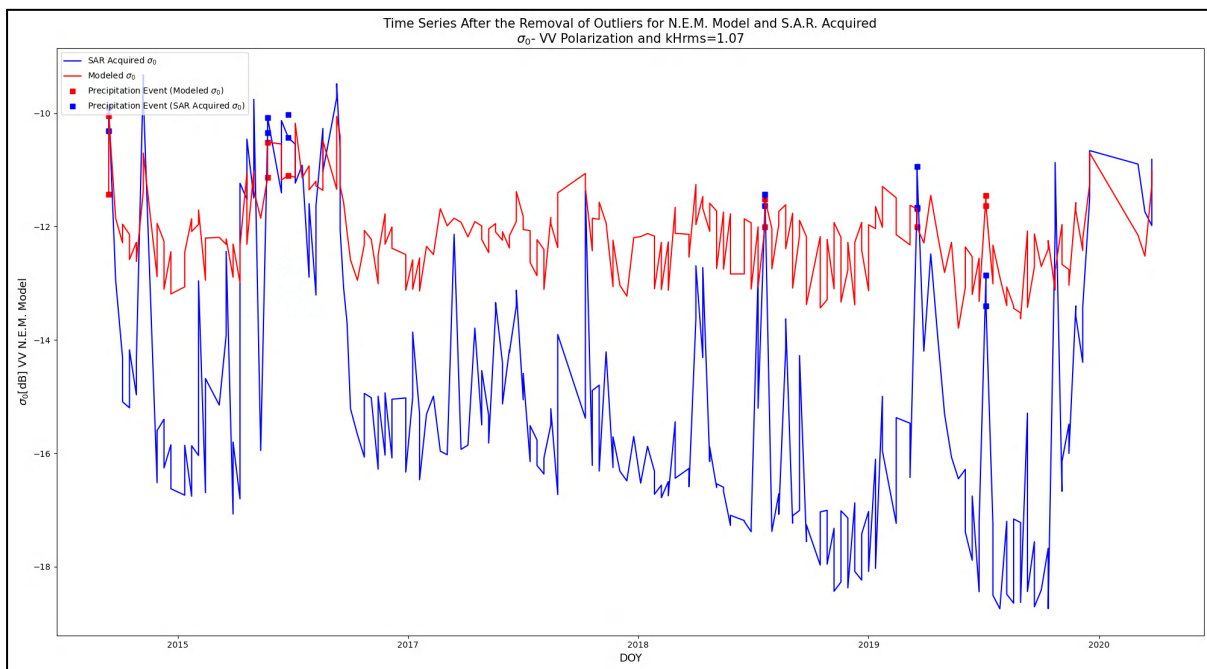
Σχήμα 75. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.



Σχήμα 76. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.



Σχήμα 77. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.



Σχήμα 78. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.

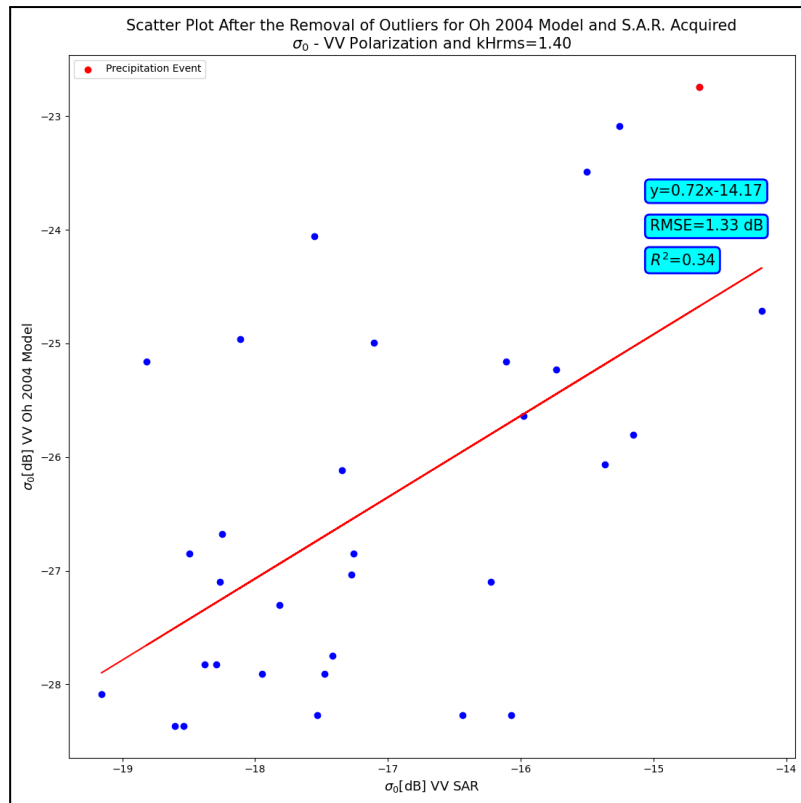
Σταθμός Δικτύου I.S.M.N.	Πόλωση	Έκταση Περιοχής Ενδιαφέροντος	Είδος Πρωτογενών Δεδομένων S.A.R.	R^2	R.M.S.E. [dB]	Συντελεστής α Ευθείας Ε.Τ.	Συντελεστής β Ευθείας Ε.Τ.
Ford Dry Lake	VH	Μέγιστη	Σύνολο S1 GRD Εικόνων	0.10	0.24	0.03	-27.30
	VV	Προσαρμοσμένη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.37	0.22	0.17	-17.65
Jomada	VV	Μέγιστη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.17	0.19	0.06	-12.08
Williams 35 NW	VH	Προσαρμοσμένη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.11	0.78	0.15	-18.34
	VV	Μέγιστη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.25	0.58	0.22	-9.83
Damukiyah	VH	Προσαρμοσμένη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.40	0.19	0.06	-20.55
	VV	Προσαρμοσμένη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.44	0.15	0.06	-12.61
Africa Group	VH	Μέγιστη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.28	0.36	0.11	-19.37
	VV	Προσαρμοσμένη	Σύνολο S1 GRD Εικόνων	0.36	0.28	0.12	-11.99
Australia Group	VH	Μέγιστη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.36	1.03	0.32	-8.03
	VV	Προσαρμοσμένη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.42	2.70	0.98	0.85

Πίνακας 12. Πίνακας στατιστικών και περιγραφικών στοιχείων ανάλυσης/σύγκρισης SAR και μοντελοποιημένων κατά N.E.M. συντελεστών οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. και τις πολώσεις VH και VV.

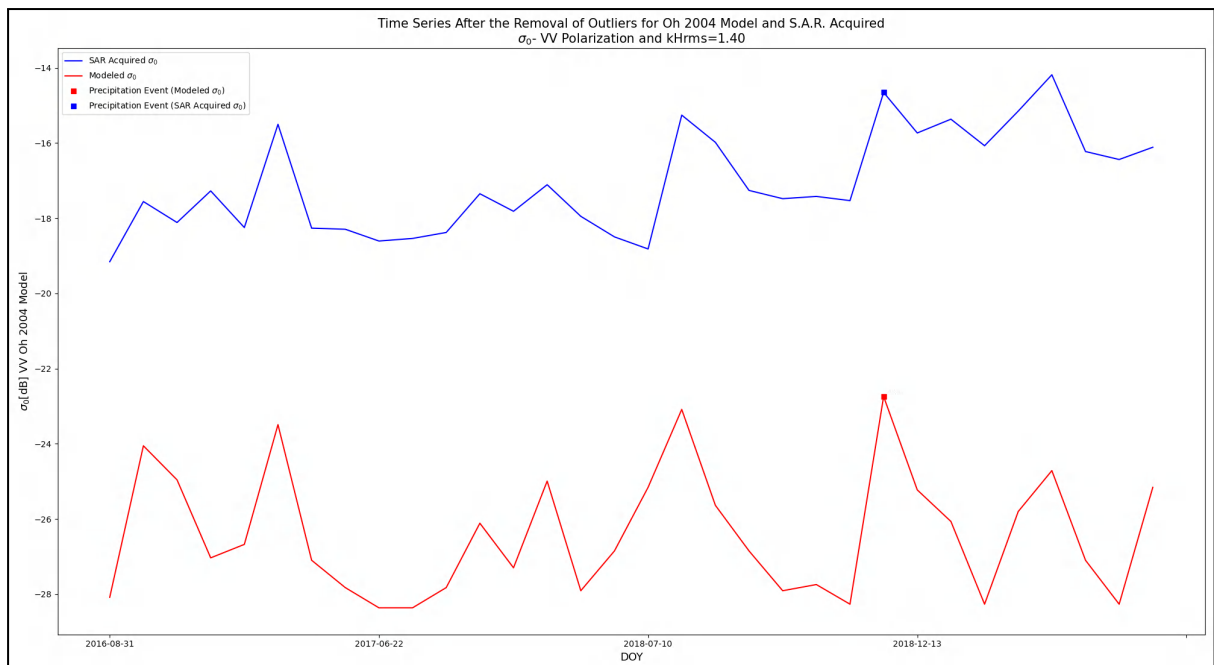
Παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα και έχοντας υπόψη ότι το N.E.M. (New Empirical Model) δημιουργήθηκε σαν βελτίωση του προαναφερθέντος μοντέλου “Dubois”, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι μέσοι όροι SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης τείνουν στο να συγκλίνουν. Βέβαια, κάτι τέτοιο δεν δύναται να επαληθευτεί και για την VV πόλωση όπου παρατηρείται μια θετική διαφορά στο εύρος 3-5 dB των μέσων όρων μοντελοποιημένων και SAR συνόλων συντελεστών οπισθοσκέδασης. Έπειτα, αναφορικά με την ευαισθησία των μοντελοποιημένων τιμών συντελεστών οπισθοσκέδασης στην ανίχνευση των μεταβολών των τιμών SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης, παρατηρείται ακόμα μικρότερη ευαισθησία από αυτή του μοντέλου “Dubois” με αυτές ουσιαστικά να ανιχνεύονται μόνο σε αιχμές των χρονοσειρών SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης. Τέλος, σχετικά με την προσαρμογή συνόλων μοντελοποιημένων και SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης, αυτή φαίνεται να είναι καλύτερη (βάσει του δείκτη R^2) για την VV πόλωση και για τους σταθμούς “Damukiyah” καθώς και τους σταθμούς των οποίων τα σύνολα ομαδοποιήθηκαν στον Νίγηρα και την Αυστραλία. Η συγκεκριμένη διαπίστωση ενδέχεται να σχετίζεται με τα βάθη δειγματοληψίας και διεύθυνσης (τουλάχιστον για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στην Αυστραλία) τα οποία ταυτίζονται περισσότερο στους συγκεκριμένους σταθμούς.

3.5.4. Στατιστική Ανάλυση/Σύγκριση Μοντελοποιημένων κατά Oh Συντελεστών Οπισθοσκέδασης και SAR Συντελεστών Οπισθοσκέδασης

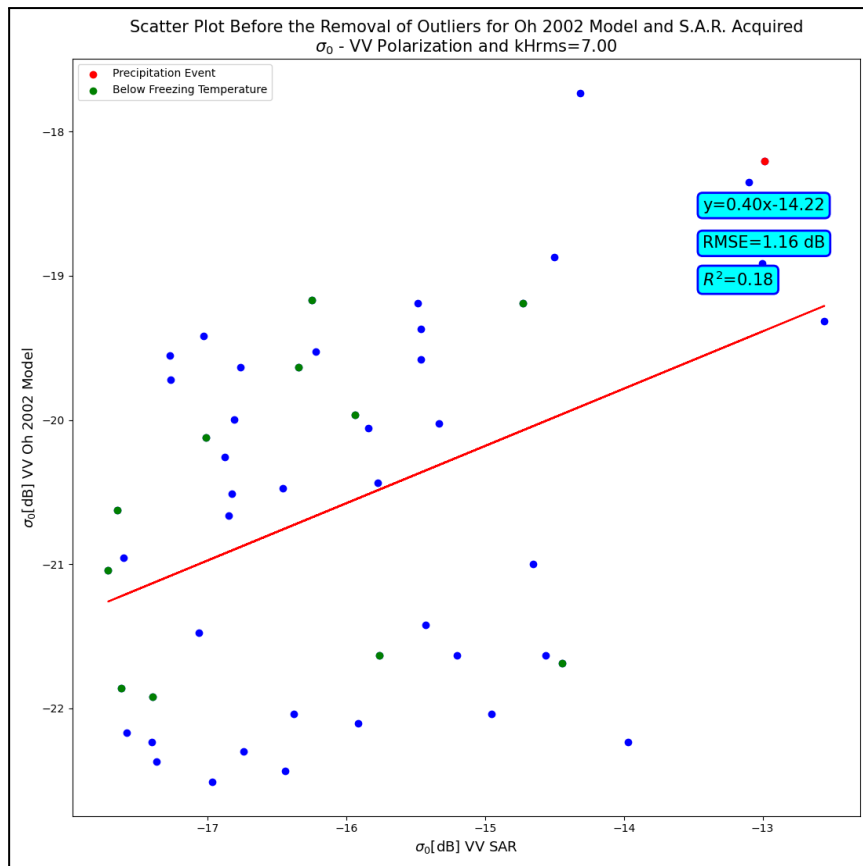
Για την σύγκριση και την στατιστική ανάλυση των συνόλων μοντελοποιημένων κατά Oh και SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης χρησιμοποιήθηκαν ανάλογα με το κατώφλι του δείκτη R^2 που ετέθη μια από τις 2 εκδόσεις για την VV πόλωση (είτε για την έκδοση που αναπτύχθηκε το 2002 είτε αυτή που αναπτύχθηκε το 2004 και από την οποία αφαιρέθηκε το μήκος συσχέτισης). Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα διασποράς και οι χρονοσειρές των μοντελοποιημένων και SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης.



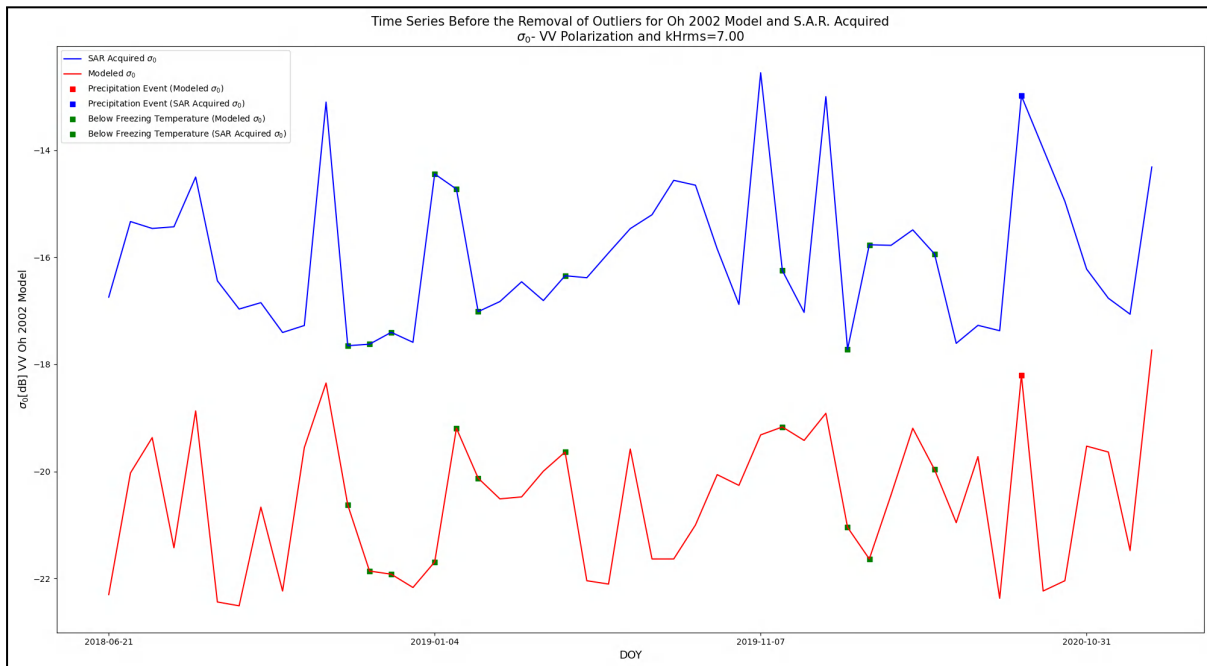
Σχήμα 79. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης έτους 2004 και πόλωσης VV.



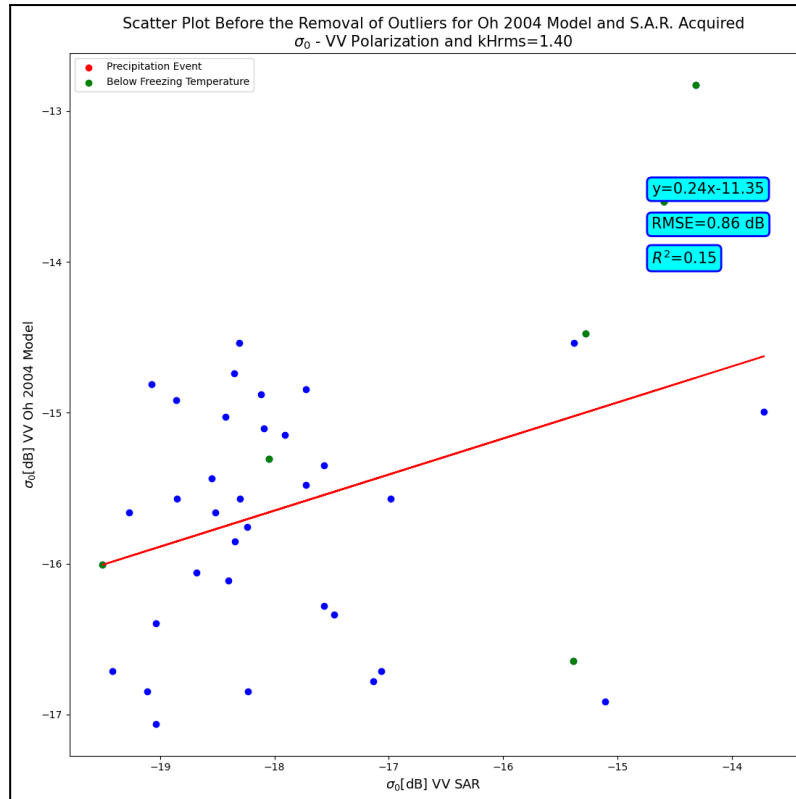
Σχήμα 80. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης έτους 2004 και πόλωσης VV.



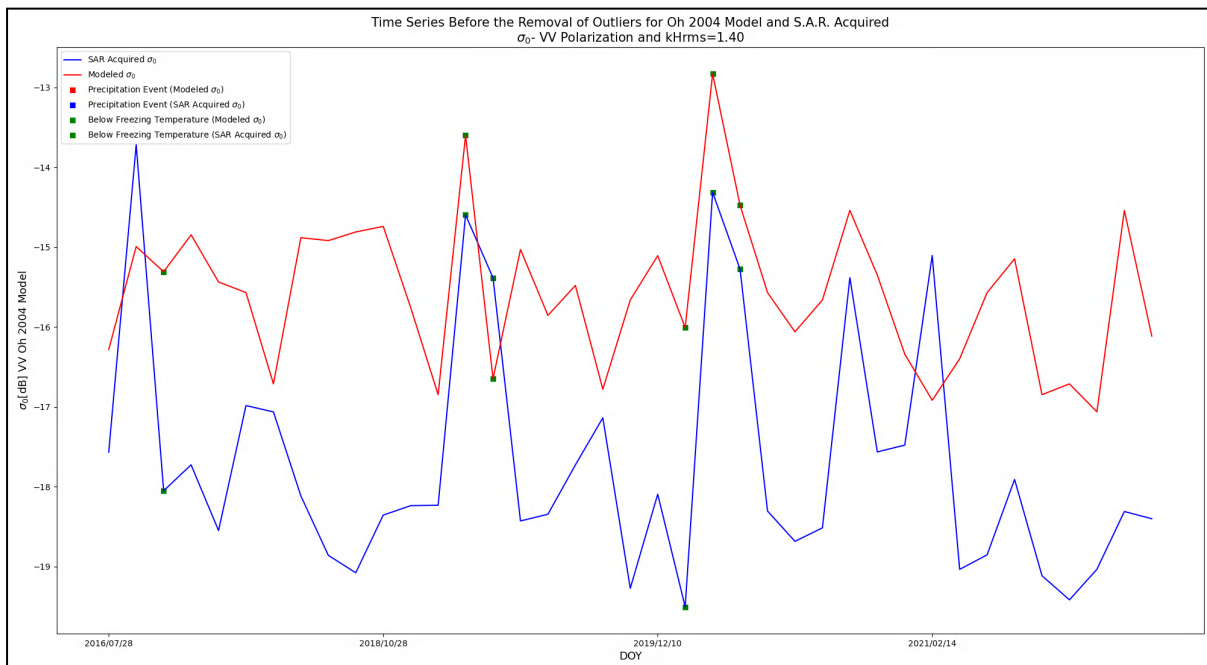
Σχήμα 81. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Sevilleta”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης έτους 2002 και πόλωσης VV.



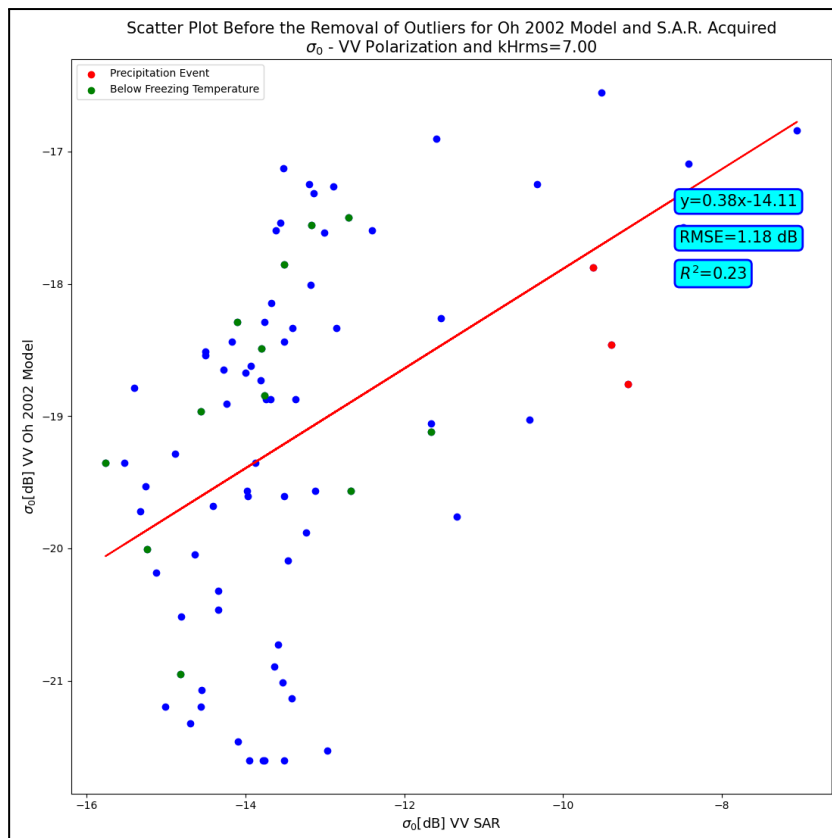
Σχήμα 82. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Sevilleta”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης έτους 2002 και πόλωσης VV.



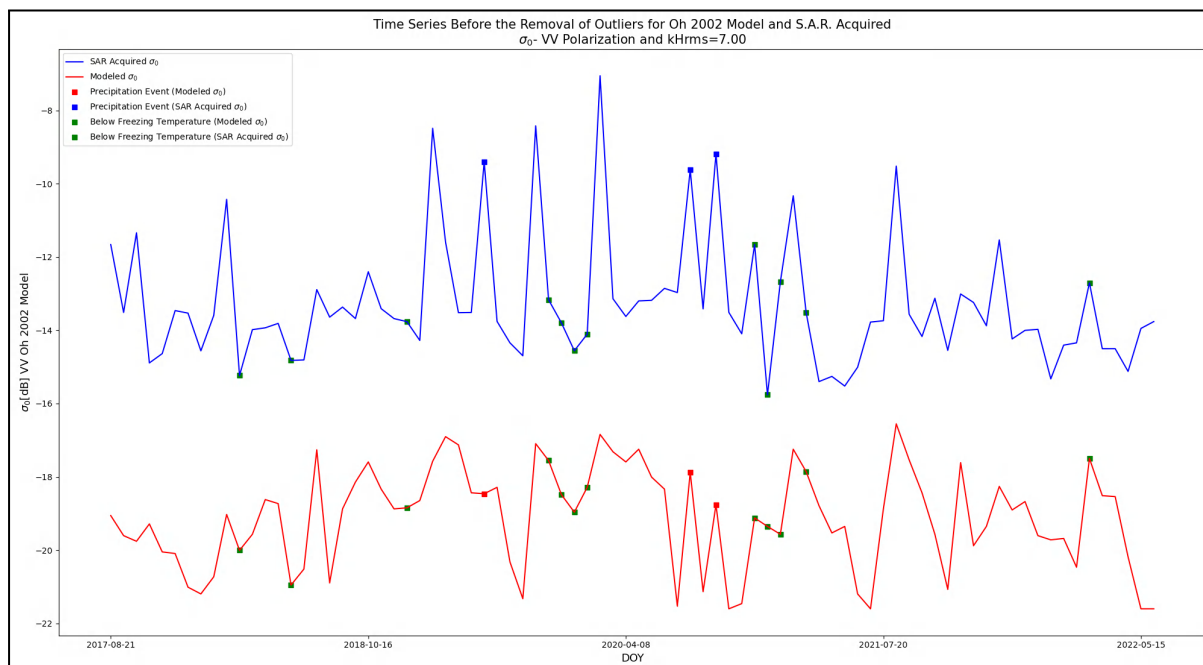
Σχήμα 83. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Sprooky”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης έτους 2004 και πόλωσης VV.



