



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

ΔΠΜΣ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΣΤΡΕΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΜΕ
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΟΠΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΚΩΝ
ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΦΑΛΑΓΓΑΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

DEPARTMENT OF TOPOGRAPHY-REMOTE SENSING
LABORATORY

M.Sc. GEOINFORMATICS

WATER STRESS ESTIMATION ON COTTON PLANTS WITH
MULTISPECTRAL AND THERMAL REMOTELY SENSED DATA

Master Thesis

FALANGAS ALEXANDROS

Athens, 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

ΔΠΜΣ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΣΤΡΕΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΜΕ
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΟΠΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΚΩΝ
ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΦΑΛΑΓΓΑΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

Επιβλέπων: Καράντζαλος Κων/νος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

(Υπογραφή)

.....

Κων/νος Καράντζαλος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Δημήτριος Αργιαλάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Μαρία Παπαδοπούλου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Για την άρδευση καλλιεργειών παγκοσμίως, χρησιμοποιείται ποσοστό μεγαλύτερο του 70% γλυκού νερού (Foley et al. 2011), για αυτό η κατάλληλη χρήση του αποτελεί μείζον ζήτημα, είτε από οικονομικής, είτε από περιβαλλοντικής σκοπιάς. Νέες τεχνολογίες και μέθοδοι τηλεπισκόπησης μπορούν να συνεισφέρουν σε αυτό το σκόπο. Σε αυτή την κατεύθυνση, στη παρούσα εργασία εξετάστηκε η δυνατότητα εκτίμησης του υδατικού στρες σε καλλιέργειες βαμβακιού, από θερμικά και οπτικά δεδομένα τηλεπισκόπησης. Για την εκτίμηση του υδατικού στρες, αρχικά χρησιμοποιήθηκαν 3300 στρεμματων αγροτεμαχίων βαμβακιού στα οποία ήταν γνωστή η τοποθεσία τους για τον υπολογισμό των ακραίων τιμών θερμοκρασίας βλάστησης και εδάφους μέσω του χώρου $LST - f_v$, όπως προέκυψε από τα δεδομένα της αποστολής ECOSTRESS και Sentinel 2 σε όλες τις διαθέσιμες ημερομηνίες. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε διαμερισμός της θερμοκρασίας LST των δεδομένων ECOSTRESS, σε θερμοκρασία εδάφους (T_s) και θερμοκρασία βλάστησης (T_v) μέσω ενός μοντέλου βασισμένο στις αρχές του Two-Source Energy Balance Model (J.M. Norman, Kustas, and Humes 1995), όπως προτάθηκε από τους Olivera-Guerra, Merlin, and Er-Raki 2020. Το τελικό βήμα της εργασίας, ήταν η ποσοτικοποίηση του υδατικού στρες μέσω του συντελεστή μείωσης της διαδικασίας της εξατμισοδιαπνοής K_s . Τέλος, η μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε 4 αγροτεμάχια 160 στρεμμάτων στο σύνολο, των οποίων είχαν γνωστοποιηθεί οι πρακτικές που ακολουθήθηκαν από τον αγρότη και τα αποτελέσματα ήταν ενθαρυντικά. Οι τιμές του συντελεστή K_s διαφοροποιούνταν κατά την καλλιεργητική περίοδο, εκτιμώντας κατάλληλα τη διαφορά υγρασίας στο έδαφος μετά από εφαρμογή άρδευσης ή βροχόπτωση.