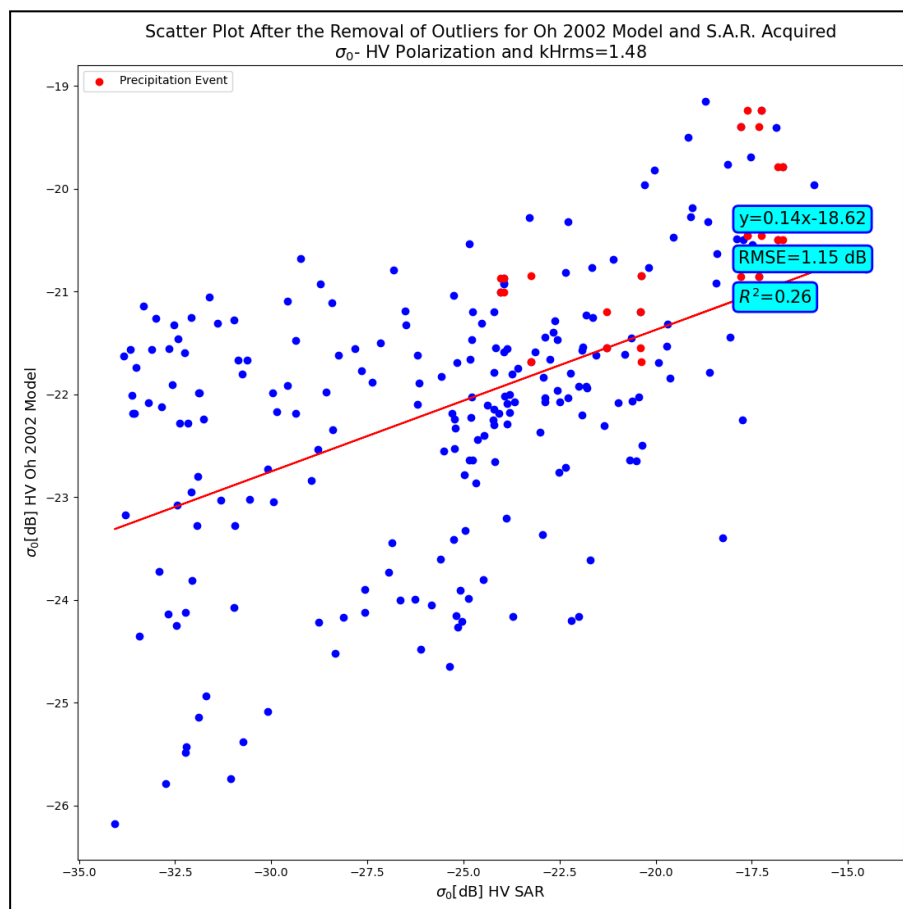
Σχήμα 84. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Sprooky”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης έτους 2004 και πόλωσης VV.



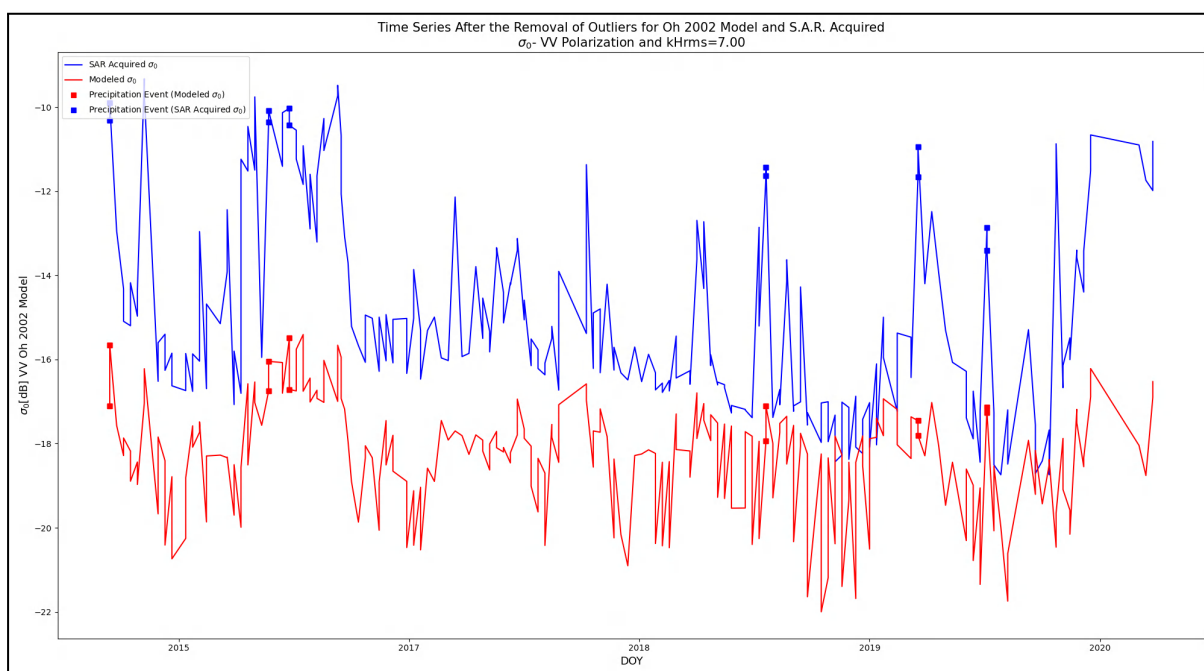
Σχήμα 85. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης έτους 2004 και πόλωσης VV.



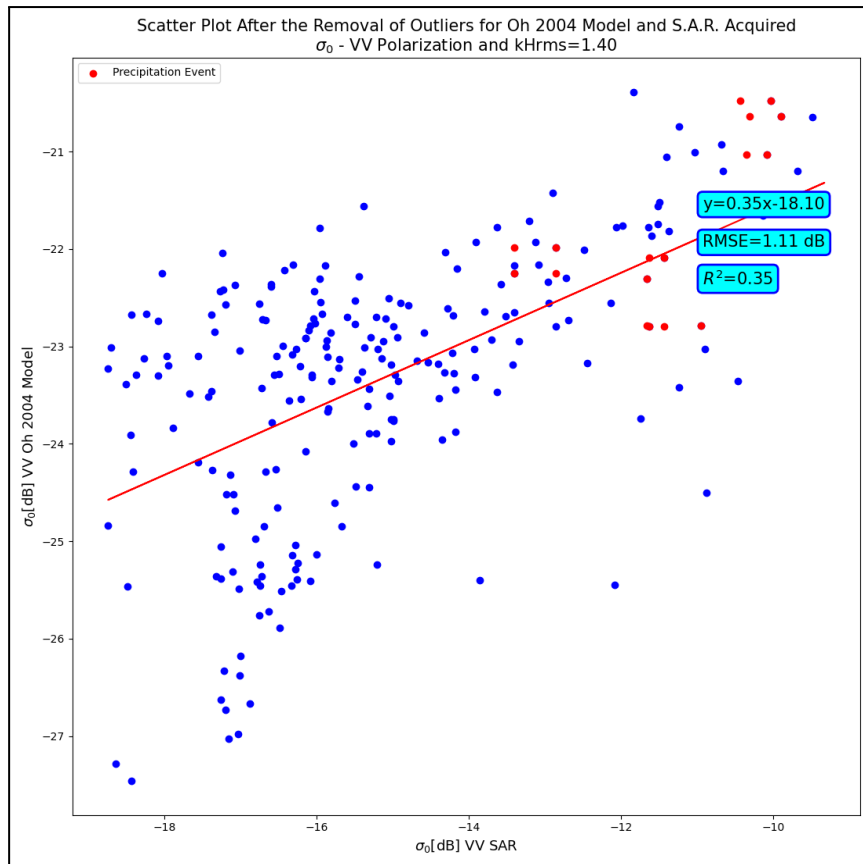
Σχήμα 86. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης έτους 2004 και πόλωσης VV.



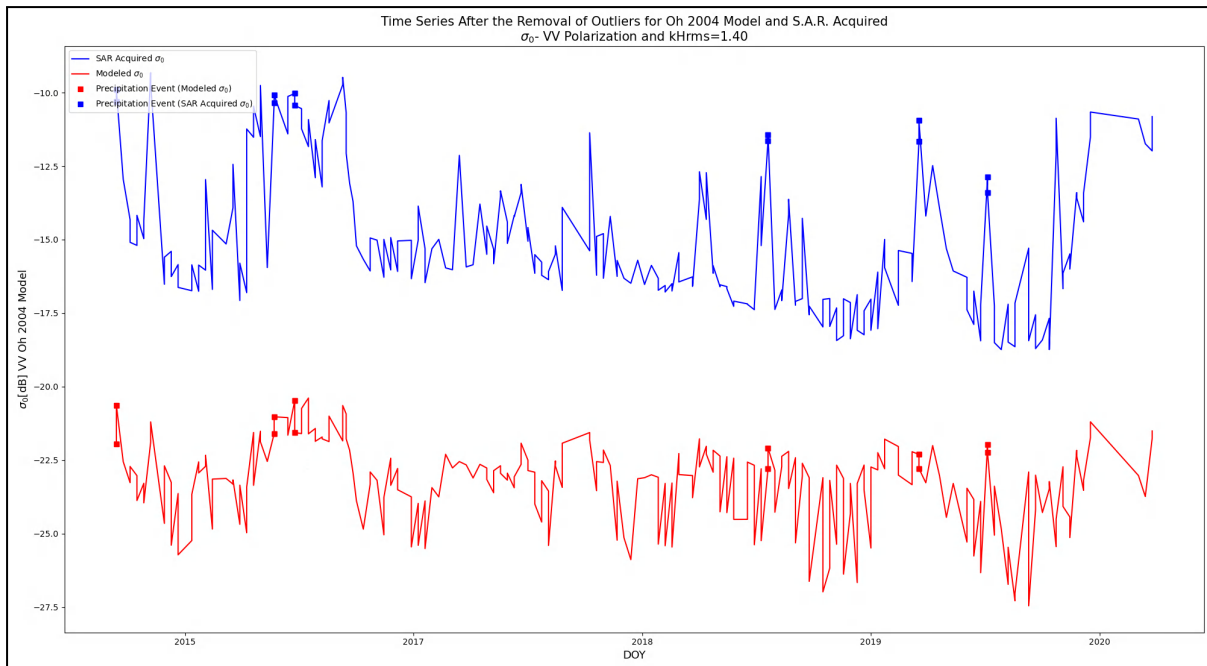
Σχήμα 87. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “Oh” και την πόλωση VH.



Σχήμα 88. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “Oh” και την πόλωση VH.



Σχήμα 89. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης 2004 και πόλωσης VV.



Σχήμα 90. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης 2004 και πόλωσης VV.

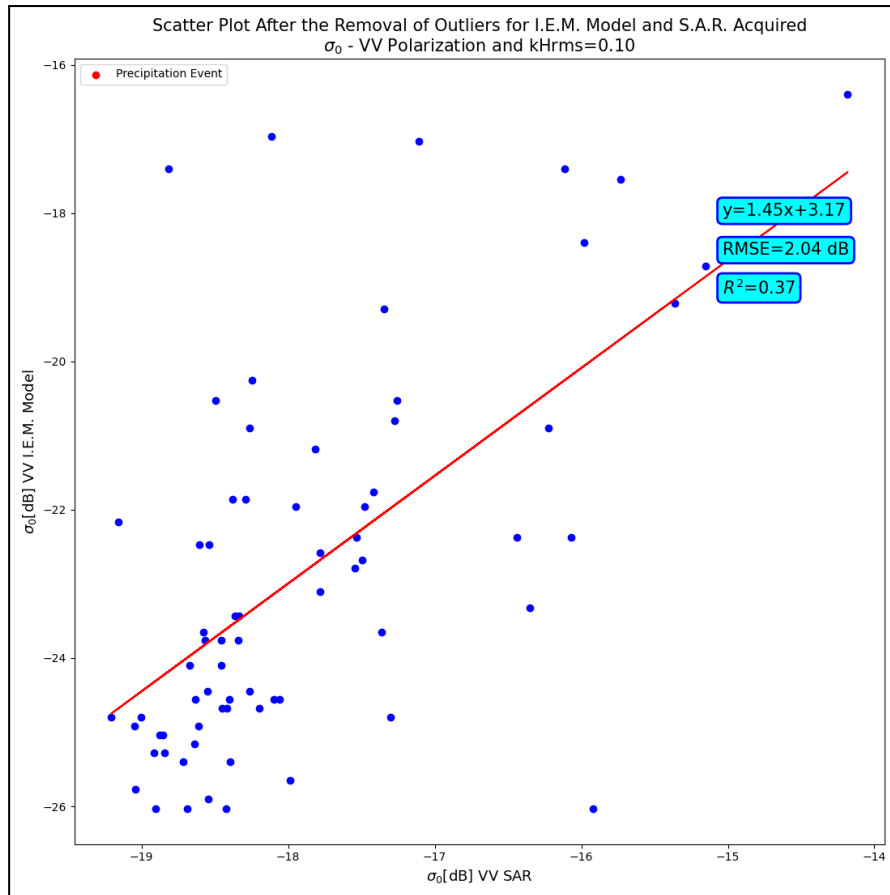
Σταθμός Δικτύου I.S.M.N.	Πόλωση - Έκδοση	Έκταση Περιοχής Ενδιαφέροντος	Είδος Πρωτογενών Δεδομένων S.A.R.	R^2	R.M.S.E. [dB]	Συντελεστής α Ευθείας Ε.Τ.	Συντελεστής β Ευθείας Ε.Τ.
Ford Dry Lake	VV - 2004	Προσαρμοσμένη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.34	1.32	0.72	-14.06
Sevilleta	VV - 2002	Μέγιστη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.18	1.16	0.40	-14.22
Spooky	VV - 2004	Μέγιστη	Σύνολο S1 GRD Εικόνων	0.15	0.86	0.24	-11.35
Williams 35 NW	VV - 2002	Μέγιστη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.23	1.18	0.38	-11.64
Australia Group	VH	Προσαρμοσμένη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.26	1.15	0.14	-18.26
	VV - 2004	Μέγιστη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.36	1.03	0.32	-8.03

Πίνακας 13. Πίνακας στατιστικών και περιγραφικών στοιχείων ανάλυσης/σύγκρισης SAR και μοντελοποιημένων κατά Oh συντελεστών οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. και τις πόλωσεις VH και VV.

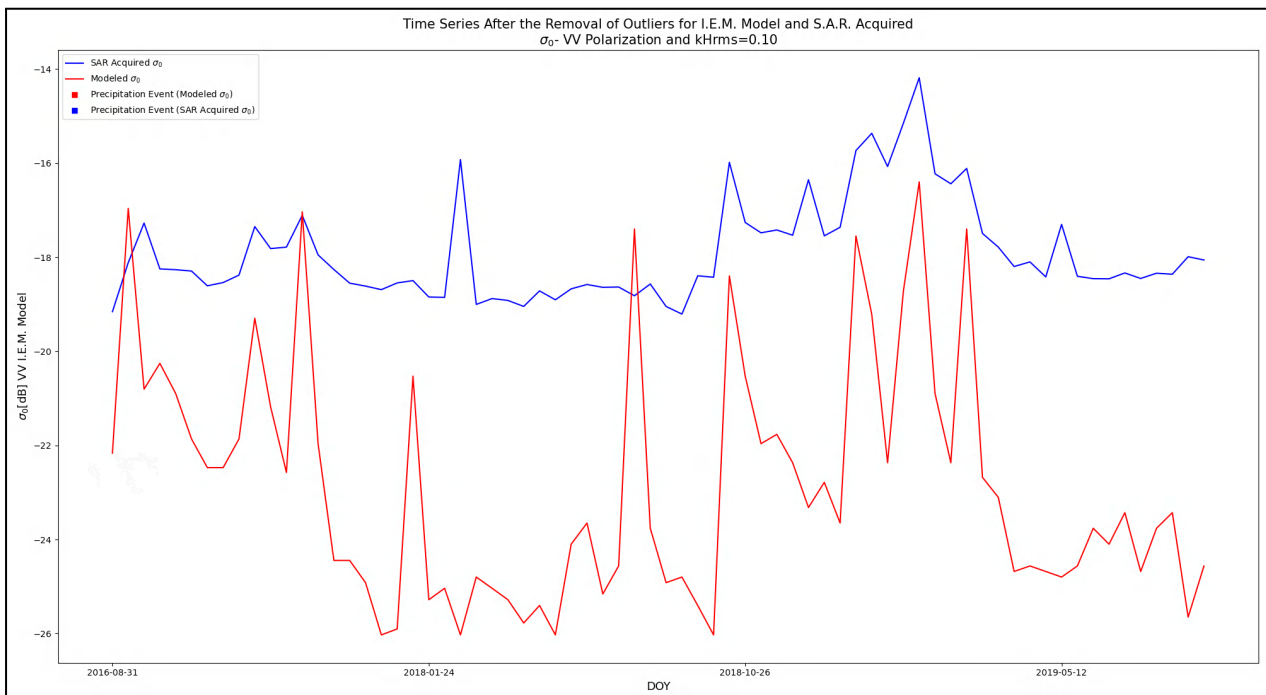
Αρχικά, σημειώνεται ότι το μοντέλο (συμπεριλαμβάνει όλες τις εκδόσεις) Oh δεν βρίσκει εφαρμογή σε αρκετούς σταθμούς στους οποίους παρατηρείται χαμηλή συχνότητα βροχοπτώσεων και επομένως και χαμηλές τιμές ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας. Αναφορικά με την διαφορά μέσω των SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης, αυτή κυμαίνεται στο εύρος 3-7 dB για την VV πόλωση (τα καλύτερα αποτελέσματα σε αυτό το πλαίσιο παρατηρούνται στον σταθμό Spooky, αλλά το μικρό πλήθος τιμών των συνόλων μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης καθιστά τα συγκεκριμένα αποτελέσματα ως αναξιόπιστα) και 3-5 dB για την VH πόλωση. Έπειτα, η ευαισθησία των τιμών μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης στην ανίχνευση των μεταβολών στις τιμές των SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης βάσει των παραπάνω χρονοσειρών φαίνεται να είναι καλύτερη σε σχέση με τα εμπειρικά μοντέλα οπισθοσκέδασης που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Αντίστοιχα, η προσαρμογή των συνόλων μοντελοποιημένων και SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης αποτυπώνεται καλύτερα στους σταθμούς των οποίων τα σύνολα συντελεστών οπισθοσκέδασης ομαδοποιήθηκαν στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στην Αυστραλία, λόγω του μεγαλύτερου πλήθους διαθέσιμων μετρήσεων ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας που ξεπερνούν τα κατώφλια του 3% και 4% που ετέθησαν από τον συγγραφέα του μοντέλου.

3.5.5. Στατιστική Ανάλυση/Σύγκριση Μοντελοποιημένων κατά I.E.M. Συντελεστών Οπισθοσκέδασης και SAR Συντελεστών Οπισθοσκέδασης

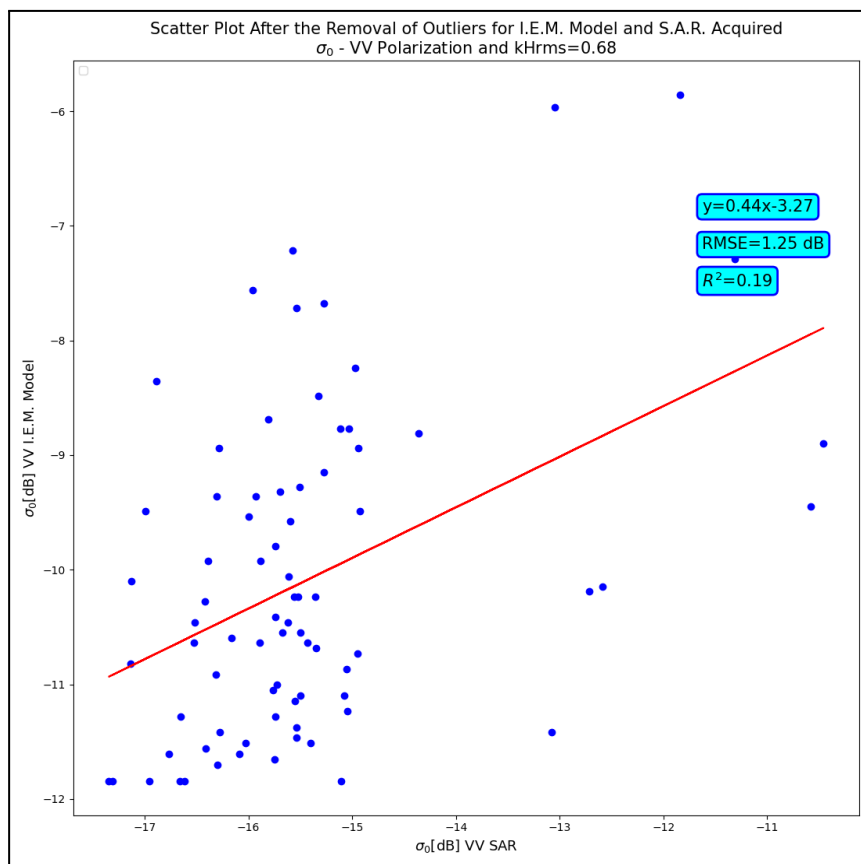
Η στατιστική ανάλυση/σύγκριση των συνόλων δεδομένων μοντελοποιημένων κατά I.E.M. (Integral Equation Model) και SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης έγινε μόνο για την πόλωση VV καθώς για την πόλωση VH απαιτείται η γνώση της κατανομής των υψομέτρων της περιοχής ενδιαφέροντος (προσδιορίζεται είτε με επίγεια όργανα είτε με laser scanning) για τον υπολογισμό των όρων εφαπτομενικών πεδίων και αφετέρου και του συντελεστή οπισθοσκέδασης. Επιπλέον, εφόσον όπως αναλύθηκε στην ενότητα του θεωρητικού υποβάθρου, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης παραπάνω από μίας σχέσεων για τον υπολογισμό του μήκους συσχέτισης, έγινε η επιλογή εφαρμογής του μοντέλου οπισθοσκέδασης με μήκος συσχέτισης το οποίο δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα από άποψης των συνοδευόντων στατιστικών δεικτών. Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα διασποράς και οι χρονοσειρές για την στατιστική ανάλυση/σύγκριση των συνόλων δεδομένων μοντελοποιημένων και SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης.



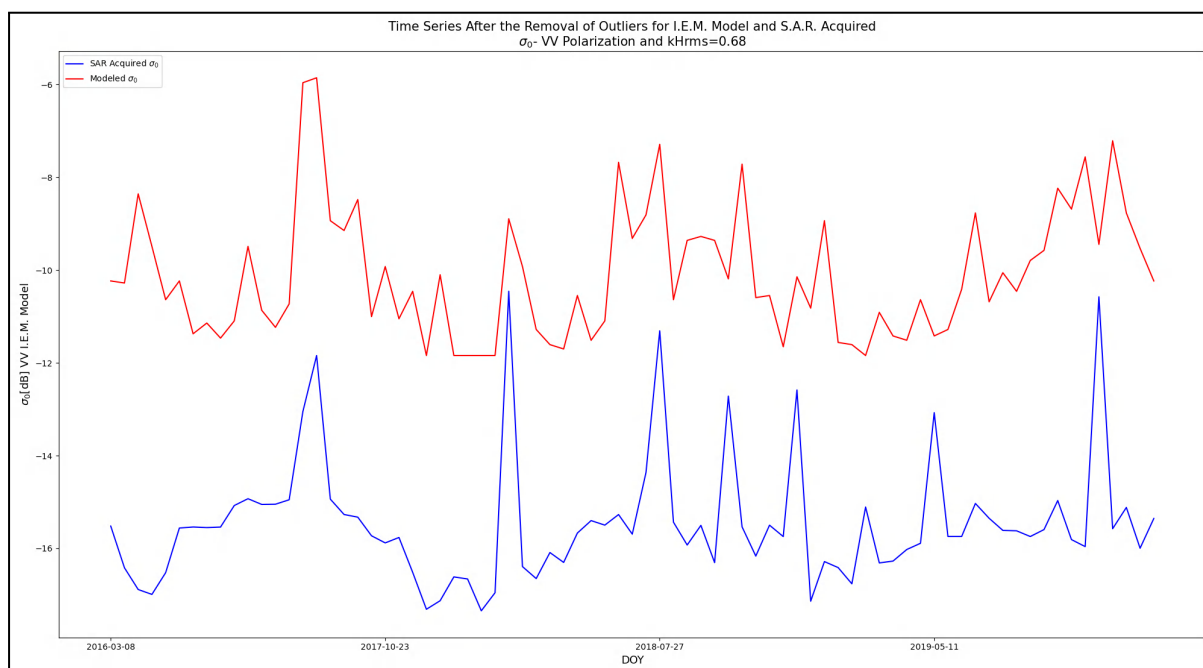
Σχήμα 91. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “I.E.M.” γκαουσιανής συνάρτησης συσχέτισης (Brogioni et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.



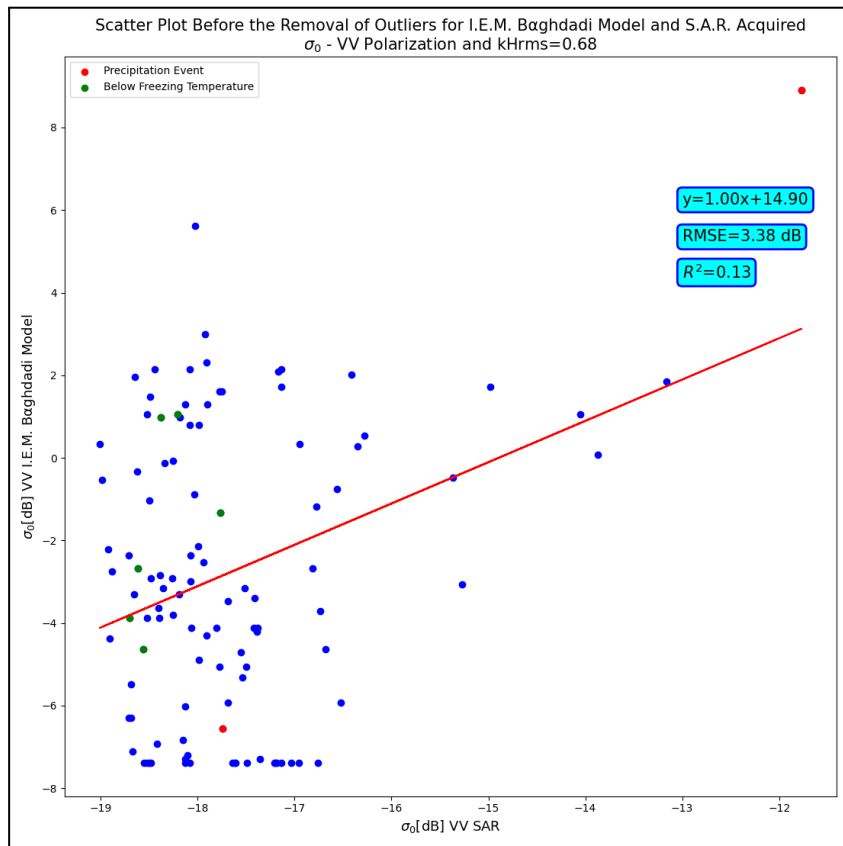
Σχήμα 92. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “I.E.M.” γκαουσιανής συνάρτησης συσχέτισης (Brogioli et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.



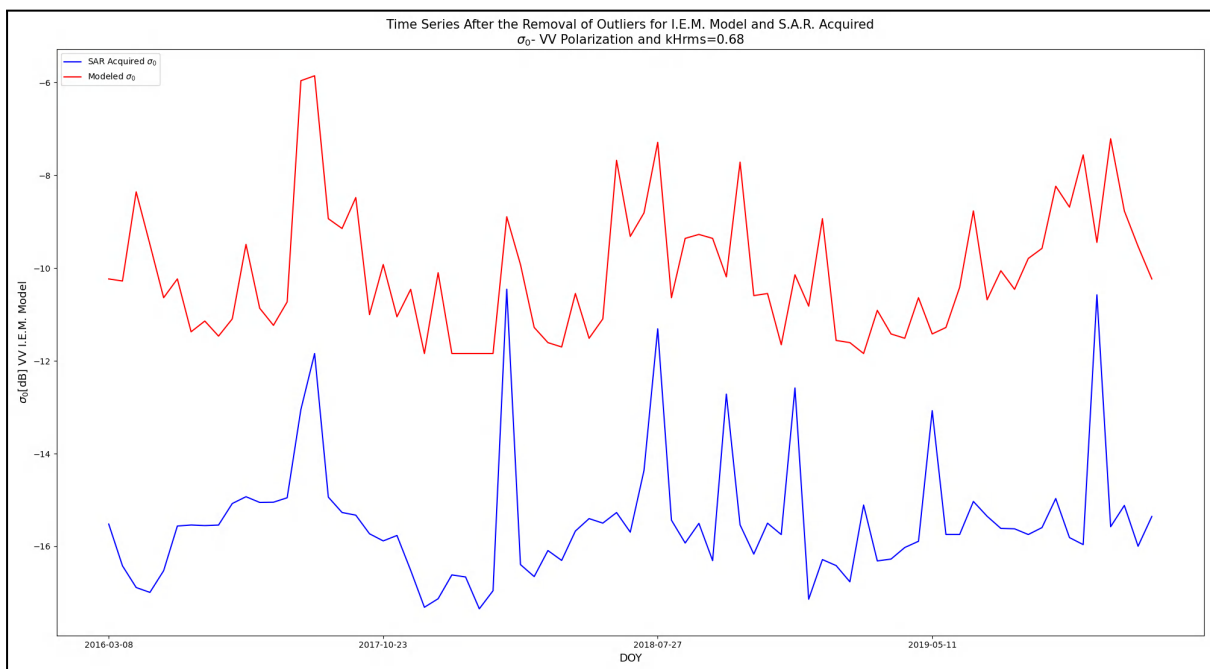
Σχήμα 93. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Jornada”, το μοντέλο “I.E.M.” εκθετικής συνάρτησης συσχέτισης (Fung 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.



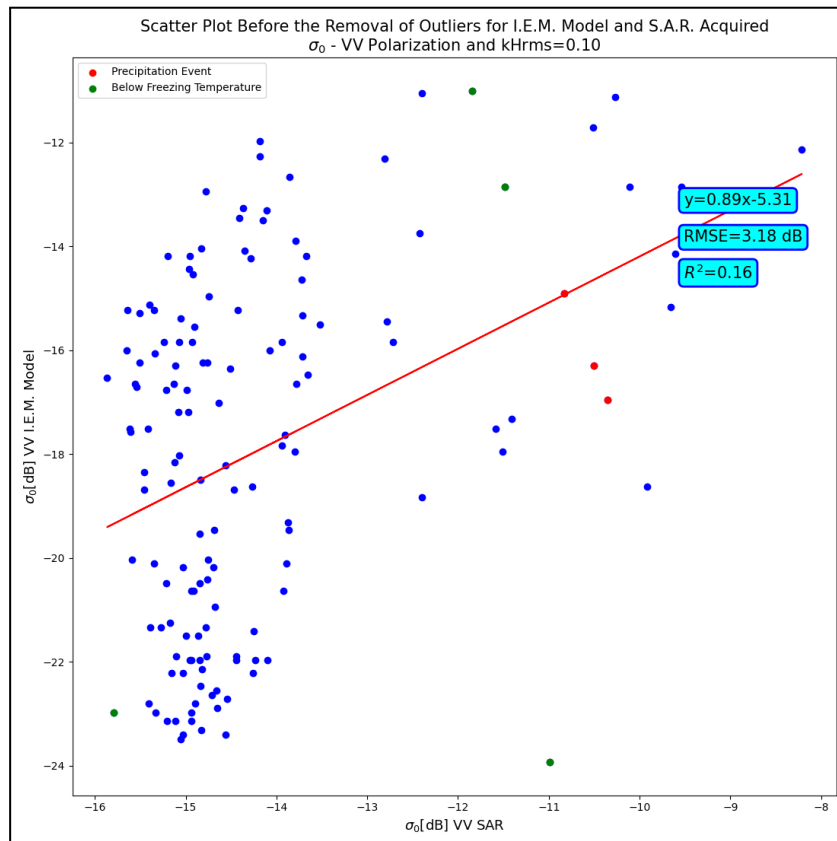
Σχήμα 94. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Jornada”, το μοντέλο “I.E.M.” εκθετικής συνάρτησης συσχέτισης (Fung et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.



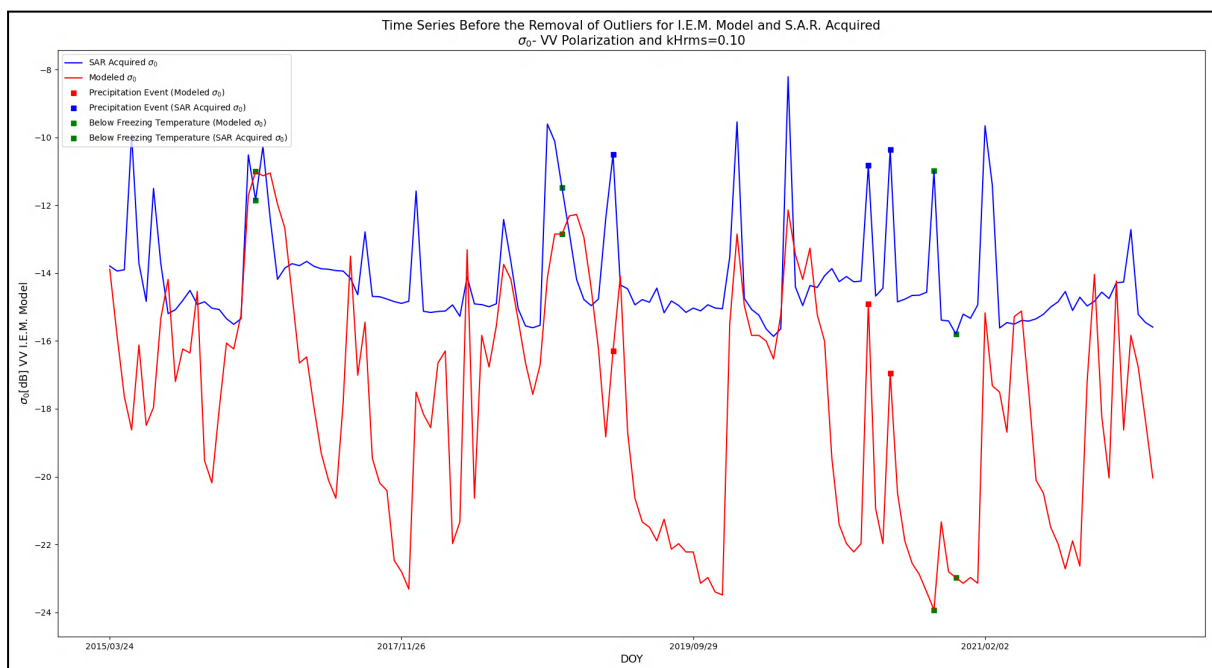
Σχήμα 95. Διάγραμμα Διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Sevilleta”, το μοντέλο “I.E.M.” εκθετικής συνάρτησης συσχέτισης (Fung et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.



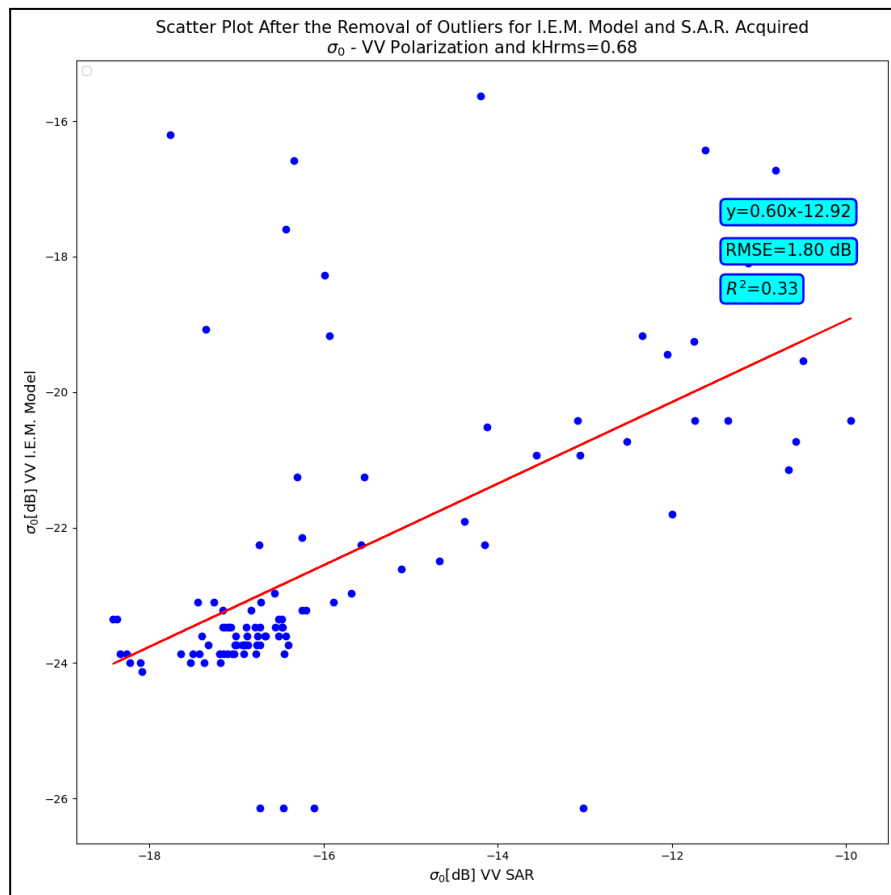
Σχήμα 96. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Sevilleta”, το μοντέλο “I.E.M.” εκθετικής συνάρτησης συσχέτισης (Fung et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.



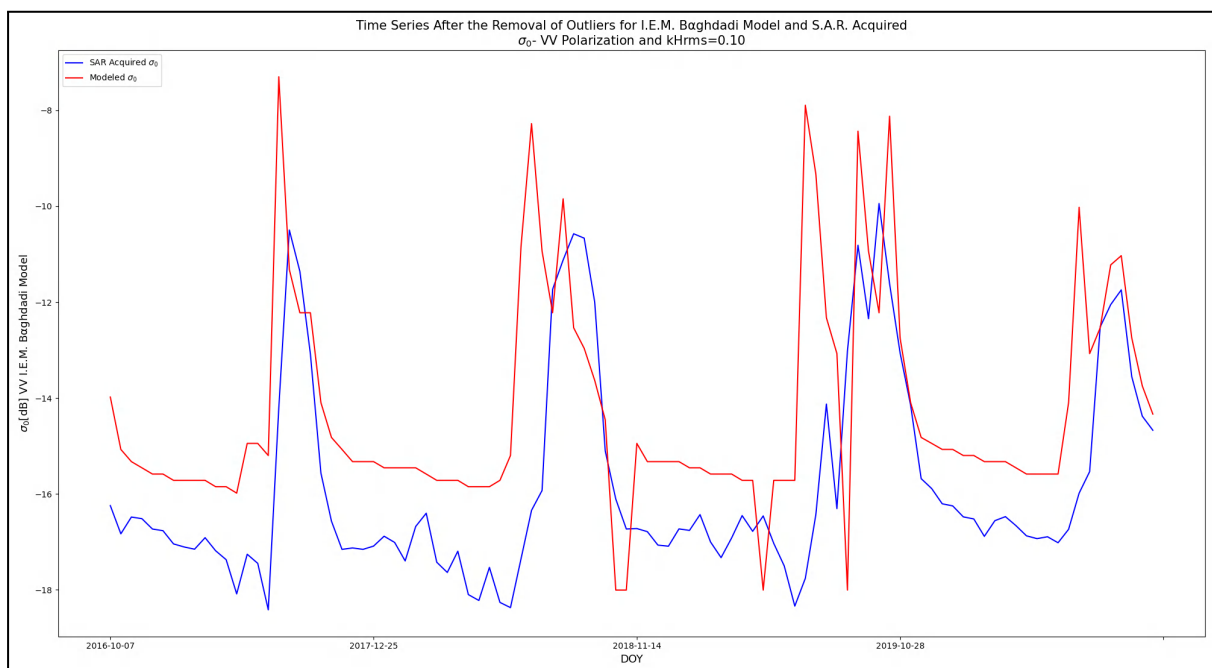
Σχήμα 97. Διάγραμμα Διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “I.E.M.” γκαουσιανής συνάρτησης συσχέτισης (Brogioni et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.



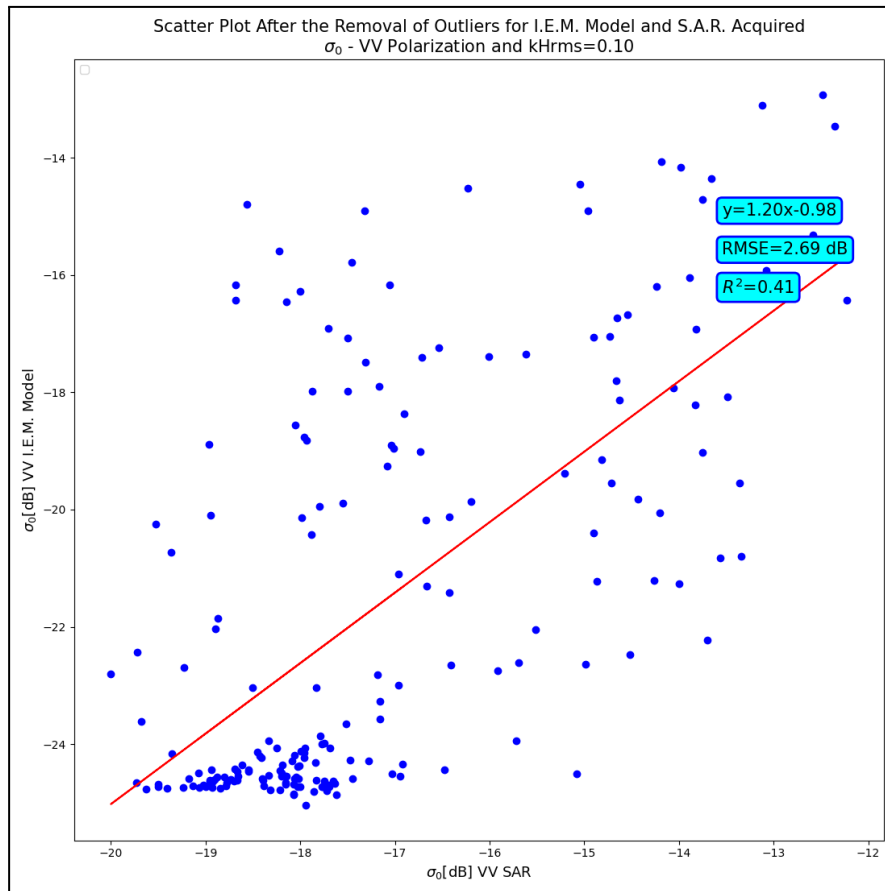
Σχήμα 98. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “I.E.M.” γκαουσιανής συνάρτησης συσχέτισης (Brogiioni et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.



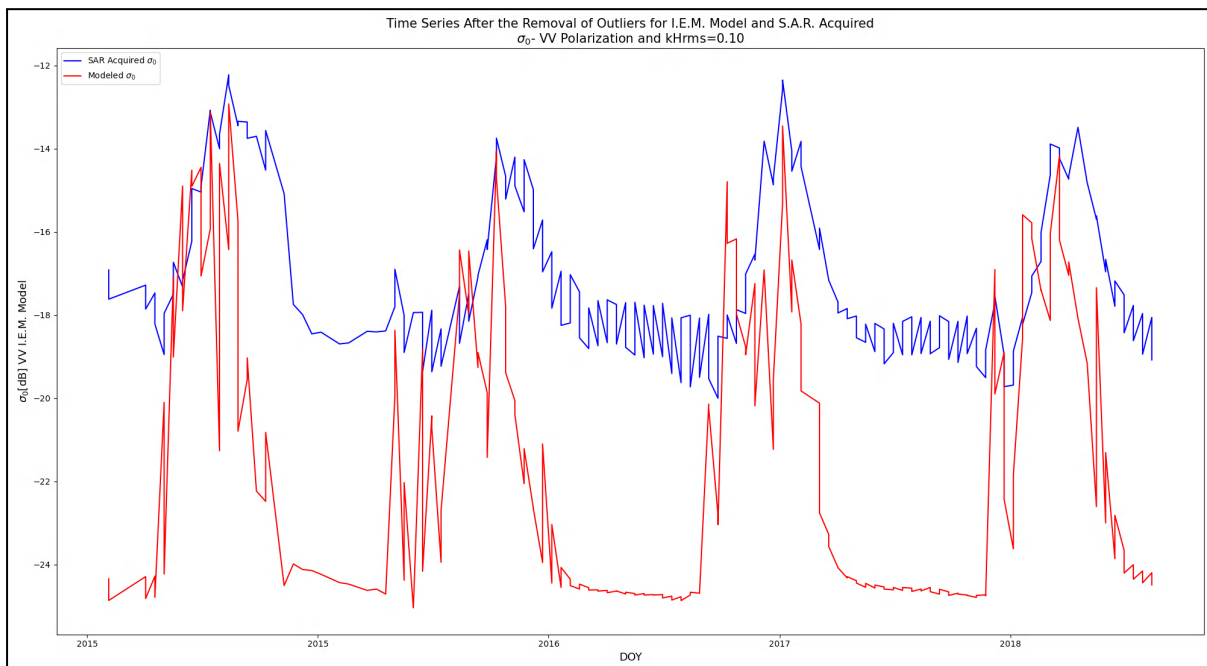
Σχήμα 99. Διάγραμμα Διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Damukiyah”, το μοντέλο “I.E.M.” εκθετικής συνάρτησης συσχέτισης (Fung 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.



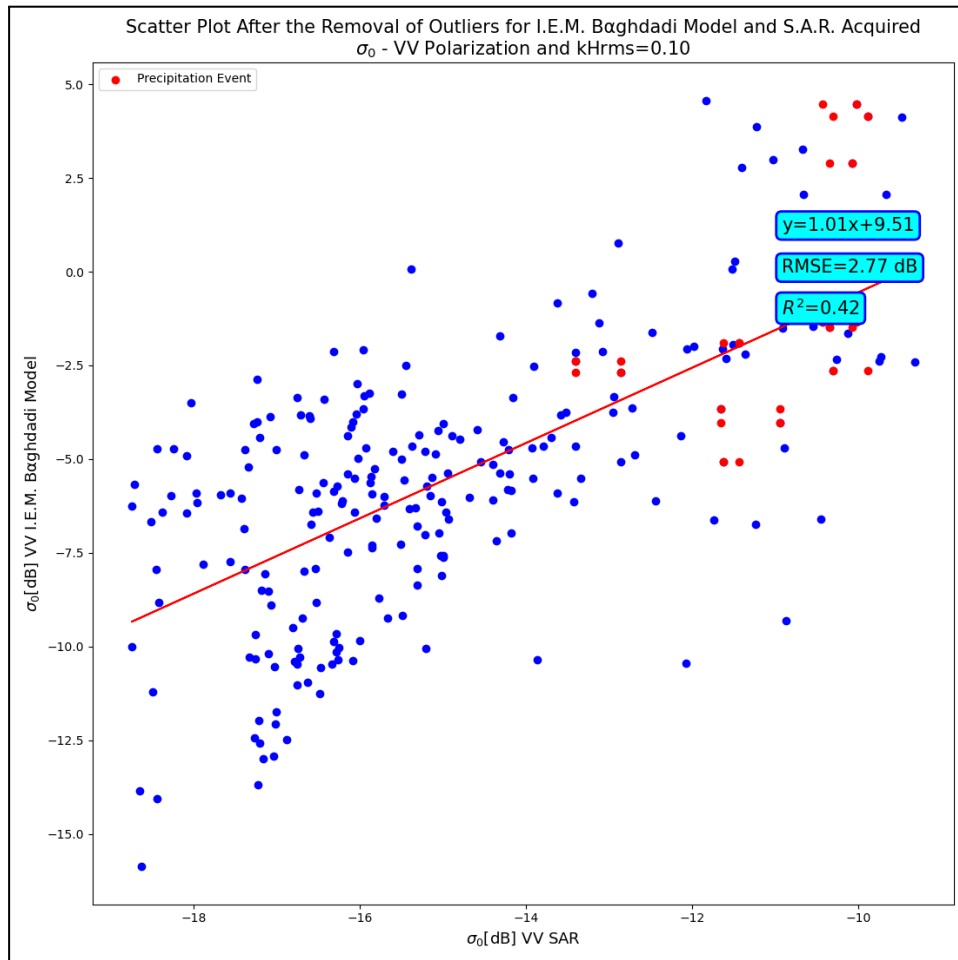
Σχήμα 100. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Damukiyah”, το μοντέλο “I.E.M.” εκθετικής συνάρτησης συσχέτισης (Fung et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.



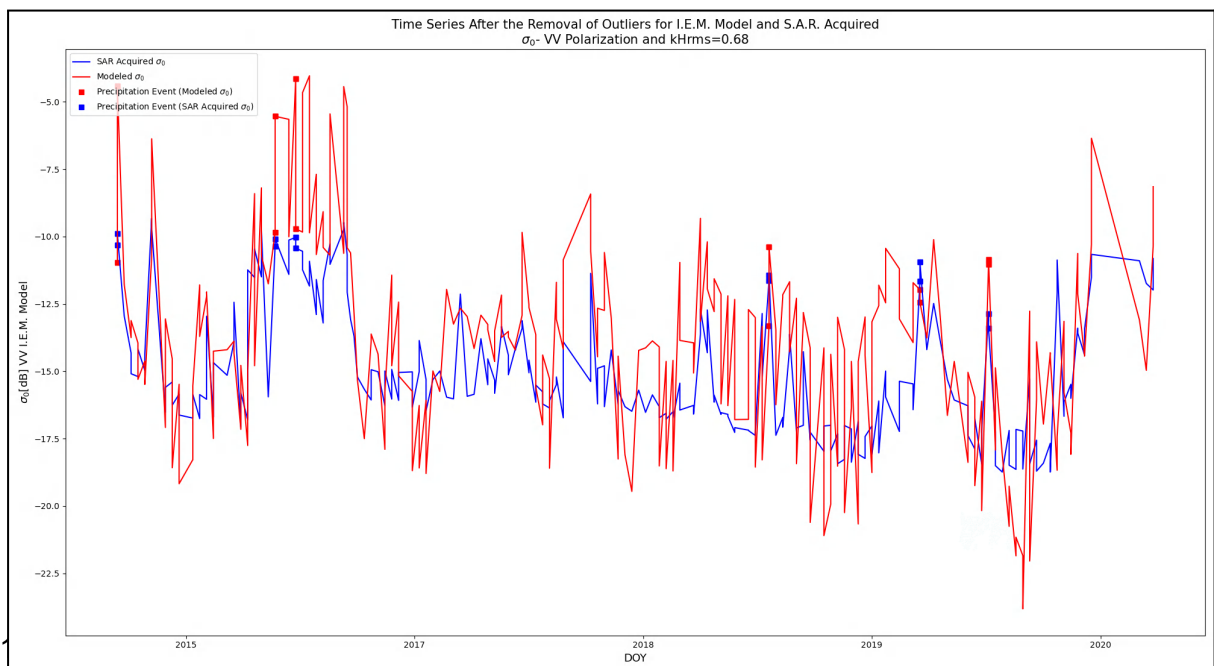
Σχήμα 101. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Tondikiboro” και “Wankama”, το μοντέλο “I.E.M.” γκαουσιανής συνάρτησης συσχέτισης (Brogioni et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.



Σχήμα 102. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Tondikiboro” και “Wankama”, το μοντέλο “I.E.M.” γκαουσιανής συνάρτησης συσχέτισης (Brogioni et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.



Σχήμα 103. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “I.E.M.” γκαουσιανής συνάρτησης συσχέτισης (Fung 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.



Σχήμα 104. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “I.E.M.” γκαουσιανής συνάρτησης συσχέτισης (Fung 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.

Σταθμός Δικτύου I.S.M.N.	Έκταση Περιοχής Ενδιαφέροντος	Είδος Πρωτογενών Δεδομένων S.A.R.	R^2	R.M.S.E. [dB]	Συντελεστής α Ευθείας Ε.Τ.	Συντελεστής β Ευθείας Ε.Τ.
Ford Dry Lake	Προαρμοσμένη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.39	2.00	1.48	3.59
Jornada	Μέγιστη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.19	1.25	0.44	-3.27
Sevilleta	Μέγιστη	Σύνολο S1 GRD Εικόνων	0.12	2.69	0.77	10.98
Williams 35 NW	Προαρμοσμένη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.22	3.03	1.03	-5.31
Damukiyah	Προσαρμοσμένη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.33	1.80	0.60	-12.92
Africa Group	Προσαρμοσμένη	Σύνολο S1 GRD Εικόνων	0.41	2.69	1.20	-0.98
Australia Group	Προσαρμοσμένη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών	0.42	2.70	0.98	0.85

Πίνακας 14. Πίνακας στατιστικών και περιγραφικών στοιχείων ανάλυσης/σύγκρισης SAR και μοντελοποιημένων κατά I.E.M. συντελεστών οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. και την πόλωση VV.

Συγκρίνοντας τις τιμές του δείκτη R^2 για τα σύνολα μοντελοποιημένων κατά το I.E.M. (Integral Equation Model) και SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης παρατηρείται ότι αυτός για το μοντέλο I.E.M. παίρνει τις μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα μοντέλα οπισθοσκέδασης και για όλους τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. πλην του σταθμού “Damukiyah”. Επομένως, τα σύνολα μοντελοποιημένων κατά το I.E.M. συντελεστών οπισθοσκέδασης προσαρμόζονται καλύτερα στα σύνολα SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης με την προσαρμογή αυτή να γίνεται καλύτερη στους ομαδοποιημένους σταθμούς στην Αυστραλία όπου οι λαμβανόμενες τιμές του βάθους διείδυσης του SAR σήματος συμπίπτουν αρκετά με αυτές του βάθους δειγματοληψίας. Παράλληλα, όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης R^2 τόσο μεγαλύτερη είναι και η ευαισθησία ανίχνευσης μεταβολών των μοντελοποιημένων τιμών συντελεστών οπισθοσκέδασης στις τιμές των SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης και τόσο μικρότερη είναι η απόκλιση μεταξύ των μέσων όρων των τιμών μοντελοποιημένων και SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης.

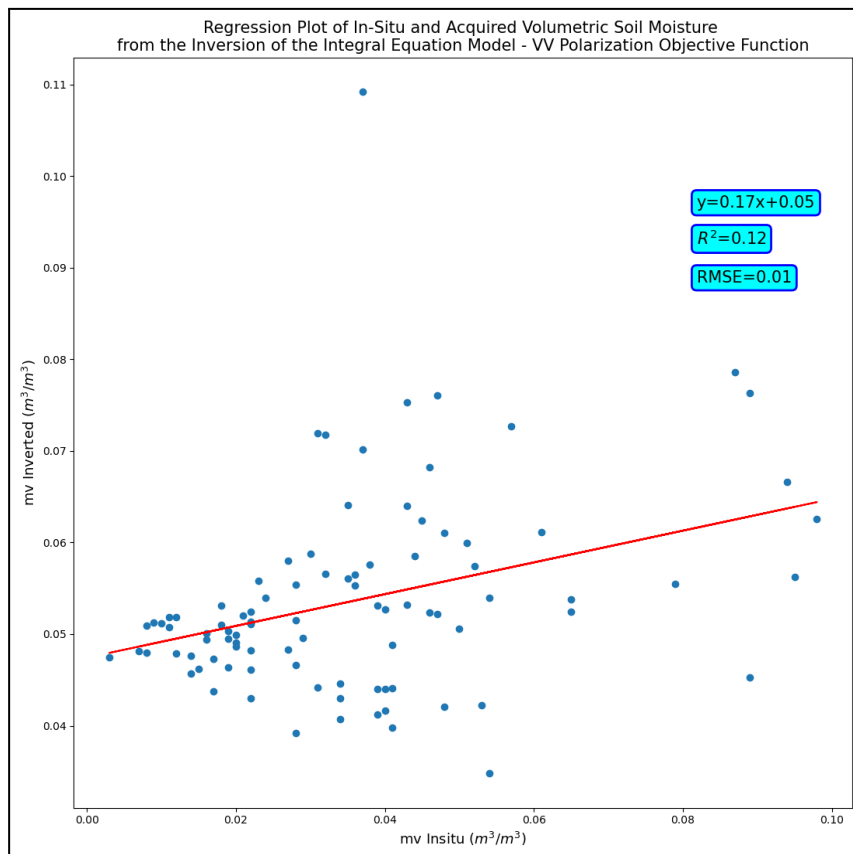
3.5.6. Στατιστική Ανάλυση/Σύγκριση Εξαγόμενων από τα Μοντέλα με Επίγεια Μετρημένων Συνόλων Ογκομετρικής Εδαφικής Υγρασίας

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια της ενότητας, η ανάλυση/σύγκριση της εξαγόμενης από τα μοντέλα οπισθοσκέδασης (ή μοντελοποιημένης) ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας θα γίνει μέσω των διαγραμμάτων διασποράς της μετρημένης και μοντελοποιημένης εδαφικής υγρασίας (μαζί υπολογίζονται οι συντελεστές της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων με τους αντίστοιχους στατιστικούς δείκτες R.M.S.E. και R^2) και χρονοσειρών όπου μπορεί να συγκριθεί ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται οι μετρημένες και μοντελοποιημένες τιμές της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α. στον χρόνο. Παρακάτω ακολουθούν ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα στατιστικά και περιγραφικά στοιχεία ανάλυσης/σύγκρισης των μετρημένων και μοντελοποιημένων τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας καθώς και τα

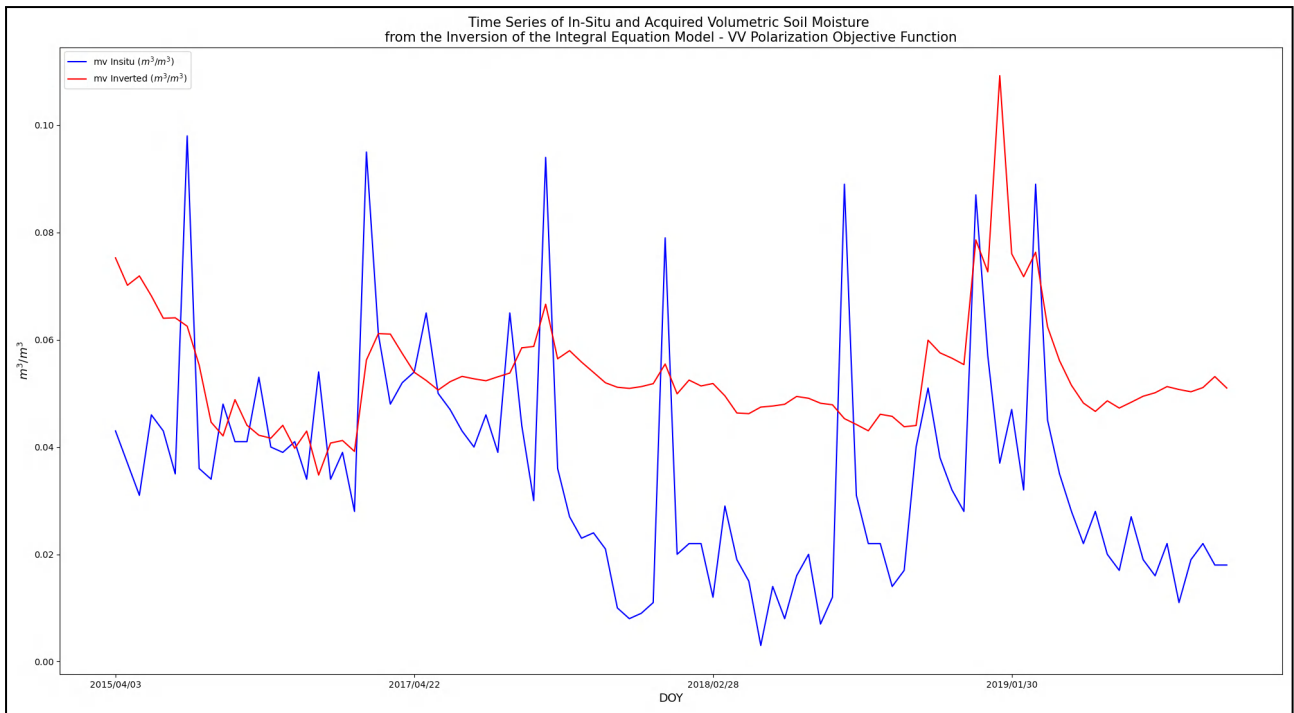
προαναφερθέντα διαγράμματα διασποράς και οι χρονοσειρές για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α..

Σταθμός Δικτύου I.S.M.N.	Μοντέλο Οπισθοσκέδασης - Πόλωση	Έκταση Περιοχής Ενδιαφέροντος	Είδος Πρωτογενών Δεδομένων S.A.R.	R^2	R.M.S.E. [dB]	Συντελεστής α Ευθείας Ε.Τ.	Συντελεστής β Ευθείας Ε.Τ.
Ford Dry Lake	Integral Equation Model -VV	Μέγιστη	Σύνολο S1 GRD Εικόνων	0.12	0.01	0.17	0.05
Jornada	Integral Equation Model (Baghdadi) - VV	Μέγιστη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών Οπισθοσκέδασης	0.18	0.01	0.38	0
Sevilleta	-	-	-	-	-	-	-
Spooky	-	-	-	-	-	-	-
Williams 35 NW	Integral Equation Model (Baghdadi) - VV	Προσαρμοσμένη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών Οπισθοσκέδασης	0.25	0.02	0.19	0.02

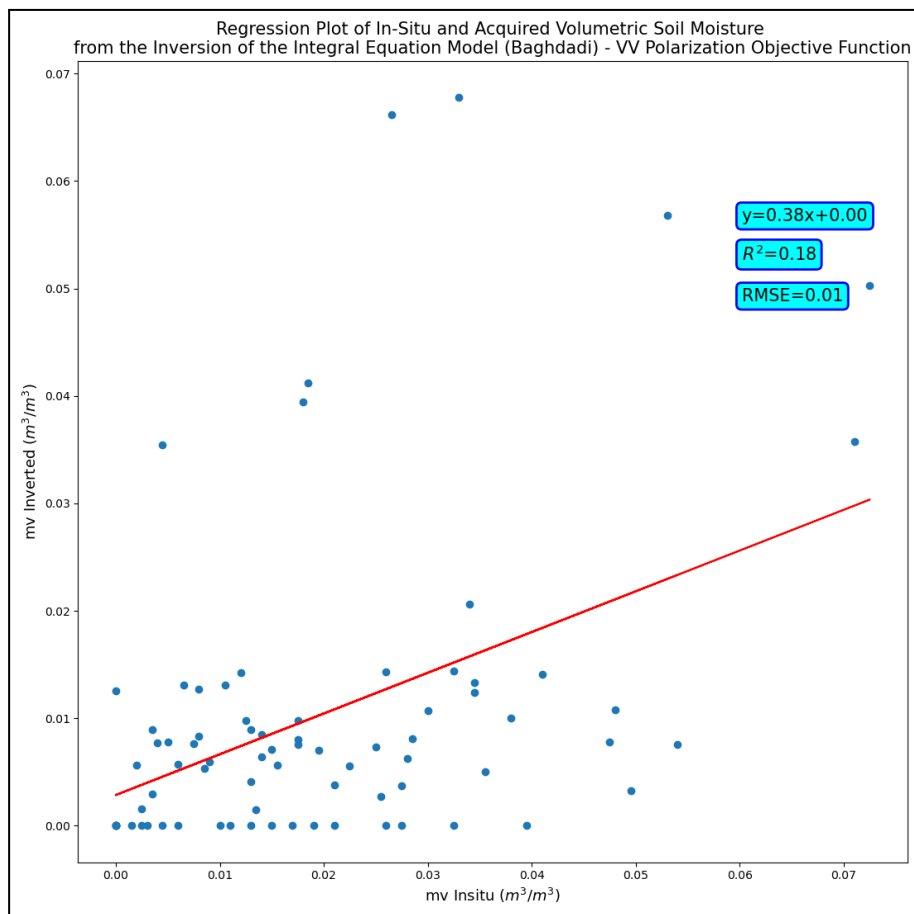
Πίνακας 15. Συγκεντρωτικός πίνακας στατιστικών και περιγραφικών στοιχείων ανάλυσης/σύγκρισης μετρημένων και μοντελοποιημένων τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α. (σημείωση: στους σταθμούς “Sevilleta” και “Spooky” δεν βρέθηκε κάποια ουσιαστική συσχέτιση μεταξύ μετρημένης και μοντελοποιημένης από οποιοδήποτε μοντέλο οπισθοσκέδασης εξαγόμενης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας).



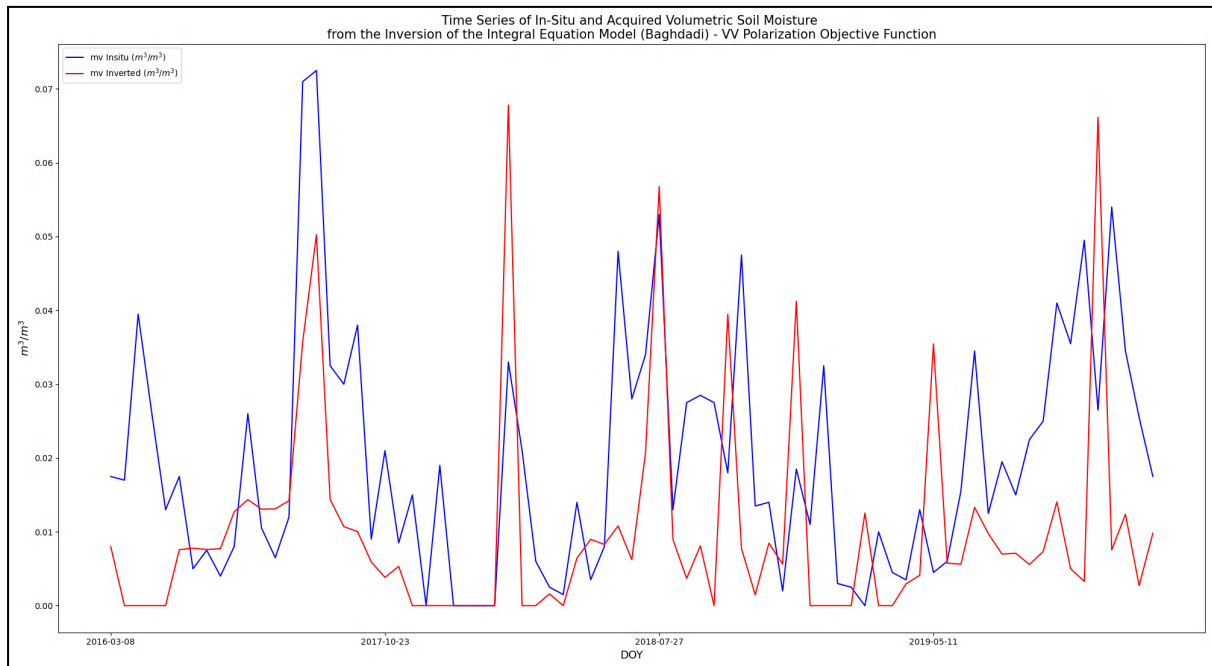
Σχήμα 105. Διάγραμμα διασποράς εξαγόμενης από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Taconet and Ciarletti et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τον σταθμό του δικτύου I.S.M.N. “Ford Dry Lake” στις Η.Π.Α..



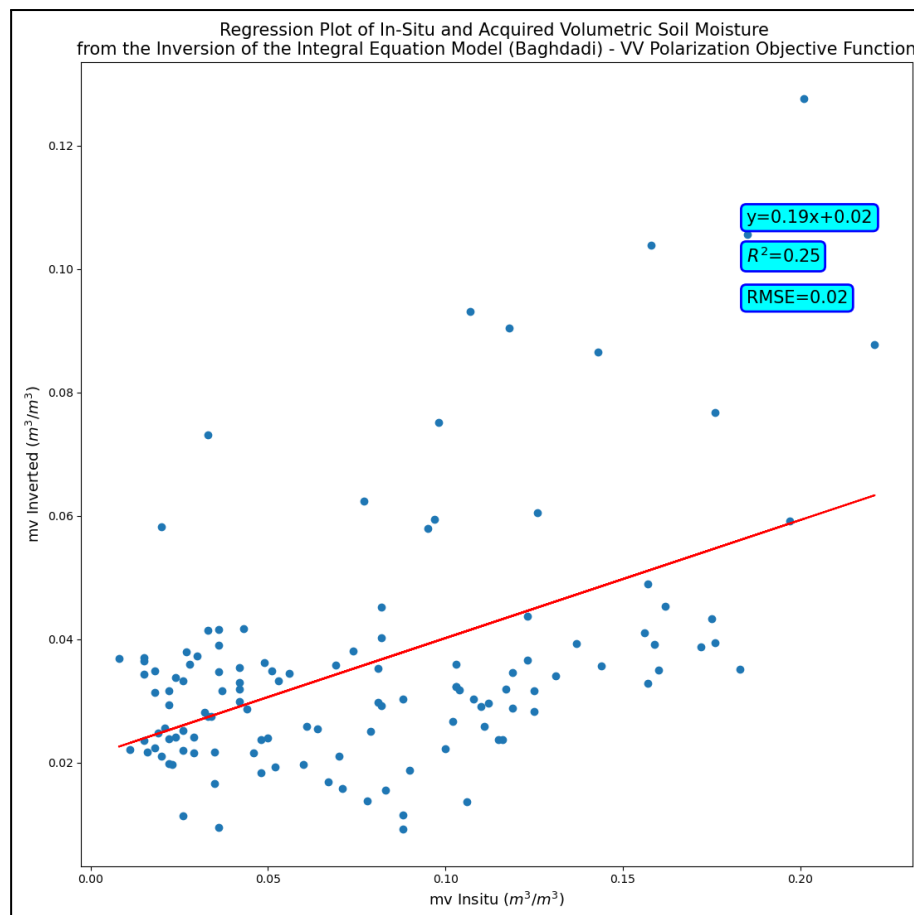
Σχήμα 106. Χρονοσειρά εξαγόμενη από το μοντέλο I.E.M. μήκους συσχέτισης βάσει Taconet and Ciarletti et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τον σταθμό του δικτύου I.S.M.N. “Ford Dry Lake” στις Η.Π.Α..



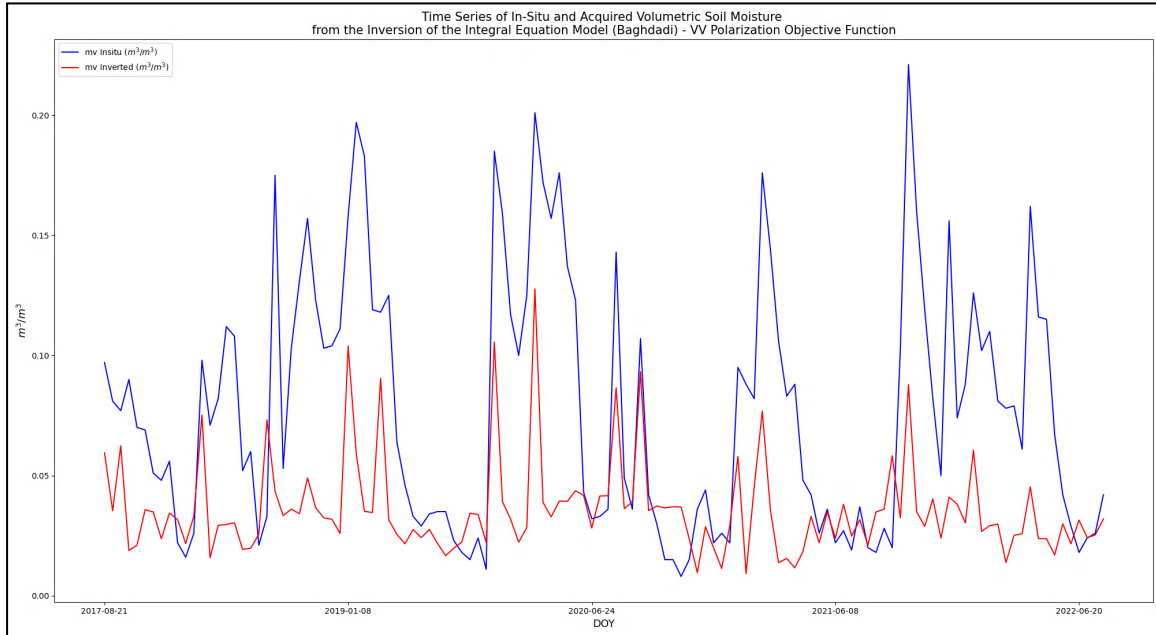
Σχήμα 107. Διάγραμμα διασποράς εξαγόμενης από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Baghdadi et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τον σταθμό του δικτύου I.S.M.N. “Jornada” στις Η.Π.Α..



Σχήμα 108. Χρονοσειρά εξαγόμενης από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Baghdadi et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τον σταθμό του δικτύου I.S.M.N. “Jornada” στις Η.Π.Α..



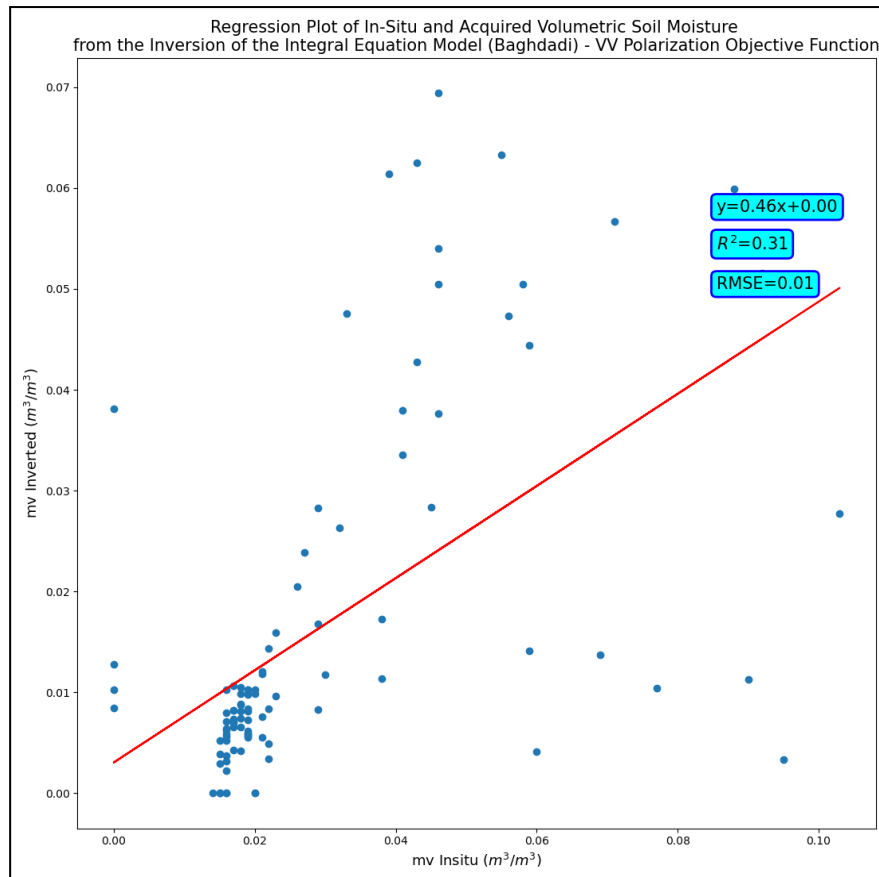
Σχήμα 109. Διάγραμμα διασποράς εξαγόμενης από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Baghdadi et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τον σταθμό του δικτύου I.S.M.N. “Williams 35 NW” στις Η.Π.Α..



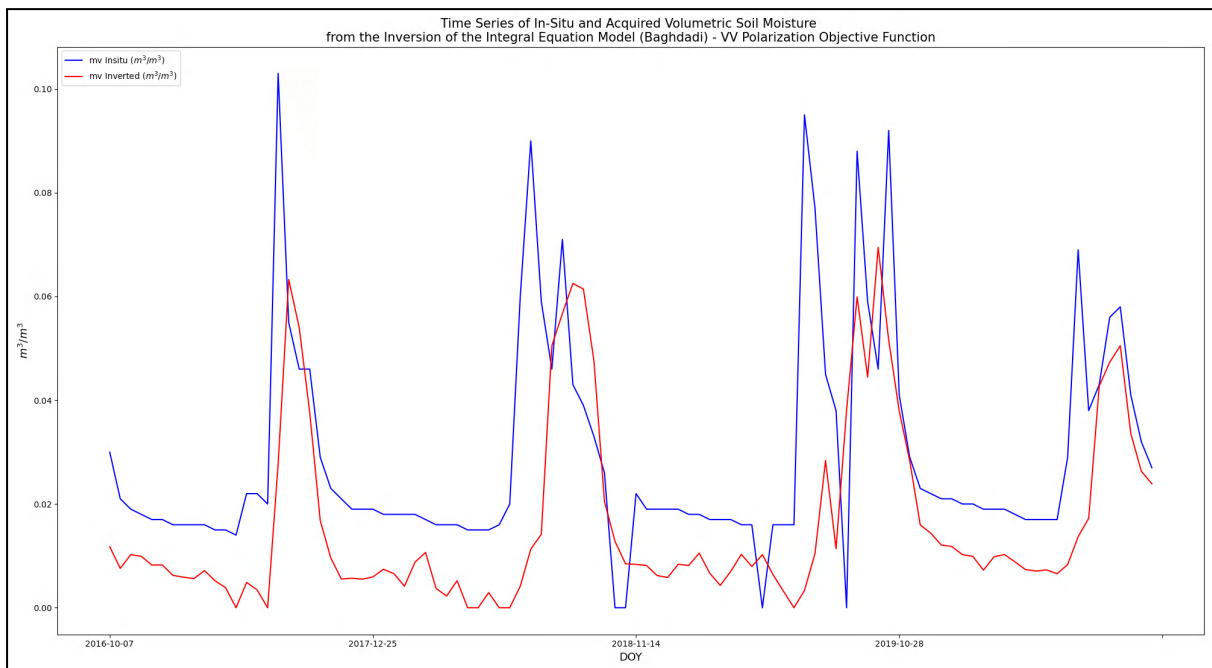
Σχήμα 110. Χρονοσειρά εξαγόμενης από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Baghdadi et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τον σταθμό του δικτύου I.S.M.N. “Williams 35 NW” στις Η.Π.Α..

Σε σχέση με τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων της ανάλυσης/σύγκρισης των εξαγόμενων από τα μοντέλα οπισθοσκέδασης και των μετρημένων τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας των σταθμών του δικτύου του I.S.M.N στις Η.Π.Α., παρατηρείται ότι παρόλο που στην ανάλυση/σύγκριση των μοντελοποιημένων και SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης το μοντέλο I.E.M. παρουσιάζει μεγάλες τιμές μέσου τετραγωνικού σφάλματος (R.M.S.E.), η υψηλή προσαρμογή βάσει του συντελεστή προσδιορισμού R^2 που επιτυγχάνεται στα σύνολα συντελεστών οπισθοσκέδασης συναντάται και στα σύνολα ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας. Επίσης, μέσω του συγκεκριμένου μοντέλου (και κυρίως όταν γίνεται χρήση του μήκους συσχέτισης κατά Baghdadi et al. 2007) επιτυγχάνεται και καλύτερη “σύγκλιση” μεταξύ των εξαγόμενων από τα μοντέλα οπισθοσκέδασης και των μετρημένων τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας. Βέβαια, και η προσαρμογή των μοντελοποιημένων συνόλων στα SAR σύνολα συντελεστών οπισθοσκέδασης και η “σύγκλιση” μεταξύ μετρημένων και μοντελοποιημένων τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, κατά πάσα πιθανότητα λόγω της χαμηλής προς μέτριας επίδοσης των μοντέλων οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α..

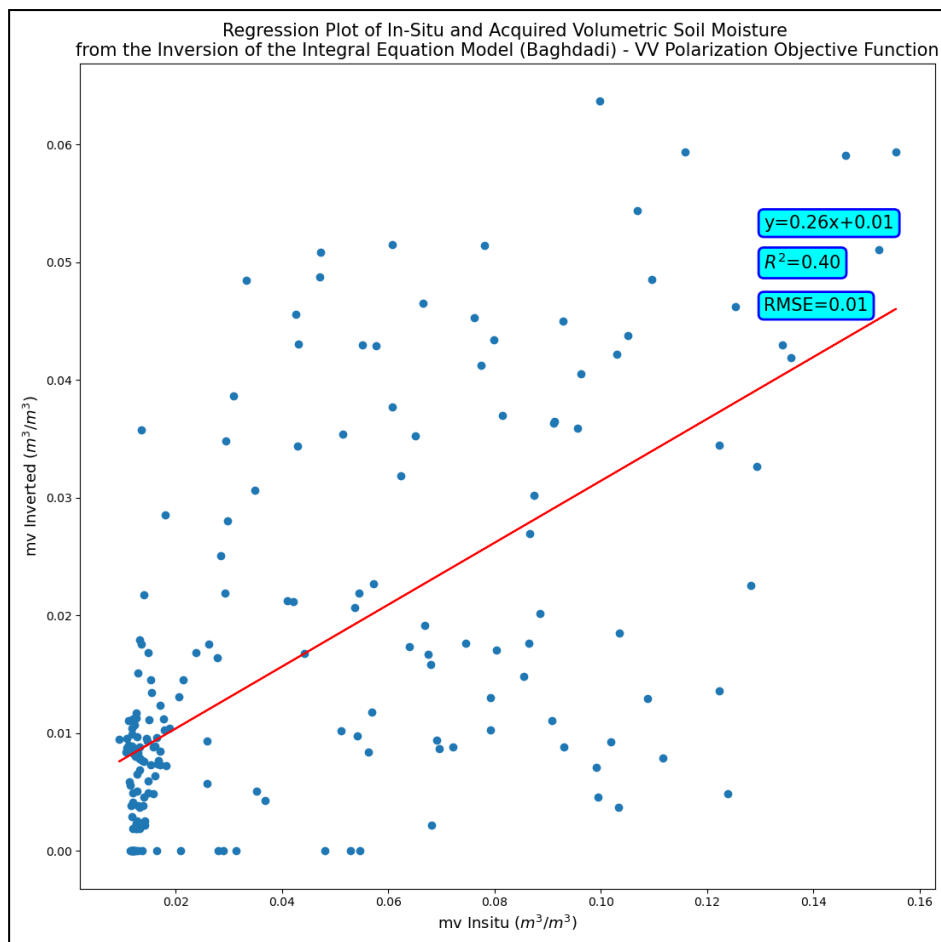
Κατόπιν, παρατίθενται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα στατιστικά και περιγραφικά στοιχεία ανάλυσης/σύγκρισης των μετρημένων και μοντελοποιημένων τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας καθώς και τα διαγράμματα διασποράς και οι χρονοσειρές για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στα Αφρικανικά κράτη του Σουδάν και του Νίγηρα.



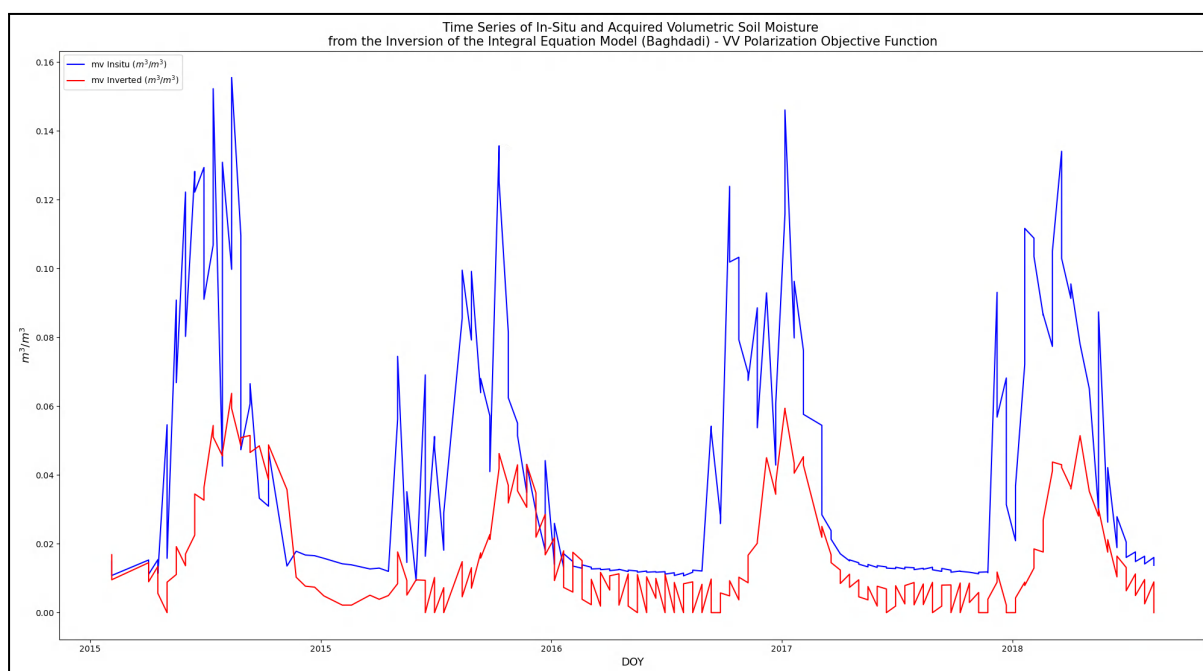
Σχήμα 111. Διάγραμμα διασποράς εξαγόμενης από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Baghdadi et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τον σταθμό του δικτύου I.S.M.N. “Damukiyah” στο Σουδάν.



Σχήμα 112. Χρονοσειρά εξαγόμενης από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Baghdadi et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τον σταθμό του δικτύου I.S.M.N. “Damukiyah” στο Σουδάν.



Σχήμα 113. Διάγραμμα διασποράς από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Baghdadi et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. “Tondikiboro” και “Wankama” στον Νίγηρα.



Σχήμα 114. Χρονοσειρά από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Baghdadi et al. 2007 και

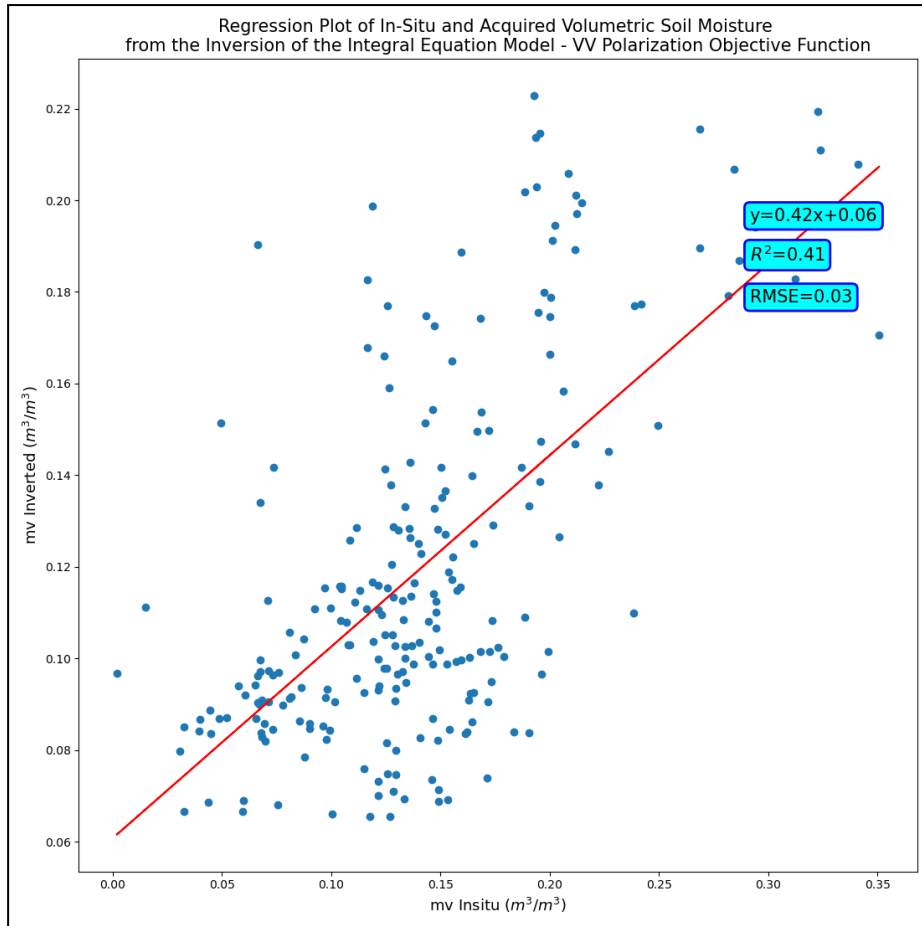
μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. “Tondikiboro” και “Wankama” στον Νίγηρα.

Μοντέλο Οπισθοσκέδασης - Πόλωση	Έκταση Περιοχής Ενδιαφέροντος	Είδος Πρωτογενών Δεδομένων S.A.R.	R^2	R.M.S.E. [dB]	Συντελεστής α Ευθείας Ε.Τ.	Συντελεστής β Ευθείας Ε.Τ.
Integral Equation Model (Baghdadi) - VV	Προασρμοσμένη	Χρονοσειρά Μέσου Όρου Συντελεστών Οπισθοσκέδασης	0.31	0.01	0.46	0
Integral Equation Model (Baghdadi) - VV	Μέγιστη	Σύνολο S1 GRD Εικόνων	0.4	0.01	0.26	0.01

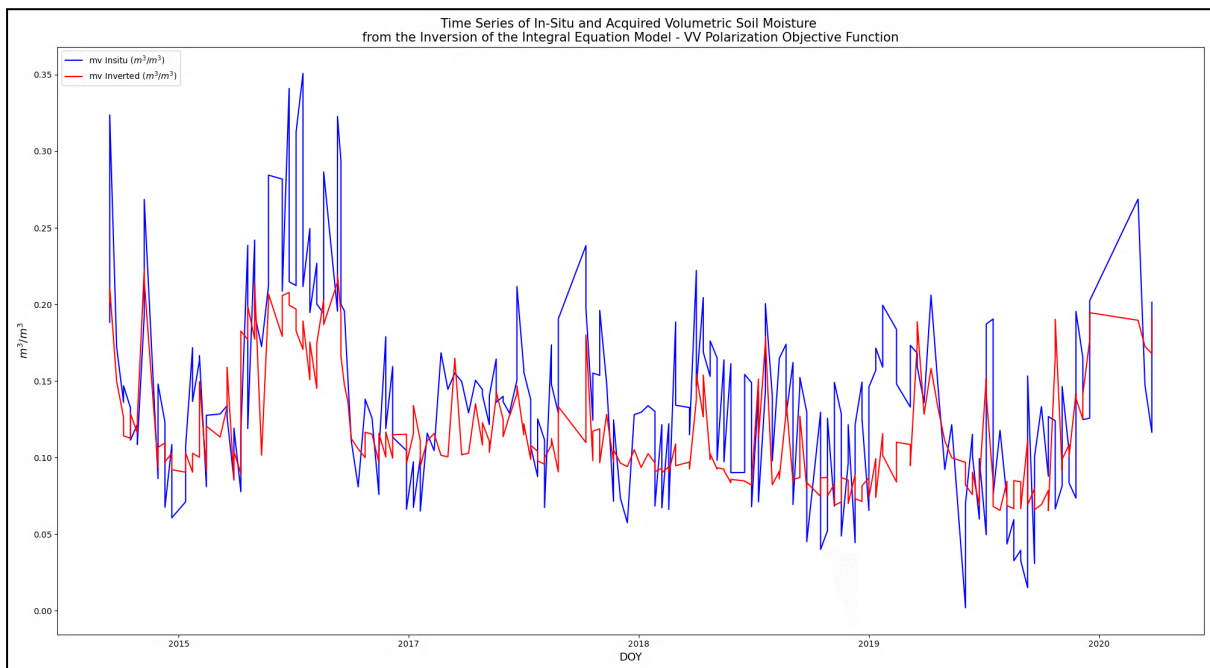
Πίνακας 16. Συγκεντρωτικός πίνακας στατιστικών και περιγραφικών στοιχείων ανάλυσης/σύγκρισης μετρημένων και μοντελοποιημένων τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στα Αφρικανικά κράτη.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα διασποράς και τις χρονοσειρές των εξαγόμενων από το μοντέλο οπισθοσκέδασης I.E.M. και των μετρημένων τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας μπορεί να παρατηρηθεί ότι στο σύνολο των μοντελοποιημένων τιμών εδαφικής υγρασίας υπάρχει ένα μοτίβο αυξομειώσεων των τιμών της εδαφικής υγρασίας (και της μετρημένης και της εξαγόμενης από τα μοντέλα οπισθοσκέδασης) το οποίο σχετίζεται με χρονικές περιόδους με αυξημένη συχνότητα βροχοπτώσεων. Πράγματι, στην βιοκλιματική περιοχή του Σαχέλ στην οποία βρίσκονται οι σταθμοί του δικτύου I.S.M.N. παρατηρείται το συγκεκριμένο μοτίβο βροχοπτώσεων με αυτές να κατανέμονται σε μια περίοδο 4-6 μηνών ανά έτος ενώ οι υπόλοιποι μήνες είναι ξηροί. Επιπλέον, το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στα σύνολα SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης, κάτι το οποίο επιβεβαιώνει την παρατήρηση της ταυτόχρονης γραμμικής αύξησης της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας και οπισθοσκέδασης [20]. Τέλος, η γενικότερα καλύτερη απόδοση της αντιστροφής των μοντέλων οπισθοσκέδασης για την εξαγωγή της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας σε σχέση με τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α. σχετίζεται κυρίως με το μικρότερο βάθος διείσδυσης του σήματος του SAR λόγω των ξηρότερων εδαφικών συνθηκών σε σχέση με τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α..

Τέλος, για την ανάλυση/σύγκριση των εμμέσως προσδιορισμένων και μετρημένων τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας των σταθμών “Widgiewa” και “Yamma Road” στην Αυστραλία ακολουθούν το διάγραμμα διασποράς και η χρονοσειρά με τις εξαγόμενες τιμές ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας από το μοντέλο I.E.M. (μήκος συσχέτισης κατά Taconet and Ciarletti et al. 2007) και τις τιμές της μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας με επίγεια μέσα.



Σχήμα 115. Διάγραμμα διασποράς της εξαγόμενης από το μοντέλο I.E.M. (μήκος συσχέτισης κατά Taconet and Ciarletti et al. 2007 και εκθετικής συνάρτησης αυτοσυσχέτισης κατά Fung et al. 2010) και της μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας.



Σχήμα 116. Χρονοσειρά της εξαγόμενης από το μοντέλο I.E.M. (μήκος συσχέτισης κατά Taconet and Ciarletti et al. 2007 και εκθετικής συνάρτησης αυτοσυσχέτισης κατά Fung et al. 2010) και της μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας.

Βάσει του παρατηρούμενου φαινομένου της ραγδαίας αυξομείωσης της εδαφικής υγρασίας μετά από γεγονότα έντονης βροχόπτωσης (λόγω του κορεσμού των εδαφικών πόρων οι οποίοι απορροφούν σταδιακά το νερό της βροχόπτωσης), το οποίο για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road” του δικτύου I.S.M.N. παρατηρείται συχνότερα σε σχέση με τους σταθμούς του δικτύου στον Νίγηρα που αναλύθηκαν σε προηγούμενη ενότητα, μπορεί να παρατηρηθεί βάσει της παραγόμενης χρονοσειράς ότι όταν τα φαινόμενα αυτά έχουν μικρή χρονική απόσταση μεταξύ τους οι τιμές της εξαγόμενης εδαφικής υγρασίας από το μοντέλο I.E.M. δεν παρουσιάζουν τις ίδες αιχμές με τις μετρημένες τιμές ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας. Παρόλα αυτά, η προσαρμογή η οποία αποτυπώνεται μέσω του δείκτη R^2 είναι η υψηλότερη από όλες τις υπόλοιπες περιοχές ενδιαφέροντος που αναλύθηκαν κυρίως λόγω των συνδυαστικών παραγόντων του μικρότερου βάθους μέτρησης της εδαφικής υγρασίας με επίγεια μέσα (0 cm - 5 cm) παρόλης της υψηλότερης κατά μέσο όρο περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό η οποία περιορίζει την δυνατότητα του SAR σήματος να διεισδύσει σε μεγαλύτερο βάθος εντός των εδαφικών στρωμάτων όπως φαίνεται και στο σχήμα 50 της ενότητας 3.4.2. βάσει των σχέσεων που αναπτύχθηκαν από τους Bruckler et al. 1988 και Singh et al. 2018.

4. Διερεύνηση Χρήσης Εικόνων Κλεισίματος Φάσης για την Ανίχνευση Μεταβολών από Γεγονότα Βροχόπτωσης

4.1. Εισαγωγή - Απαιτούμενα Δεδομένα

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει μια απόπειρα ανίχνευσης των μεταβολών που μπορούν να παρουσιαστούν από ένα γεγονός βροχόπτωσης στην περιοχή πέριξ του σταθμού “Ford Dry Lake” με χρήση μιας τριπλέτας Sentinel-1 S.L.C. (Single Look Complex) απεικονίσεων από τις οποίες υπολογίζονται τρία συμβολογράμματα ή διαγράμματα κροσσών συμβολής. Ειδικότερα, με χρήση του Sentinel-1 Toolbox στο περιβάλλον του SN.A.P. (SentiNel Applications Platform) της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος, έγινε η παραγωγή των συμβολογραμμάτων για τα ζεύγη S.L.C. απεικονίσεων 1-2, 2-3 και 3-1 ενώ οι εικόνες κλεισίματος φάσης υπολογίστηκαν με χρήση της προγραμματιστικής σουίτας “rasterio”. Επίσης, ελήφθησαν 2 τριπλέτες S.L.C. απεικονίσεων οι οποίες αντιστοιχούν στους αριθμούς σχετικής τροχιάς 100 και 166 του συστήματος δορυφόρων Sentinel-1. Η 1η εικόνα κάθε τριπλέτας είχε ληφθεί αρκετό καιρό πριν το γεγονός βροχόπτωσης (τουλάχιστον μια εβδομάδα πριν το γεγονός), η 2η εικόνα σε χρονικό διάστημα κοντά στο γεγονός βροχόπτωσης (έως 3 ημέρες μετά το γεγονός) και η 3η εικόνα αρκετό καιρό μετά το γεγονός. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία σε σχέση με τις 2 τριπλέτες S.L.C. απεικονίσεων.

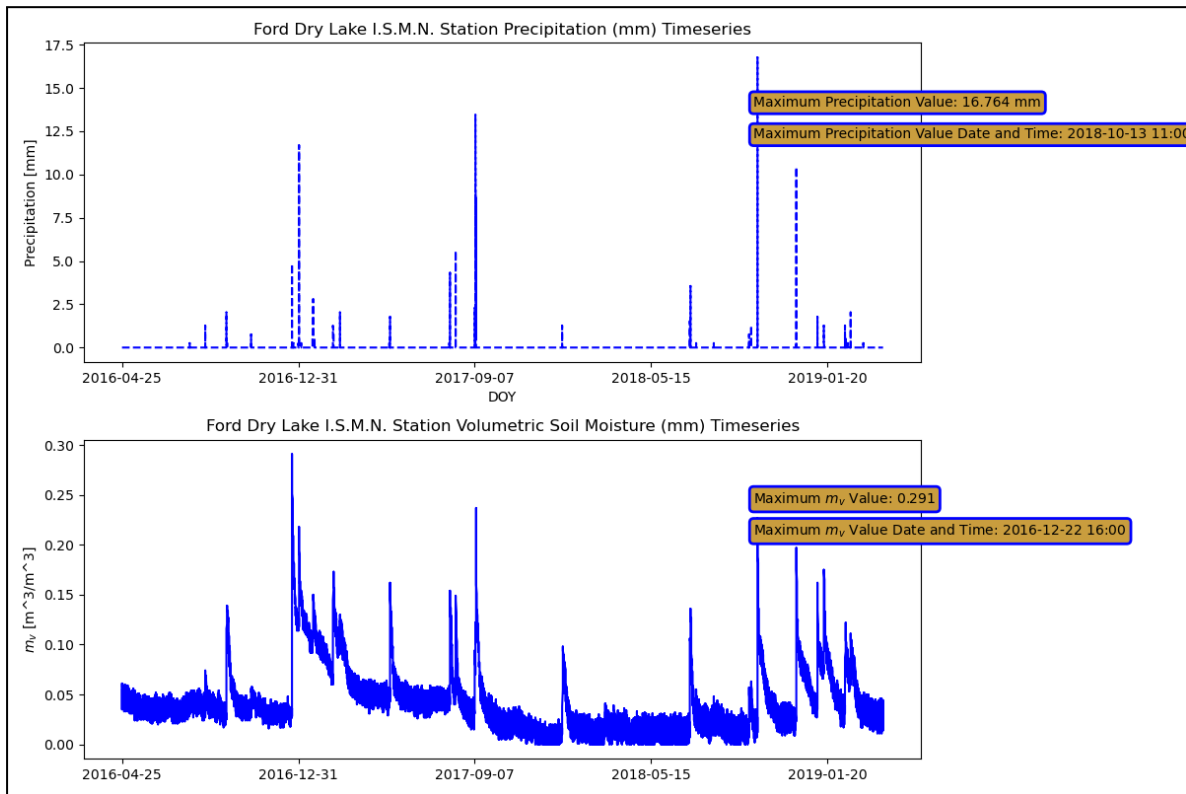
<u>Όνομα Αρχείου</u>	<u>Ημερομηνία Λήψης</u>	<u>Χρονική Στιγμή</u>
S1A_IW_SLC__1SDV_20181003T133603_20181003T133630_023972_029E51_82EC	03/10/2018	13:36:03
S1A_IW_SLC__1SDV_20181015T133603_20181015T133630_024147_02A40A_19EA	15/10/2018	13:36:03
S1A_IW_SLC__1SDV_20181027T133603_20181027T133630_024322_02A9AA_9602	27/10/2018	13:36:03

Πίνακας 17. Πίνακας βασικών στοιχείων S.L.C. απεικονίσεων αριθμού σχετικής τροχιάς 100 που χρησιμοποιήθηκαν.

<u>Όνομα Αρχείου</u>	<u>Ημερομηνία Λήψης</u>	<u>Χρονική Στιγμή</u>
S1B_IW_SLC__1SDV_20181002T014103_20181002T014130_012967_017F31_3DAF	02/10/2018	01:41:30
S1B_IW_SLC__1SDV_20181014T014103_20181014T014130_013142_018486_1753	14/10/2018	01:41:30
S1B_IW_SLC__1SDV_20181026T014103_20181026T014130_013317_0189F2_B27D	26/10/2018	01:41:30

Πίνακας 18. Πίνακας βασικών στοιχείων S.L.C. απεικονίσεων αριθμού σχετικής τροχιάς 166 που χρησιμοποιήθηκαν.

Σχετικά με τον εντοπισμό του γεγονότος βροχόπτωσης βάσει του οποίου έγινε η λήψη των S.L.C. απεικονίσεων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα αυτό έγινε στις 13/10/2018 και ώρα 11:00 με μέγιστο ύψος βροχόπτωσης τα 16.76 χιλιοστά, κάτι το οποίο οδήγησε σε αυξημένες από τον μέσο όρο τιμές ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας ακόμα και 2 ημέρες μετά το γεγονός βροχόπτωσης.

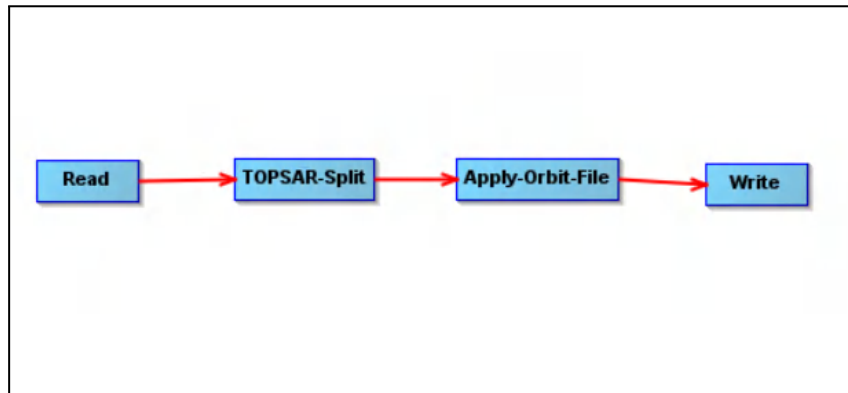


Σχήμα 117. Χρονοσειρές νετού (ύψους βροχόπτωσης) και ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας μεταξύ των ημερομηνιών 25/04/2016 (έναρξη λειτουργία του δορυφόρου Sentinel-1B) και 04/09/2019.

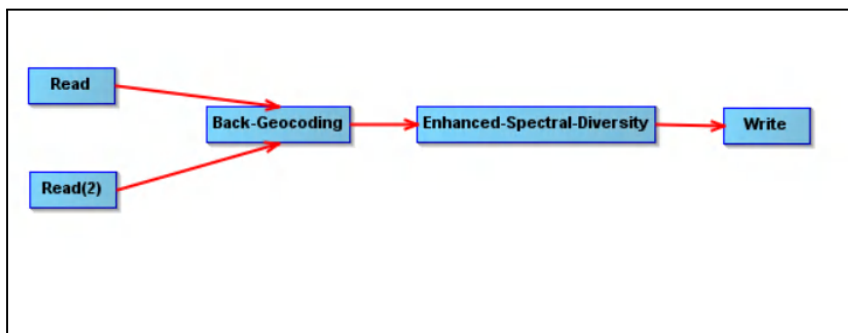
4.2. Μεθοδολογία Δημιουργίας Εικόνων Κλεισίματος Φάσης

Για την δημιουργία των εικόνων κλεισίματος φάσης στο περιβάλλον του E.S.A. SN.A.P., αρχικά οι τριπλέτες S.L.C. απεικονίσεων από τις τροχιές 100 και 166 υποβλήθηκαν σε μια διαδικασία προ-επεξεργασίας όπου επιλέχθηκαν 2 τμήματα (bursts) της αρχικής απεικόνισης και η χρήση ενός αρχείου “τροχιάς” για τον ακριβή υπολογισμό των παραμέτρων της θέσης του δορυφόρου Sentinel-1A ή Sentinel-1B κατά την στιγμή της λήψης των S.L.C. απεικονίσεων (Apply Orbit File). Έπειτα, έγινε η συμπροσαρμογή όλων των απεικονίσεων της κάθε τριπλέτας (1-2, 2-3, 1-3) με χρήση παγκοσμίου Ψ.Μ.Ε. (Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους) ακρίβειας περίπου 12 μέτρα ενώ μέσω της μεθόδου “Network Enhanced Spectral Diversity” [51] βελτιώθηκαν τα αποτελέσματα της συμπροσαρμογής. Τέλος, στο περιβάλλον του E.S.A. SN.A.P. δημιουργήθηκε και το σετ συμβολογράμματος - εικόνας συνάφειας φάσης για κάθε σετ απεικονίσεων των τριπλετών και απαλείφθηκαν τα “κενά” μεταξύ των επιλεγμένων τμημάτων των S.L.C. απεικονίσεων ενώ τελικά

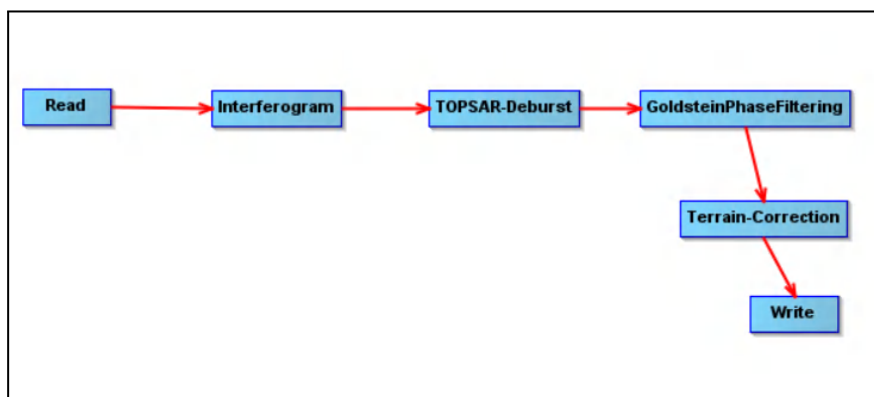
εφαρμόστηκε η μέθοδος του Goldstein για την απαλοιφή του τυχαίου θορύβου στα συμβολογράμματα και τα σετ συμβολογραμμάτων - εικόνων συνάφειας φάσης γεωαναφέρθηκαν.



Σχήμα 118. Διάγραμμα ροής στο SN.A.P. των απαιτούμενων διεργασιών για την προεπεξεργασία των S.L.C. απεικονίσεων.



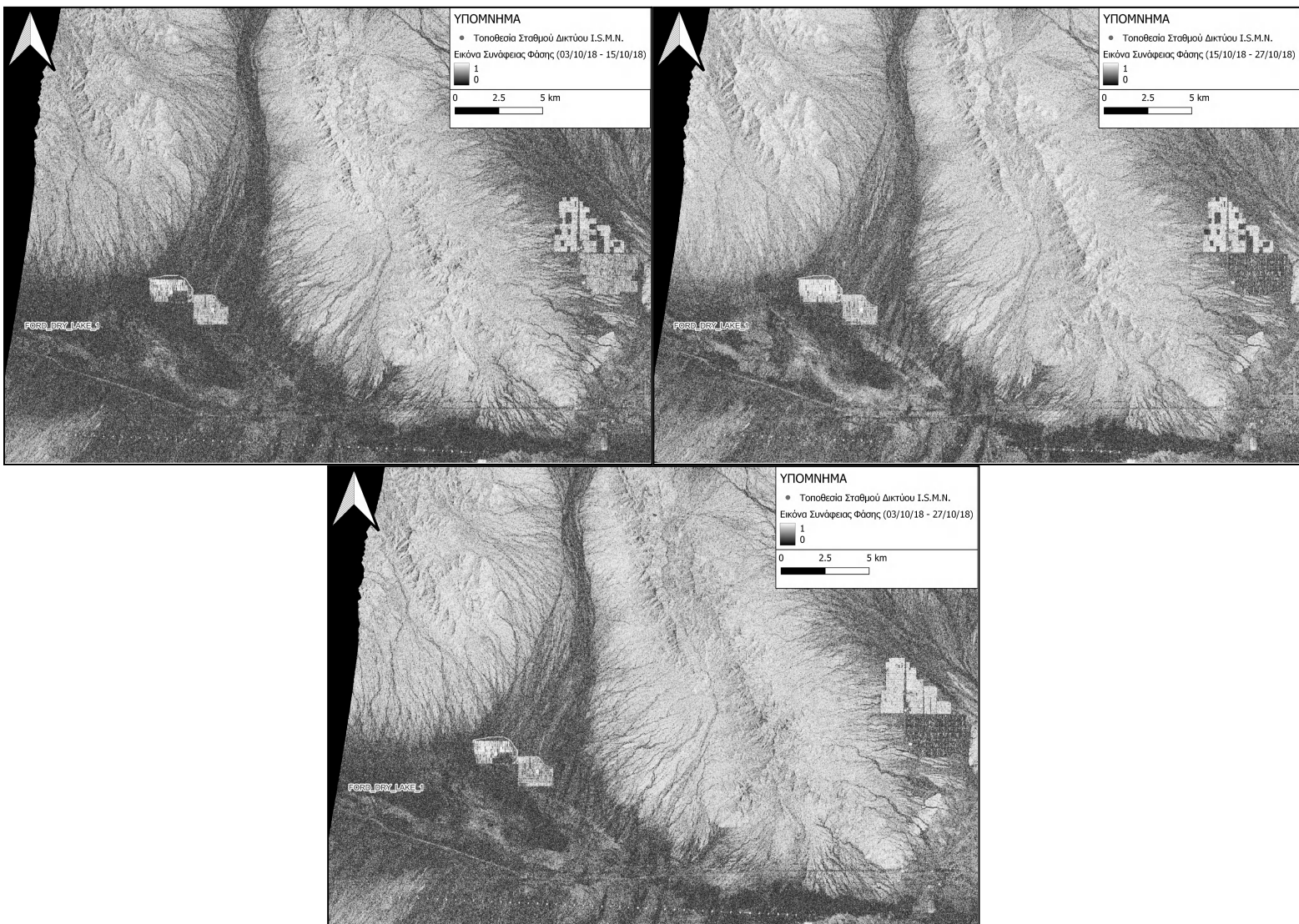
Σχήμα 119. Διάγραμμα ροής στο SN.A.P. των απαιτούμενων διεργασιών για την συμπροσαρμογή των S.L.C. απεικονίσεων.



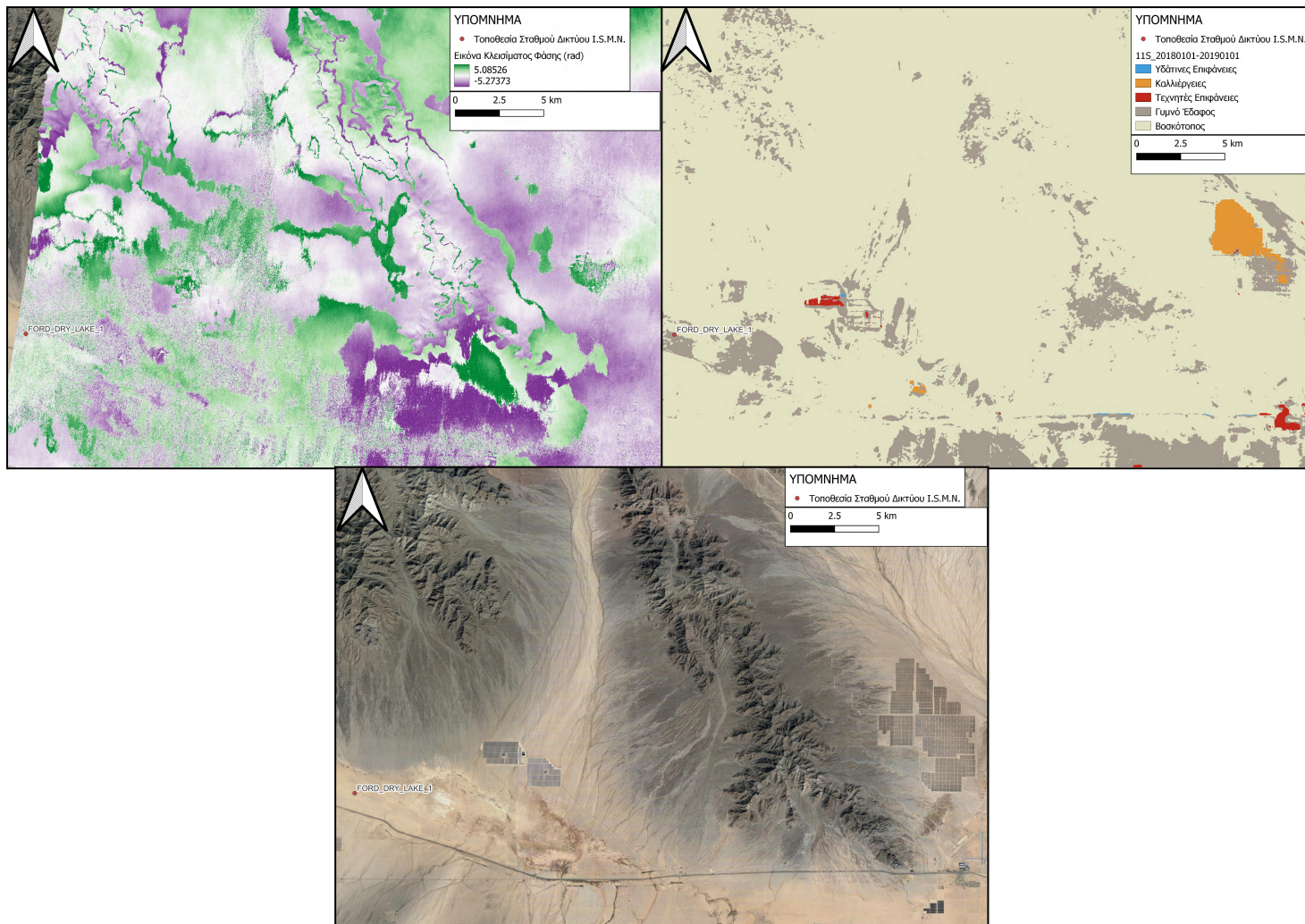
Σχήμα 120. Διάγραμμα ροής στο SN.A.P. των απαιτούμενων διεργασιών για την παραγωγή των σετ συμβολογραμμάτων - εικόνων συνάφειας φάσης των αντίστοιχων S.L.C. απεικονίσεων.

4.3. Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Η αξιολόγηση της δυνατότητας χρήσης εικόνων κλεισίματος φάσης για την ανίχνευση μεταβολών από γεγονότα βροχόπτωσης στην περιοχή πέριξ του σταθμού “Ford Dry Lake” θα γίνει μέσω της φωτοερμηνευτικής ανάλυσης των εικόνων κλεισίματος φάσης αλλά και των εικόνων συνάφειας φάσης για κάθε σετ S.L.C. απεικονίσεων. Συγκεκριμένα, μέσω των εικόνων συνάφειας φάσης δύναται να διερευνηθεί η αποσυσχέτιση η οποία ενδέχεται να οφείλεται σε αλλαγές στην διηλεκτρική συμπεριφορά του εδάφους και η οποία συνδέεται με την εδαφική υγρασία. Η άνωθεν ανάλυση θα γίνει για τις 2 τροχιές από τις οποίες έχουν ληφθεί S.L.C. απεικονίσεις.

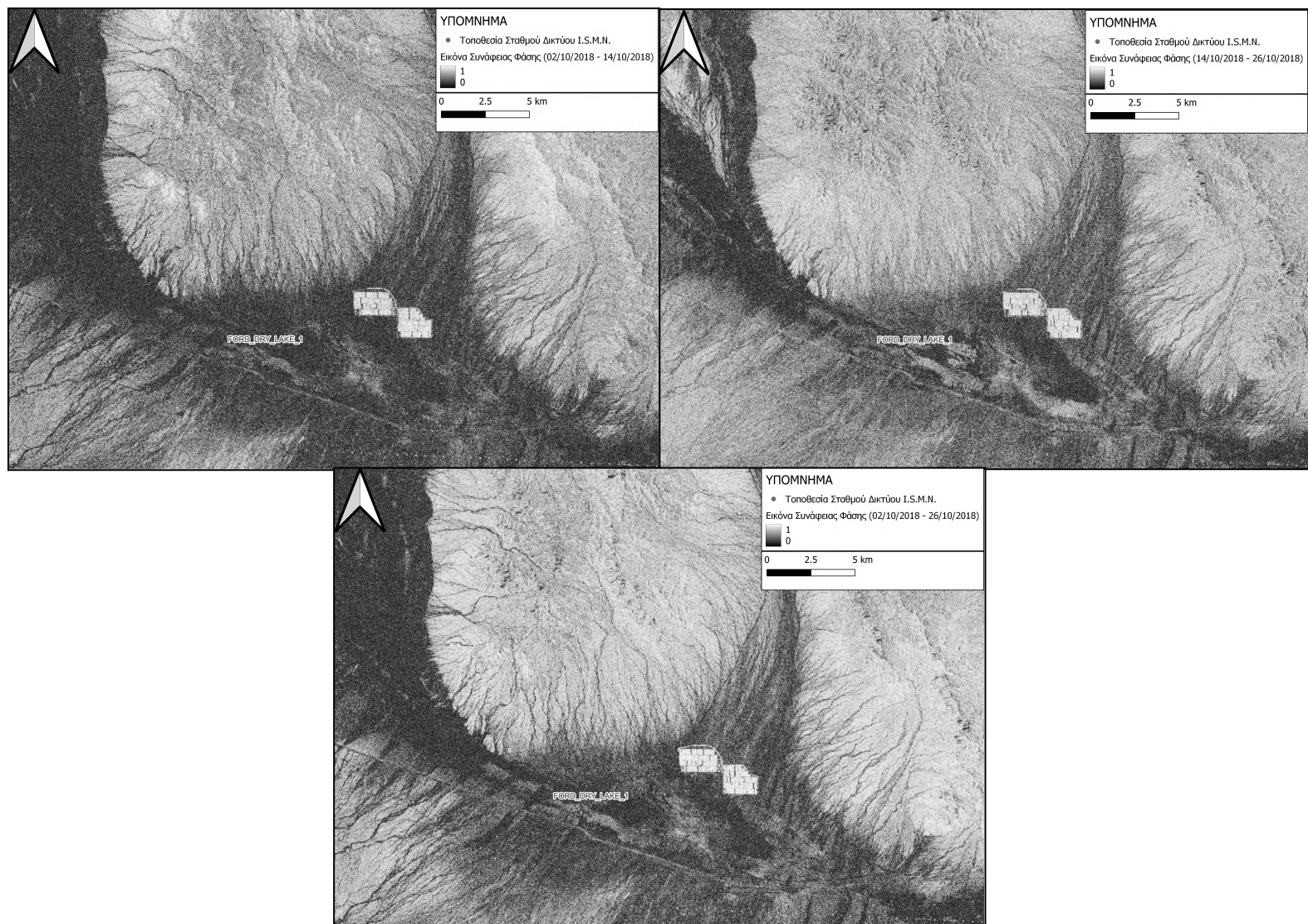


Σχήμα 121. Εικόνες συνάφειας φάσης για την τροχιά 100 όπου φαίνεται ο σταθμός “Ford Dry Lake” για τις ημερομηνίες λήψης S.L.C. απεικονίσεων 03/10/2018, 15/10/2018 και 27/10/2018.

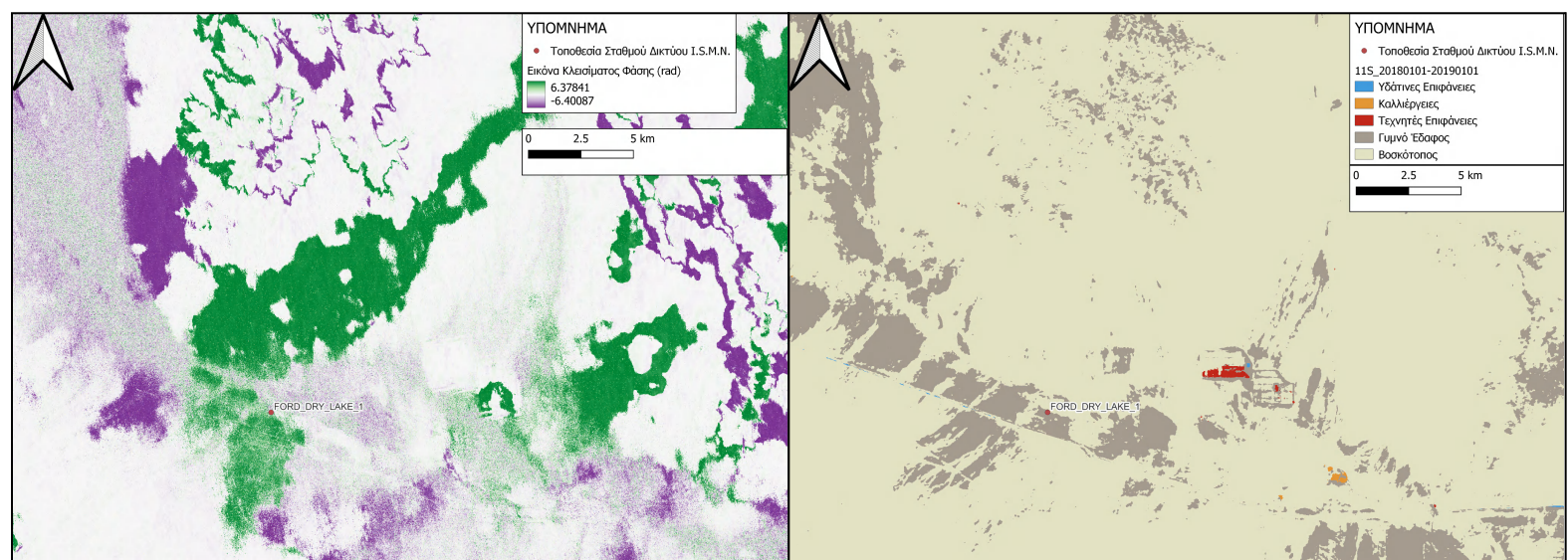


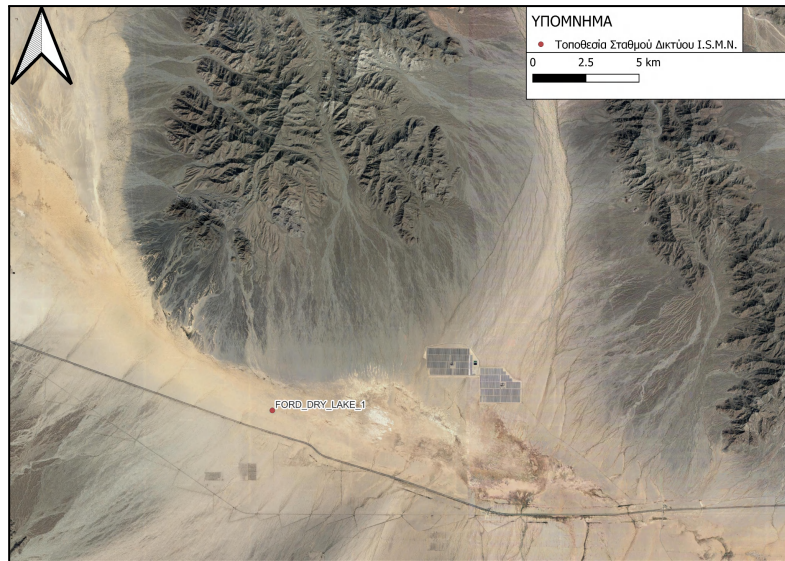
Σχήμα 122. Εικόνα κλεισίματος φάσης για την τροχιά 100 (άνω αριστερή εικόνα) μαζί με απόσπασμα της ίδιας περιοχής από τον χάρτη κάλυψης γης της ESRI και δορυφορική εικόνα (κάτω εικόνα).

Παρατηρώντας για την τροχιά 100 τις εικόνες συνάφειας φάσης, εξαιρώντας τις ορεινές περιοχές όπου υπάρχει σταθερά μεγάλη συνάφεια και τεχνητές επιφάνειες (φωτοβολταϊκοί σταθμοί), μπορεί να διαπιστωθεί μια μικρή μείωση της συνάφειας για το συμβολόγραμμα που σχετίζεται με τις ημερομηνίες λήψης 03/10/2018 - 15/10/2018 σε σχέση με αυτή από τις 03/10/2018 - 27/10/2018. Βέβαια, η παραπάνω παρατήρηση δεν ισχύει και για την συνάφεια της φάσης από το συμβολόγραμμα που σχετίζεται με τις ημερομηνίες λήψης 15/10/2018 - 27/10/2018 κάτι το οποίο σχετίζεται κατά πάσα πιθανότητα με το γεγονός ότι η μετρημένη (στο σταθμό του δικτύου I.S.M.N.) εδαφική υγρασία στις 27/10 δεν έχει επανέλθει στα ίδια επίπεδα με αυτή που μετρήθηκε στις 03/10. Επίσης, από την εικόνα κλεισίματος φάσης δεν δύναται να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα λόγω της επίδρασης της τοπογραφίας. Τέλος, παρατηρώντας ταυτόχρονα τις εικόνες συνάφειας φάσης και τον χάρτη κάλυψης γης, οι διαφορές στην συνάφεια μεταξύ των σετ ημερομηνιών φαίνεται να εντοπίζεται περισσότερο σε περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί στον χάρτη κάλυψης γης ως γυμνά εδάφη. Παρακάτω ακολουθούν τα ανάλογα αποτελέσματα για την τροχιά 166.



Σχήμα 123. Εικόνες συνάφειας φάσης για την τροχιά 166 όπου φαίνεται ο σταθμός “Ford Dry Lake” για τις ημερομηνίες λήψης S.L.C. απεικονίσεων 02/10/2018, 14/10/2018 και 26/10/2018.





Σχήμα 124. Εικόνα κλεισίματος φάσης για την τροχιά 166 (άνω αριστερή εικόνα) μαζί με απόσπασμα της ίδιας περιοχής από τον χάρτη κάλυψης γης της ESRI και δορυφορική εικόνα (κάτω εικόνα).

Για την συγκεκριμένη τροχιά παρατηρούνται παρόμοια αποτελέσματα (σχετικά με την τροχιά 100) αναφορικά με τις μεταβολές την συνάφειας φάσης (ή αποσυσχέτισης) σε σχέση με το κάθε παραγόμενο συμβολόγραμμα της τριπλέτας. Βέβαια, στην εικόνα κλεισίματος φάσης παρατηρούνται περισσότερες περιοχές στις οποίες τα εικονοστοιχεία δίνουν την τιμή του μηδενός (τιμή κλεισίματος φάσης στην ιδεατή περίπτωση στην οποία δεν υπάρχουν αυξομειώσεις στην διηλεκτρική συμπεριφορά του εδάφους ή συστηματικά σφάλματα).

5. Συμπεράσματα

5.1 Γενικά Συμπεράσματα - Εφαρμογή Ανάλυσης Μοντέλων Οπισθοσκέδασης για τον Προσδιορισμό της Εδαφικής Υγρασίας

Από τις παραπάνω αναλύσεις των αποτελεσμάτων της σύγκρισης των συνόλων δεδομένων SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης και των συνόλων δεδομένων επίγεια μετρημένης και εξαγόμενης από τα μοντέλα οπισθοσκέδασης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας, τρεις από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των αποτελεσμάτων από στατιστικής άποψης και από άποψης ευαισθησίας των μοντελοποιημένων συνόλων δεδομένων στο να ανιχνεύουν τις μεταβολές ανάλογα με των μετρημένων είναι το μήκος κύματος το οποίο εξάλλου σχετίζεται και με τις άλλες δύο παραμέτρους του βάθους διείσδυσης και του βάθους δειγματοληψίας στο οποίο αναφέρονται οι επιτόπιες μετρήσεις. Τα καλύτερα αποτελέσματα μοντελοποίησης της οπισθοσκέδασης και εξαγωγής της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας από τα μοντέλα οπισθοσκέδασης παρατηρείται στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στην Αυστραλία λόγω του μικρότερου βάθους δειγματοληψίας.

Σχετικά με την ποσότητα της βλάστησης στην περιοχή ενδιαφέροντος των σταθμών του δικτύου, μέσω της παρούσας μεθοδολογίας αυτή φαίνεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης της οπισθοσκέδασης και του έμμεσου προσδιορισμού της εδαφικής υγρασίας σημαντικά λιγότερο από

τους άλλους 2 παράγοντες που προαναφέρθηκαν. Βέβαια, η ποσότητα της βλάστησης μπορεί να θεωρηθεί ως αμελητέα (βάσει των χρονιαίων μέσων όρων των δεικτών N.D.V.I. που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4.2) σε όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος πλην αυτών στη Αυστραλία όπου και πάλι η βλάστηση είναι πωδής και δεν εμποδίζει το σήμα του SAR από το να διεισδύσει στο έδαφος. Παρόλα αυτά, μπορεί να παρατηρηθεί ότι από άποψης καλύτερης προσαρμογής μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης υπερτερούν οι σταθμοί με αμμώδεις εδαφικούς κόκκους.

Αναφορικά με την επιλογή του είδους της περιοχής ενδιαφέροντος για κάθε σταθμό του δικτύου I.S.M.N., δηλαδή το αν επιλέγεται περιοχή ενδιαφέροντος μέγιστης έκτασης 1 τετραγωνικού χιλιομέτρου ή μικρότερη προσαρμοσμένη περιοχή βάσει φωτοερμηνείας, παρατηρήθηκε σε σχέση με τα σύνολα μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης ότι η επιλογή προσαρμοσμένης περιοχής ενδιαφέροντος δίνει καλύτερα αποτελέσματα από στατιστικής απόψεως βάσει του δείκτη R^2 για όλους τους σταθμούς εκτός από τους σταθμούς “Jornada”, “Sevilleta” και “Spooky” που δίνουν τα χειρότερα αποτελέσματα από στατιστικής άποψης και από άποψης ευαισθησίας της μοντελοποιημένης οπισθοσκέδασης στις μεταβολές της SAR οπισθοσκέδασης. Εξαιρέση από τον παραπάνω κανόνα αποτελούν τα σύνολα μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης βάσει του μοντέλου “New Empirical” και πόλωσης VH. Σχετικά με την επιλογή συνόλου δεδομένων ραδιομετρικά και γεωμετρικά διορθωμένων SAR απεικονίσεων και χρονοσειρών μέσου όρου των συντελεστών οπισθοσκέδασης γ_0 SAR απεικονίσεων, παρατηρείται το τελευταίο σύνολο SAR δεδομένων να συμβάλλει στην επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων σε σχέση με την στατιστική απόδοση και την ευαισθησία των μοντελοποιημένων συνόλων συντελεστή οπισθοσκέδασης και εξαγόμενης από τα μοντέλα οπισθοσκέδασης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας.

Κατόπιν, με βάση την ανάλυση των αποτελεσμάτων που έγινε στο κεφάλαιο 3.5 μπορούν να γίνουν τα παρακάτω γενικά σχόλια για την συμπεριφορά των μοντέλων οπισθοσκέδασης αρχικά ως προς την μοντελοποίηση των συνόλων τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης και έπειτα ως προς την αντιστροφή των μοντέλων για την εξαγωγή των συνόλων ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας:

- για το μοντέλο Dubois παρατηρείται χαμηλή ευαισθησία των τιμών μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης στις μεταβολές των τιμών SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης, μέτρια προς υψηλή προσαρμογή συνόλων μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης στα σύνολα SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης με εύρος τιμών του δείκτη R^2 0.17 - 0.39 και σταθερή αρνητική διαφορά των μέσων όρων μοντελοποιημένων και SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης περί τα 3 - 5 dB
- για το μοντέλο “New Empirical” όταν εφαρμόζεται σε πολωμένες εικόνες VH παρατηρείται πολύ χαμηλή έως χαμηλή ευαισθησία των τιμών μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης στις μεταβολές των τιμών SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης, χαμηλή έως υψηλή προσαρμογή συνόλων μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης στα σύνολα SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης με εύρος τιμών του δείκτη R^2 0.11 - 0.40 και σχετική σύγκλιση των μέσων όρων συνόλων SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης
- για το μοντέλο “New Empirical” όταν εφαρμόζεται σε πολωμένες εικόνες VV παρατηρείται χαμηλή ευαισθησία στις μεταβολές των τιμών SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης, χαμηλή έως υψηλή προσαρμογή συνόλων μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης στα σύνολα SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης με εύρος τιμών του δείκτη R^2 0.12 - 0.44 και

σταθερή θετική διαφορά των μέσων όρων μοντελοποιημένων και SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης περί τα 3 - 5 dB

- το μοντέλο “Oh” πόλωσης VH δίνει ουσιαστικά αποτελέσματα μόνο για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στην Αυστραλία όπου δεν πέφτουν πολλές τιμές μετρημένης εδαφικής υγρασίας κάτω από το κατώφλι του 3% για τον υπολογισμό των μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης με βάση το συγκεκριμένο μοντέλο. Για το μοντέλο “Oh” πόλωσης VV οι εκδόσεις του 2002 και 2004 δίνουν όμοια αποτελέσματα για μικρά σύνολα δεδομένων ή για σύνολα δεδομένων στα οποία υπάρχουν πολλές τιμές μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας κάτω από τα κατώφλια του 3% (για το μοντέλο έκδοσης του 2002) και 4% (για το μοντέλο έκδοσης του 2004), όμως για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στην Αυστραλία υπερσχύει το μοντέλο του Oh έκδοσης του 2004 επιβεβαιώνοντας τον συλλογισμό του συγγραφέα του συγκεκριμένου μοντέλου αναφορικά με την ανάγκη τροποποίησης του (απαλοιφή του μήκους συσχέτισης επειδή οδηγεί στην εισαγωγή μεγάλων σφαλμάτων στον υπολογισμό των μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης) [26].
- το μοντέλο “I.E.M.” δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την προσαρμογή συνόλων μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης στα σύνολα SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης (εύρη τιμών R^2 0.33 - 0.42 σε όλους τους σταθμούς εκτός από τους “Jornada”, “Sevilleta” και “Spooky”) και την ευαισθησία των τιμών μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης στις μεταβολές των τιμών SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης, όμως τα εύρη τιμών των μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης είναι μεγαλύτερα από αυτά των SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης, κάτι που οδηγεί σε μεγάλες τιμές του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (το αντίθετο φαινόμενο παρατηρείται στα μοντέλα “Dubois” και “New Empirical”)

Επιπροσθέτως, σχετικά με τα σύνολα εξαγόμενων από τα μοντέλα οπισθοσκέδασης τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας, υπερσχύει σε όλους τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N., το I.E.M. (Integral Equation Model) σαν μοντέλο οπισθοσκέδασης για την εξαγωγή ή έμμεσο προσδιορισμό της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας, κάτι το οποίο ενδεχομένως δείχνει ότι η προσαρμογή συνόλων μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης στα σύνολα SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης και η ευαισθησία των μοντελοποιημένων τιμών συντελεστών οπισθοσκέδασης στις μεταβολές των τιμών SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης είναι οι 2 καθοριστικοί παράγοντες για την απόδοση των συνόλων εξαγόμενων από τα μοντέλα οπισθοσκέδασης τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας σε σχέση με τα σύνολα μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας.

Τέλος, αναφορικά με την ανάλυση των αποτελεσμάτων των μοντέλων οπισθοσκέδασης (ως προς την συγκριση των συνόλων SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης) που έγιναν στις δημοσιεύσεις [20] και [28] σε σχέση με την ανάλυση των αποτελεσμάτων της παρούσας ενότητας, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- βάσει της δημοσίευσης των Baghdadi et al. 2016 για το μοντέλο Dubois ο μέσος όρος των τιμών SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης σε σχέση με τον μέσο όρο των μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης υπερβαίνεται κατά 1.4 dB για $kHrms < 2.5$ και $\theta > 30^\circ$ (τιμές μεταβλητών οι οποίες ήταν παρόντες στα σύνολα δεδομένων αυτής της ενότητας) ενώ στην πρακτική εφαρμογή της παρούσας ενότητας ο μέσος όρος των τιμών SAR συντελεστών οπισθοσκέδαση υπερβαίνεται κατά 3 - 5 dB περίπου
- πάλι βάσει των Baghdadi et al. 2016 για το μοντέλο “New Empirical” παρατηρούνται αμελητέες αποκλίσεις (0.1 dB) των μέσων όρων των τιμών SAR και μοντελοποιημένων

συντελεστών οπισθοσκέδασης και για τις 2 πολώσεις (VH και VV) ενώ στα αποτελέσματα αυτής της εργασίας παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις μόνο για την VH πόλωση με τις αποκλίσεις για την VV πόλωση να κυμαίνονται στα 2-3 dB περίπου

- βάσει των Choker et al. 2017 παρατηρείται ότι ο μέσος όρος των τιμών μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης με το μοντέλο “New Empirical” υπερβαίνει κατά 2.8 dB τον μέσο όρο των SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης, κάτι το οποίο δεν συνάδει με τα ανάλογα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας
- βάσει των Choker et al. 2017 για το μοντέλο I.E.M. παρατηρείται η διαφορά των μέσων όρων των SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης να κυμαίνεται στο εύρος των τιμών 0 dB - 0.7 dB, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται εμμέσως από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας καθώς το μοντέλο προσομοιώνει καλύτερα τις μεταβολές της SAR οπισθοσκέδασης στον χρόνο

Γενικά, οι παρατηρούμενες διαφορές των αποτελεσμάτων μεταξύ των δημοσιεύσεων [20] και [28] και των αποτελεσμάτων της παρούσας ενότητας οφείλονται στην επιλογή διαφορετικών τοποθεσιών για την διεξαγωγή των εφαρμογών (Καναδάς, Γαλλία για τις δημοσιεύσεις [20], [28]), στην μέτρηση η μη των δεικτών τραχύτητας στο πεδίο (στις δημοσιεύσεις [20] και [28] μετρήθηκαν στο πεδίο οι συγκεκριμένοι δείκτες) και στην χρήση των πλατφορμών λήψης SAR απεικονίσεις (στις δημοσιεύσεις [20] και [28] χρησιμοποιήθηκαν περισσότερες από μια πλατφόρμες λήψης με μπάντες L, C, X και οι οποίες είχαν διαφορετικές χωρικές αναλύσεις)

Τελικά, έχοντας αναλύσει όλα τα συμπεράσματα για την σύγκριση των συνόλων μοντελοποιημένων και SAR συντελεστών οπισθοσκέδασης για την εξαγωγή της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας από τα μοντέλα οπισθοσκέδασης, δύναται να παρατεθούν ορισμένες προτάσεις οι οποίες θα μπορούσαν να βελτιώσουν τα παραγόμενα αποτελέσματα της πρακτικής εφαρμογής. Αυτά είναι:

- η αξιοποίηση νεφών σημείων από αποτυπώσεις με χρήση δέκτη LIDAR (LIght Detection and Ranging) για τον υπολογισμό των δεικτών τραχύτητας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος της κατανομής Hrms και του μήκους συσχέτισης L (έτοιμα LIDAR δεδομένα διατίθενται για την ακαδημαϊκή κοινότητα από Γεωλογικό Ινστιτούτο Ηνωμένων Πολιτειών - U.S.G.S. μέσω του προγράμματος 3D υψομετρίας [45])
- η χρήση απεικονίσεων από SAR το οποίο λειτουργεί στην L μπάντα όπως ο A.L.O.S. 2 (Advanced Land Observing Satellite-2)
- η χρήση σταθμών του δικτύου I.S.M.N. οι οποίοι μπορούν να παρατηρηθούν στην ίδια SAR απεικόνιση έτσι ώστε να μπορούν να ομαδοποιηθούν με επιτυχία (π.χ. Texas Soil Observation Network [46])
- η ενδεχόμενη αξιοποίηση πολυφασματικών δορυφορικών απεικονίσεων πολύ υψηλής ανάλυσης (π.χ.. WorldView - 3) και τεχνικών όπως η αντικειμενοστραφής ταξινόμηση για τον ακριβέστερο ορισμό των περιοχών ενδιαφέροντος από τις οποίες θα υπολογίζονταν οι συντελεστές οπισθοσκέδασης των SAR απεικονίσεων

5.2. Γενικά Συμπεράσματα - Διερεύνηση Χρήσης Εικόνων Κλεισίματος Φάσης

Η εφαρμογή η οποία αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα και αφορούσε στη διερεύνηση ανίχνευσης μεταβολών από γεγονότα βροχόπτωσης (τα οποία σχετίζονται άμεσα με αυξομειώσεις στην ογκομετρική εδαφική υγρασία) μέσω εικόνων κλεισίματος φάσης δεν έδωσε ουσιαστικά αποτελέσματα λόγω της ύπαρξης εκτεταμένων περιοχών στις εικόνες κλεισίματος φάσης με τιμές

εικονοστοιχείων διάφορες του μηδενός οι οποίες δεν μπορούσαν να εξηγηθούν μέσω των απεικονίσεων συνάφειας φάσης. Επομένως, και στην συγκεκριμένη περίπτωση ενδείκνυται η χρήση χρονοσειρών (εν προκειμένω χρονοσειρών συμβολομετρικής φάσης) με τους Karamvavis et al. 2022 να έχουν επιτύχει τον έμμεσο προσδιορισμό μιας χρονοσειράς ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας από την αντιστροφή με την μέθοδο S.L.S.Q.P. (βλέπε κεφάλαιο 3.4.2) μιας συνάρτησης κόστους που περιείχε δύο σύνολα τιμών μοντελοποιημένης (βάσει της σχέσης (54)) και SAR συμβολομετρικής φάσης, ένα σύνολο εικόνων κλεισίματος φάσης και δύο σύνολα υπολογιζόμενης συνάφειας φάσης λόγω εδαφικής υγρασίας στις τιμές μοντελοποιημένης και SAR συμβολομετρικής φάσης. Από την αντιστροφή αυτής της συνάρτησης κόστους προέκυψαν χρονοσειρές ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας των οποίων η στατιστική συσχέτιση (βάσει του συντελεστή συσχέτισης του Pearson R) με τις αντίστοιχες χρονοσειρές in-situ ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας βρέθηκε ίση με 0.82 και 0.93 αντίστοιχα για τις τροχιές 100 και 173 του συστήματος δορυφόρων Sentinel-1.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]: Τσακίρης, Γ. (2013). Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία και Εισαγωγή στην Διαχείριση Υδατικών Πόρων. Συμμετρία
- [2]: J. Briggs, The Mechanics of Soil Moisture, USDA Bureau of Soils Bull 10 US, Gov Print Office, Washington, DC, 1897.
- [3]: J.A. Widtsoe, W.W. McLaughlin, The movement of water in irrigated soils, Utah Agr. Exp. Sta. Bull. 115 (1912).
- [4]: Schoonover, J.E. (2015). An Introduction to Soil Concepts and the Role of Soils in Watershed Management. Journal of Contemporary Water Research and Education, 1(154), 21-47
- [5]: Θεοχάρης Μ. (2015). Αρδεύσεις (Θεωρία). Τ.Ε.Ι. Ηπείρου
- [6]: Hamzah M. Beakawi Al-Hashemi, Omar S. Baghabra Al-Amoudi (2017). A review on the angle of repose of granular materials. Powder Technology. 330. 397-417.
- [7]: Susha Lekshmi S.U., D.N. Singh, Maryam Shojaei Baghini. (2013). A critical review of soil moisture measurement. Measurement. 54. 92-105.
- [8]: Topp G. C., Davis J. L., Annan A. P. (1980). Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. Water Resources Research. 3(16). 574-582.
- [9]: History of radar. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/technology/radar/History-of-radar>
- [10]: Καραθανάση Β. (2014). Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση (Σημειώσεις Μαθήματος). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης.
- [11]: Murthi S. B. (2010). Ultrasound Physics and Equipment. Figure 4-2. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/226964331_Ultrasound_Physics_and_Equipment
- [12]: Doerry A. W. (2018). Radar Receiver Oscillator Phase Noise. Figure 2. ResearchGate https://www.researchgate.net/figure/Simple-monostatic-radar-system-model-Classical-phase-noise-analysis-begins-with-an_fig2_324263194
- [13]: J.A. Johannessen, F. Collard. (2013). SAR Instrument Principles and Processing. 3rd E.S.A. Advanced Training on Ocean Remote Sensing. [PowerPoint slides]. https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/0/01_Wednesday_OCT2013_SAR_principles.pdf
- [14]: Pinel N. (2010). Degree of Roughness of Rough Layers: Extensions of the Rayleigh Roughness Criterion and Some Applications. Progress in Electromagnetics Research. B(19). 41-63.
- [15]: Bruckler L. (1988). Near Surface Soil Moisture Estimation from Microwave Measurements. Remote Sensing of Environment. 26. 101-121

- [16]: Singh A. (2018). Analysis of the Effect of Incidence Angle and Moisture Content on the Penetration Depth of L and S Band SAR Signals into the Ground Surface. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Volume IV-5.
- [17]: Hallikainen M.T. (1985). Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil – Part 1: Empirical Models and Experimental Observations. I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 23. 25-34.
- [18]: Mironov V. (2009). Physically and Mineralogically Based Spectroscopic Dielectric Model for Moist Soils. I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 47. 2059-2070.
- [19]: Pascale C. Dubois, Jakob van Zyl, Ted Engman (1995). Measuring Soil Moisture with Imaging Radars. I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 33. 915-926.
- [20]: Baghdadi N. (2015). A New Empirical Model for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces. Remote Sens. 2016, 8, 920
- [21]: Dylan J. Shiltz (2021). Radarscatter. GitHub repository. <https://github.com/djshiltz/radarscatter>
- [22] Oh Y. (1992). An Empirical Model and an Inversion Technique for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces. I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 30. 370-381.
- [23] Oh Y. (1994). An Inversion Algorithm for Retrieving Soil Moisture and Surface Roughness from Polarimetric Radar Observations. I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 94. 1582-1584.
- [24] Oh Y. (1998). Condition for Precise Measurement of Soil Surface Roughness. I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 36. 691-695.
- [25] Oh Y. (2002). Semi-Empirical Model of the Ensemble-Averaged Differential Mueller Matrix for Microwave Backscattering From Bare Soil Surfaces. I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 40. 1348-1355.
- [26] Oh Y. (2004). Quantitative Retrieval of Soil Moisture Content and Surface Roughness From Multipolarized Radar Observations of Bare Soil Surfaces. I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 42. 596-600.
- [27]: Hermansson P. (2003). A Review of Models for Scattering from Random Surfaces. Swedish Defence Research Agency
- [28]: Choker M. (2017). Evaluation of the Oh, Dubois and IEM Backscatter Models Using a Large Dataset of SAR Data and Experimental Soil Measurements. Water 2017, 9, 38.
- [29]: Fung A. (1992). Backscattering from a Randomly Rough Dielectric Surface. I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 30. 356-369.
- [30]: Fung A. (2010). Microwave Scattering and Emission Models for Users. Artech House.

- [31]: Baghdadi N. (2004). Semi-Empirical Calibration of the IEM backscattering model using radar images and moisture and roughness field measurements. *International Journal of Remote Sensing*. 25. 3593-3623.
- [32]: Colorado Desert. Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Colorado_Desert
- [33]: FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2012. Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- [34]: Chihuahua Desert. Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Chihuahuan_Desert
- [35]: HydraProbe Soil Sensor Users Manual. Stevens® Water Monitoring Systems, Inc. January 2018 Rev. VI.
- [36]: AMMA-CATCH (1990): AMMA-CATCH: a hydrological, meteorological and ecological observatory on West Africa. IRD, CNRS-INSU, OSUG, OMP, OREME. doi:10.17178/AMMA-CATCH.all
- [37]: Ardo J. (2012). A 10-Year Dataset of Basic Meteorology and Soil Properties in Central Sudan. Hindawi Publishing Corporation Dataset Papers in Geosciences. 2013
- [38]: Smith, A. B., Walker, J. P., Western, A. W., Young, R. I., Ellett, K. M., Pipunic, R. C., Grayson, R. B., Siriwidena, L., Chiew, F. H. S. and Richter, H. The Murrumbidgee Soil Moisture Monitoring Network Data Set. *Water Resources Research*, vol. 48, W07701, 6pp., 2012 doi:10.1029/2012WR011976
- [39]: Jiang Z, Bian H, Xu L, Li M and He N (2021) Pulse Effect of Precipitation: Spatial Patterns and Mechanisms of Soil Carbon Emissions. *Front. Ecol. Evol.* 9:673310. doi: 10.3389/fevo.2021.673310
- [40]: Earth Engine Data Catalog: Sentinel-1 SAR GRD: C-band Synthetic Aperture Radar Ground Range Detected, log scaling. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S1_GRD
- [41]: Sentinel Hub EO Browser. Sentinel-1 GRD Processing Options. <https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/sentinel-1-grd/#processing-options>
- [42]: Dorigo, W.A. , Xaver, A. Vreugdenhil, M. Gruber, A., Hegyiova, A. Sanchis-Dufau, A.D., Zamojski, D. , Cordes, C., Wagner, W., and Drusch, M. (2013). Global Automated Quality Control of In Situ Soil Moisture data from the International Soil Moisture Network. *Vadose Zone Journal*, 12, 3, doi:10.2136/vzj2012.0097
- [43]: Bruckler L. (1988). Near Surface Soil Moisture Estimation from Microwave Measurements. *Remote Sensing of Environment* 26:101-121.
- [44]: Taconet O. (2006). Estimating Soil Roughness Indices on a Ridge and Furrow Surface Using Stereo Photogrammetry. *Soil and Tillage Research* 93. 64-74.
- [45]: United States Geological Survey. What is 3DEP? 3D Elevation Program. <https://www.usgs.gov/3d-elevation-program/what-3dep>

- [46]: Bureau of Economic Technology - The University of Texas at Austin. Texas Soil Observation Network (TxSON). <https://www.beg.utexas.edu/research/programs/txson>
- [47]: Alessandro Ferretti, Andrea Monti-Guarnieri, Claudio Prati, Fabio Rocca (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. ESA Publications
- [48]: Michaelides R. J. (2020). Quantifying Permafrost Processes and Soil Moisture with Interferometric Phase and Closure Phase
- [49]: De Zan F. (2014). A SAR Interferometric Model for Soil Moisture. I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 52. 418-425.
- [50]: Karamvavis K. (2022). Soil moisture estimation from Sentinel-1 interferometric observations over arid regions.
- [51]: H. Fattahi, P. Agram, and M. Simons (2017). A network-based enhanced spectral diversity approach for TOPS time-series analysis. I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing.. 55. 2. 777-786.
- [52]: R.M. Goldstein and C.L. Werner (1998). Radar Interferogram Phase Filtering for Geophysical Applications. Geophysical Research Letters. 25. 4035-4038.
- [53]: Marco Brogioni , Simone Pettinato , Giovanni Macelloni , Simonetta Paloscia , Paolo Pampaloni , Nazzareno Pierdicca & Francesca Ticconi (2010) Sensitivity of bistatic scattering to soil moisture and surface roughness of bare soils, International Journal of Remote Sensing, 31:15, 4227-4255, DOI: 10.1080/01431160903232808

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Τριγωνικό διάγραμμα κατάταξης εδαφικών μειγμάτων με βάση τα ποσοστά σε άμμο, ιλύ ή άργιλο (πηγή: Διοίκηση Δημοσίων Οδών των Η.Π.Α.).

Σχήμα 2. Σκαρίφημα ιδεατής κατανομής τεμαχιδίων εδάφους και πόρων που συμπληρώνονται με αέρα ή νερό (πηγή: University of Nevada. (2009). Nevada's Soils – Worth the Toil. <https://extension.unr.edu/publication.aspx?PubID=3066>).

Σχήμα 3. Δομή του εδάφους σε σχέση με την κίνηση του νερού μέσα σε αυτά (πηγή: U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1991. Section 15 Irrigation National Engineering Handbook, 2nd ed., Figure 1-3.).

Σχήμα 4. Διάγραμμα σύγκρισης της ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας που μετρήθηκε στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. με την αντίστοιχη φαινόμενη διηλεκτρική σταθερά που προσδιορίστηκε από την εμπειρική σχέση των Topp et al. 1980 μαζί με την βέλτιστη καμπύλη των 2 μεγεθών από την οποία μπορεί να παρατηρηθεί η μεγάλη στατιστική συσχέτιση μεταξύ τους (αριστερή εικόνα) και τυπική διάταξη ενός οργάνου μέτρησης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας με την μέθοδο T.D.R. (δεξιά εικόνα).

Σχήμα 5. Άποψη του Radar SCR-584 το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο από τις Αμερικανικές Ένοπλες Δυνάμεις για αεράμυνα (αριστερή εικόνα) και σχηματική αναπαράσταση προσδιορισμού του υψομέτρου από την φυσική Γήινη επιφάνεια ενός μετεωρολογικού στόχου από ένα Doppler Radar (δεξιά εικόνα).

Σχήμα 6. Γραφική παρουσίαση της περιόδου και συχνότητας παραγωγής παλμών για ένα περιοδικό φαινόμενο [11] (αριστερή εικόνα) και ενδεικτική γραφική παρουσίαση μιας βασικής διάταξης ενός συστήματος Radar όπου ως “oscillator” νοείται η γεννήτρια παλμών, ως “frequency multiplier” ο διαμορφωτής, ως “echo delay” η διαδικασία λήψης του οπισθοσκεδασμένου από έναν στόχο παλμού και ως “Mixer” ο αποδιαμορφωτής [12] (δεξιά εικόνα).

Σχήμα 7. Γραφική απόδοση των γεωμετρικών αρχών με βάση τις οποίες προκύπτουν οι τύποι για τον υπολογισμό της διακριτικής ικανότητας του Radar στην διεύθυνση την κάθετη στην γραμμή πτήσης (αριστερή εικόνα) και στην διεύθυνση των αζιμουθίων (δεξιά εικόνα).

Σχήμα 8. Διάγραμμα τεκμηρίωσης διακριτικής ικανότητας κατά την διεύθυνση των αζιμουθίων στα Radar Συνθετικού Ανοίγματος [13].

Σχήμα 9. SAR Απεικόνιση από τον δορυφόρο Sentinel-1 της Επαρχίας Σίλχετ του Μπαγκλαντές όπου φαίνεται μια περιοχή κατά την χειμερινή άνυδρη περίοδο (αριστερή εικόνα) και η ίδια περιοχή η οποία είναι πλημμυρισμένη κατά την περίοδο των Μουσώνων (δεξιά εικόνα).

Σχήμα 10. Έγχρωμο σύνθετο με τις SAR εικόνες από την χειμερινή άνυδρη περίοδο (πράσινο κανάλι) και από την περίοδο των Μουσώνων (κόκκινο κανάλι) μέσω της οποίας μπορούν να χαρτογραφηθούν οι πλημμυρισμένες εκτάσεις (αριστερή εικόνα) και έγχρωμο σύνθετο από τον δορυφόρο Landsat 8 που απεικονίζει την ίδια περιοχή κατά την χειμερινή περίοδο (δεξιά εικόνα).

Σχήμα 11. Γραφική απόδοση της αλληλεπίδρασης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που μεταδίδεται σε ένα μέσο Ω και μια τραχεία επιφάνεια στο σημείο A.

Σχήμα 12. Πειραματική διάταξη κυματοδηγού μέσω του οποίου προσδιορίστηκε για διάφορα εδαφικά μείγματα η μιγαδική τους διηλεκτρική σταθερά [17].

Σχήμα 13. Διαγράμματα στα οποία μπορεί να παρατηρηθεί η διαφορά στην ακρίβεια προσδιορισμού του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς του εδαφικού μίγματος καθώς και η μεταβολή της ακρίβειας σε σχέση με την συχνότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας [17].

Σχήμα 14. Διαγράμματα στα οποία φαίνεται η σχέση στην μεταβολή των συνιστωσών της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς σε σχέση με την υφή των εδαφικών μειγμάτων αλλά και το πως αυτή η μεταβολή φθίνει όσο αυξάνεται η συχνότητα των μικροκυμάτων.

Σχήμα 15. Συμπεριφορά του συντελεστή οπισθοσκέδασης βάσει του μοντέλου Dubois στο εύρος εγκυρότητας του δείκτη τραχύτητας k_s ή $kHrms$ [21].

Σχήμα 16. Συμπεριφορά του συντελεστή οπισθοσκέδασης βάσει του Νέου Εμπειρικού Μοντέλου στο εύρος εγκυρότητας του δείκτη τραχύτητας k_s ή $kHrms$ και όπου επίσης μπορεί να παρατηρηθεί η χαμηλότερη ευαισθησία του στην αυξανόμενη τραχύτητα σε σχέση με το μοντέλο Dubois [21].

Σχήμα 17. Απεικόνιση βασικών παραμέτρων και διεργασιών της σκέδασης σε τραχείες επιφάνειες (αριστερή εικόνα) και βασική απεικόνιση πολλαπλής σκέδασης από μια πηγή H/M κυμάτων (πηγή: <https://ipsjcnv.springeropen.com/articles/10.1186/s41074-018-0049-4>) (δεξιά εικόνα).

Σχήμα 18. Σχηματική απεικόνιση των γεωμετρικών όρων που υπεισέρχονται στις σχέσεις υπολογισμού των συνιστωσών τοπογραφίας και “επίπεδης γης” της συμβολομετρικής φάσης.

Σχήμα 19. Απόδοση της τοποθεσίας των σταθμών του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α. σε υπόβαθρο του χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. (προϊόν απεικονίσεων MODIS) όπου φαίνεται να βρίσκονται σε περιοχές με χαμηλό ποσοστό κάλυψης από βλάστηση.

Σχήμα 20. Χάρτης απεικόνισης των μέγιστων ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Ford Dry Lake” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

Σχήμα 21. Χάρτης απεικόνισης των αποκομμένων βάσει φωτοερμηνείας ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Ford Dry Lake” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

Σχήμα 22. Χάρτης απεικόνισης των μέγιστων ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Jornada” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

Σχήμα 23. Χάρτης απεικόνισης των αποκομμένων βάσει φωτοερμηνείας ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Jornada” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης

Σχήμα 34. Χάρτης απεικόνισης των αποκομμένων βάσει φωτοερμηνείας ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Wankama” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

Σχήμα 35. Χάρτης απεικόνισης των μέγιστων ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Widgiewa” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

Σχήμα 36. Χάρτης απεικόνισης των αποκομμένων βάσει φωτοερμηνείας ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Widgiewa” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

Σχήμα 37. Χάρτης απεικόνισης των μέγιστων ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Yamma Road” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

Σχήμα 38. Χάρτης απεικόνισης των αποκομμένων βάσει φωτοερμηνείας ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος “Yamma Road” σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας πολύ υψηλής ανάλυσης (αριστερή εικόνα) και σε υπόβαθρο χάρτη δείκτη βλάστησης N.D.V.I. από πολυφασματική απεικόνιση Sentinel-2 (δεξιά εικόνα).

Σχήμα 39. Απόσπασμα από 2 Sentinel-1 SAR απεικονίσεις της νήσου La Gomera (Κανάρια Νησιά), όπου σε μια εκ των οποίων έχει γίνει χρήση του συντελεστή οπισθοσκέδασης γ_0 (δεξιά εικόνα) και σε μια στην οποία έχει γίνει χρήση του συντελεστή οπισθοσκέδασης s_0 (αριστερή εικόνα).

Σχήμα 40. Διάγραμμα σύγκρισης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας και βάθους διείσδυσης για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α. (αριστερή εικόνα) και ιστόγραμμα τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τους ίδιους σταθμούς.

Σχήμα 41. Διάγραμμα σύγκρισης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας και βάθους διείσδυσης για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. σε Σουδάν και Νίγηρα (αριστερή εικόνα) και ιστόγραμμα τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τους ίδιους σταθμούς.

Σχήμα 42. Διάγραμμα σύγκρισης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας και βάθους διείσδυσης για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στην Αυστραλία (αριστερή εικόνα) και ιστόγραμμα τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τους ίδιους σταθμούς.

Σχήμα 43. Διάγραμμα απεικόνισης λοξής κατανομής τιμών μοντελοποιημένων κατά Dubois συντελεστών οπισθοσκέδασης (φαίνεται από την απόκλιση της κορυφής της χαρακτηριστικής καμπύλης της κανονικής κατανομής από την διάμεση τιμή του συνόλου τιμών) για την περιοχή ενδιαφέροντος “Damukiyah”.

Σχήμα 44. Διάγραμμα ροής εργασιών για την την εξαγωγή συνόλων δεδομένων μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης και ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας.

Σχήμα 45. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.

Σχήμα 46. Χρονοσειρά μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.

Σχήμα 47. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Jornada”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.

Σχήμα 48. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Jornada”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.

Σχήμα 49. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.

Σχήμα 50. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.

Σχήμα 51. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Damukiyah”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.

Σχήμα 52. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Damukiyah”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.

Σχήμα 53. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Tondikiboro” και “Wankama”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.

Σχήμα 54. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Tondikiboro” και “Wankama”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.

Σχήμα 55. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.

Σχήμα 56. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “Dubois” και την πόλωση VV.

Σχήμα 57. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.

Σχήμα 58. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.

Σχήμα 59. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.

Σχήμα 60. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.

Σχήμα 61. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Jornada”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.

Σχήμα 62. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Jornada”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.

Σχήμα 63. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “New Empirical” και πόλωσης VH.

Σχήμα 64. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.

Σχήμα 65. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωσης VV.

Σχήμα 66. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “New Empirical” και πόλωσης VV.

Σχήμα 67. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Damukiyah”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.

Σχήμα 68. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Damukiyah”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.

Σχήμα 69. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Damukiyah”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.

Σχήμα 70. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Damukiyah”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.

Σχήμα 71. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Tondikiboro” και “Wankama”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.

Σχήμα 72. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Tondikiboro” και “Wankama”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.

Σχήμα 73. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Tondikiboro” και “Wankama”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.

Σχήμα 74. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Tondikiboro” και “Wankama”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.

Σχήμα 75. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.

Σχήμα 76. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VH.

Σχήμα 77. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.

Σχήμα 78. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “New Empirical” και την πόλωση VV.

Σχήμα 79. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης έτους 2004 και πόλωσης VV.

Σχήμα 80. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης έτους 2004 και πόλωσης VV.

Σχήμα 81. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Sevilleta”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης έτους 2002 και πόλωσης VV.

Σχήμα 82. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Sevilleta”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης έτους 2002 και πόλωσης VV.

Σχήμα 83. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Spooky”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης έτους 2004 και πόλωσης VV.

Σχήμα 84. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Spooky”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης έτους 2004 και πόλωσης VV.

Σχήμα 85. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης έτους 2004 και πόλωσης VV.

Σχήμα 86. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης έτους 2004 και πόλωσης VV.

Σχήμα 87. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “Oh” και την πόλωση VH.

Σχήμα 88. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “Oh” και την πόλωση VH.

Σχήμα 89. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης 2004 και πόλωσης VV.

Σχήμα 90. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “Oh” έκδοσης 2004 και πόλωσης VV.

Σχήμα 91. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “I.E.M.” γκαουσιανής συνάρτησης συσχέτισης (Brogioni et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.

Σχήμα 92. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Ford Dry Lake”, το μοντέλο “I.E.M.” γκαουσιανής συνάρτησης συσχέτισης (Brogioni et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.

Σχήμα 93. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Jornada”, το μοντέλο “I.E.M.” εκθετικής συνάρτησης συσχέτισης (Fung 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.

Σχήμα 94. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Jornada”, το μοντέλο “I.E.M.” εκθετικής συνάρτησης συσχέτισης (Fung et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.

Σχήμα 95. Διάγραμμα Διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Sevilleta”, το μοντέλο “I.E.M.” εκθετικής συνάρτησης συσχέτισης (Fung et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.

Σχήμα 96. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Sevilleta”, το μοντέλο “I.E.M.” εκθετικής συνάρτησης συσχέτισης (Fung et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.

Σχήμα 97. Διάγραμμα Διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “I.E.M.” γκαουσιανής

συνάρτησης συσχέτισης (Brogioli et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.

Σχήμα 98. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Williams 35 NW”, το μοντέλο “I.E.M.” γκαουσιανής συνάρτησης συσχέτισης (Brogioli et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.

Σχήμα 99. Διάγραμμα Διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Damukiyah”, το μοντέλο “I.E.M.” εκθετικής συνάρτησης συσχέτισης (Fung 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.

Σχήμα 100. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τον σταθμό “Damukiyah”, το μοντέλο “I.E.M.” εκθετικής συνάρτησης συσχέτισης (Fung et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.

Σχήμα 101. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Tondikiboro” και “Wankama”, το μοντέλο “I.E.M.” γκαουσιανής συνάρτησης συσχέτισης (Brogioli et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.

Σχήμα 102. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Tondikiboro” και “Wankama”, το μοντέλο “I.E.M.” γκαουσιανής συνάρτησης συσχέτισης (Brogioli et al. 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.

Σχήμα 103. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “I.E.M.” γκαουσιανής συνάρτησης συσχέτισης (Fung 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.

Σχήμα 104. Χρονοσειρά μεταξύ μοντελοποιημένων και SAR τιμών συντελεστή οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς “Widgiewa” και “Yamma Road”, το μοντέλο “I.E.M.” γκαουσιανής συνάρτησης συσχέτισης (Fung 2010), μήκους συσχέτισης βάσει της σχέσης των Taconet and Ciarletti et al. 2007 και πόλωσης VV.

Σχήμα 105. Διάγραμμα διασποράς εξαγόμενης από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Taconet and Ciarletti et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τον σταθμό του δικτύου I.S.M.N. “Ford Dry Lake” στις Η.Π.Α..

Σχήμα 106. Χρονοσειρά εξαγόμενης από το μοντέλο I.E.M. μήκους συσχέτισης βάσει Taconet and Ciarletti et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τον σταθμό του δικτύου I.S.M.N. “Ford Dry Lake” στις Η.Π.Α..

Σχήμα 107. Διάγραμμα διασποράς εξαγόμενης από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Baghdadi et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τον σταθμό του δικτύου I.S.M.N. “Jornada” στις Η.Π.Α..

Σχήμα 108. Χρονοσειρά εξαγόμενης από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Baghdadi et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τον σταθμό του δικτύου I.S.M.N. “Jornada” στις Η.Π.Α..

Σχήμα 109. Διάγραμμα διασποράς εξαγόμενης από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Baghdadi et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τον σταθμό του δικτύου I.S.M.N. “Williams 35 NW” στις Η.Π.Α..

Σχήμα 110. Χρονοσειρά εξαγόμενης από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Baghdadi et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τον σταθμό του δικτύου I.S.M.N. “Williams 35 NW” στις Η.Π.Α..

Σχήμα 111. Διάγραμμα διασποράς εξαγόμενης από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Baghdadi et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τον σταθμό του δικτύου I.S.M.N. “Damukiyah” στο Σουδάν.

Σχήμα 112. Χρονοσειρά εξαγόμενης από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Baghdadi et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τον σταθμό του δικτύου I.S.M.N. “Damukiyah” στο Σουδάν.

Σχήμα 113. Διάγραμμα διασποράς από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Baghdadi et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. “Tondikiboro” και “Wankama” στον Νίγηρα.

Σχήμα 114. Χρονοσειρά από το μοντέλο “I.E.M.” μήκους συσχέτισης βάσει Baghdadi et al. 2007 και μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. “Tondikiboro” και “Wankama” στον Νίγηρα.

Σχήμα 115. Διάγραμμα διασποράς της εξαγόμενης από το μοντέλο I.E.M. (μήκος συσχέτισης κατά Taconet and Ciarletti et al. 2007 και εκθετικής συνάρτησης αυτοσυσχέτισης κατά Fung et al. 2010) και της μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας.

Σχήμα 116. Χρονοσειρά της εξαγόμενης από το μοντέλο I.E.M. (μήκος συσχέτισης κατά Taconet and Ciarletti et al. 2007 και εκθετικής συνάρτησης αυτοσυσχέτισης κατά Fung et al. 2010) και της μετρημένης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας.

Σχήμα 117. Χρονοσειρές υετού (ύψους βροχόπτωσης) και ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας μεταξύ των ημερομηνιών 25/04/2016 (έναρξη λειτουργία του δορυφόρου Sentinel-1B) και 04/09/2019.

Σχήμα 118. Διάγραμμα ροής στο SN.A.P. των απαιτούμενων διεργασιών για την προεπεξεργασία των S.L.C. απεικονίσεων.

Σχήμα 119. Διάγραμμα ροής στο SN.A.P. των απαιτούμενων διεργασιών για την συμπροσαρμογή των S.L.C. απεικονίσεων.

Σχήμα 120. Διάγραμμα ροής στο SN.A.P. των απαιτούμενων διεργασιών για την παραγωγή των σετ συμβολογραμμάτων - εικόνων συνάφειας φάσης των αντίστοιχων S.L.C. απεικονίσεων.

Σχήμα 121. Εικόνες συνάφειας φάσης για την τροχιά 100 όπου φαίνεται ο σταθμός “Ford Dry Lake” για τις ημερομηνίες λήψης S.L.C. απεικονίσεων 03/10/2018, 15/10/2018 και 27/10/2018.

Σχήμα 122. Εικόνα κλεισίματος φάσης για την τροχιά 100 (άνω αριστερή εικόνα) μαζί με απόσπασμα της ίδιας περιοχής από τον χάρτη κάλυψης γης της ESRI και δορυφορική εικόνα (κάτω εικόνα).

Σχήμα 123. Εικόνες συνάφειας φάσης για την τροχιά 166 όπου φαίνεται ο σταθμός “Ford Dry Lake” για τις ημερομηνίες λήψης S.L.C. απεικονίσεων 02/10/2018, 14/10/2018 και 26/10/2018.

Σχήμα 124. Εικόνα κλεισίματος φάσης για την τροχιά 166 (άνω αριστερή εικόνα) μαζί με απόσπασμα της ίδιας περιοχής από τον χάρτη κάλυψης γης της ESRI και δορυφορική εικόνα (κάτω εικόνα).

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Πίνακας στον οποίο παρατηρούνται για κάθε σταθμό του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α. οι χαρακτηρισμοί κάλυψης γης κατά WorldCover, η κλιματική ταξινόμηση με βάση την κλίμακα του Korppen καθώς και οι χρονιαίοι μέσοι όροι των δεικτών N.D.V.I. και N.D.M.I. από Sentinel-2 απεικονίσεις.

Πίνακας 2. Πίνακας στον οποίο παρατηρούνται για κάθε σταθμό του δικτύου I.S.M.N. στο Σουδάν και τον Νίγηρα. οι χαρακτηρισμοί κάλυψης γης κατά WorldCover, η κλιματική ταξινόμηση με βάση την κλίμακα του Korppen καθώς και οι χρονιαίοι μέσοι όροι των δεικτών N.D.V.I. και N.D.M.I. από Sentinel-2 απεικονίσεις.

Πίνακας 3. Πίνακας απεικόνισης βασικών στοιχείων σχετιζόμενων με τις επίγειες μετρήσεις στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α..

Πίνακας 4. Πίνακας απεικόνισης βασικών στοιχείων σχετιζόμενων με τις επίγειες μετρήσεις στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στο Σουδάν και τον Νίγηρα.

Πίνακας 5. Πίνακας απεικόνισης βασικών στοιχείων σχετιζόμενων με τις επίγειες μετρήσεις στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στην Αυστραλία.

Πίνακας 6. Πίνακας απεικόνισης βασικών στοιχείων σχετιζόμενων με τις SAR απεικονίσεις (από μόνο μια τροχιά) στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α..

Πίνακας 7. Πίνακας απεικόνισης βασικών στοιχείων σχετιζόμενων με τις SAR απεικονίσεις στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. (από μόνο μια τροχιά) στο Νίγηρα και το Σουδάν.

Πίνακας 8. Πίνακας απεικόνισης βασικών στοιχείων σχετιζόμενων με τις SAR απεικονίσεις στους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. (από μόνο μια τροχιά) στην Αυστραλία.

Πίνακας 9. Απόσπασμα συγκεντρωτικού πίνακα που περιέχει επίγεια δεδομένα (εδαφική υγρασία, υετός), δορυφορικά δεδομένα (συντελεστές οπισθοσκέδασης στις HV και VV πολώσεις) και άλλα στοιχεία (πραγματική και φανταστική συνιστώσα σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς).

Πίνακας 10. Απόσπασμα πίνακα μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης (βάσει των μοντέλων Dubois, Νέου Εμπειρικού Μοντέλου, Μοντέλου Oh και I.E.M.) όπου φαίνεται και η τιμή του δείκτη τραχύτητας $kHrms$ για την οποία επιτυγχάνεται η μικρότερη διαφορά των μέσων όρων μεταξύ SAR και μοντελοποιημένων συντελεστών οπισθοσκέδασης.

Πίνακας 11. Πίνακας στατιστικών και περιγραφικών στοιχείων ανάλυσης/σύγκρισης SAR και μοντελοποιημένων κατά Dubois συντελεστών οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N..

Πίνακας 12. Πίνακας στατιστικών και περιγραφικών στοιχείων ανάλυσης/σύγκρισης SAR και μοντελοποιημένων κατά N.E.M. συντελεστών οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. και τις πολώσεις VH και VV.

Πίνακας 13. Πίνακας στατιστικών και περιγραφικών στοιχείων ανάλυσης/σύγκρισης SAR και μοντελοποιημένων κατά Oh συντελεστών οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. και τις πολώσεις VH και VV.

Πίνακας 14. Πίνακας στατιστικών και περιγραφικών στοιχείων ανάλυσης/σύγκρισης SAR και μοντελοποιημένων κατά I.E.M. συντελεστών οπισθοσκέδασης για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. και την πόλωση VV.

Πίνακας 15. Συγκεντρωτικός πίνακας στατιστικών και περιγραφικών στοιχείων ανάλυσης/σύγκρισης μετρημένων και μοντελοποιημένων τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στις Η.Π.Α. (σημείωση: στους σταθμούς “Sevilleta” και “Spooky” δεν βρέθηκε κάποια ουσιαστική συσχέτιση μεταξύ μετρημένης και μοντελοποιημένης από οποιοδήποτε μοντέλο οπισθοσκέδασης εξαγόμενης ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας).

Πίνακας 16. Συγκεντρωτικός πίνακας στατιστικών και περιγραφικών στοιχείων ανάλυσης/σύγκρισης μετρημένων και μοντελοποιημένων τιμών ογκομετρικής εδαφικής υγρασίας για τους σταθμούς του δικτύου I.S.M.N. στα Αφρικανικά κράτη.

Πίνακας 17. Πίνακας βασικών στοιχείων S.L.C. απεικονίσεων αριθμού σχετικής τροχιάς 100 που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 18. Πίνακας βασικών στοιχείων S.L.C. απεικονίσεων αριθμού σχετικής τροχιάς 166 που χρησιμοποιήθηκαν.