Λέξεις Κλειδιά: Υδατικό Στρες, FAO-56 K_s , Επιφανειακή Θερμοκρασία Εδάφους, Sentinel-2, ECOSTRESS

Abstract

Irrigated agriculture consumes more than 70% of freshwater at global scale (Foley et al. 2011), thus managing effectively the available water reserves through efficient irrigation practices is crucial, both from an economic and an ecological point of view. Remote sensing technologies can be exploited towards this end. In the current thesis, water stress estimation in parcels of cotton was assessed, utilizing both thermal and optical remote sensing data. Ground truth data from 3.3 km^2 cotton parcels with known location were collected for the estimation of temperature endmembers with $LST - fv$ feature space computed based on the ECOSTRESS thermal data. Sentinel 2 multispectral data were also collected for all available acquisition dates. Depending on date availability, the partitioning method was based on the $LST - fv$ feature space by incorporating the assumptions of the two-source surface energy balance (TSEB) formalisms (J.M. Norman, Kustas, and Humes 1995) as proposed in Olivera-Guerra, Merlin, and Er-Raki 2020 featured work. The last step was the quantification of water stress through FAO water stress coefficient K_s . The developed methodology was applied in 4 cotton parcels of 0.16 km^2 in total, for which agricultural practices were known. Experimental results and analysis appear quite promising. K_s coefficient values fluctuated during the growing season while estimating the difference in soil moisture after an irrigation event or rainfall.

Keywords: Water Stress, FAO-56 K_s , Land Surface Temperature, Sentinel-2, ECOSTRESS

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη μεταπτυχιακή μου εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην περάτωσή της. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια. Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αν.Καθ. Κωνσταντίνο Καράντζαλο όπου με κατεύθυνε επιστημονικά και στη συνέχεια τους διδακταρικούς φοιτητές Κλεάνθη Καράμβαση, Ζαχαρία Κανδυλάκη και Χριστίνα Καρακίζη από το εργαστήριο τηλεπισκόπησης της ΣΑΤΜ ΕΜΠ για την υποστήριξη τους. Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τις μεταπτυχιακές φοιτήτριες Ολυμπία Γούναρη και Αντωνία Κουρνοπούλου για την συμβολή τους.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Αντικείμενο και στόχοι	1
1.2	Κίνητρο και συνεισφορά	1
1.3	Δομή	2
2	Θεωρητικό μέρος	3
2.1	Καλλιέργεια Βαμβακιού	3
2.2	Βασικές Έννοιες σχετικά με την εκτίμηση του υδατικού στρες	4
2.2.1	Ο συντελεστής K_s , η μέθοδος εκτίμησης εξατμισοδιαπνοής και η διαδικασία $FAO - 2Kc$	4
2.2.2	Μοντέλα ισοζυγίου ενέργειας επιφάνειας (SEB)	6
2.3	Σχετική βιβλιογραφία	7
2.4	Περιγραφή δεδομένων	8
3	Μεθοδολογία	9
3.1	Περιοχή Μελέτης	9
3.1.1	Επίγεια Δεδομένα Ελέγχου	10
3.2	Δορυφορικά Δεδομένα	12
3.2.1	Δορυφορικά Πολυφασματικά Δεδομένα Sentinel 2	12
3.2.2	Δορυφορικά Θερμικά Δεδομένα ECOSTRESS	17
3.2.3	Υπολογισμός f_v από τα δεδομένα Sentinel 2	20
3.2.4	Συνθετικά Δεδομένα Sentinel 2 f_v	23
3.3	Διαμερισμός των Θερμοκρασιών Επιφάνειας (LST)	24
3.3.1	Υπολογισμός ακραίων τιμών θερμοκρασίας	24
3.3.2	Αλγόριθμος Διαμερισμού Θερμοκρασίας	25
3.4	Υπολογισμός του συντελεστή Υδατικού Στρες K_s	27
4	Αποτελέσματα και Αξιολόγηση	28
4.1	Αποτελέσματα υπολογισμού f_v	28
4.2	Αποτελέσματα υπολογισμού ακραίων τιμών θερμοκρασίας	31
4.3	Αποτελέσματα διαμερισμού της θερμοκρασίας LST σε T_v και T_s	35
4.4	Αποτελέσματα υπολογισμού του συντελεστή υδατικού στρες K_s και αξιολόγηση	40
5	Συζήτηση	51
5.1	Συμπεράσματα	51
5.1.1	Δορυφορικά Δεδομένα	51
5.1.2	Διαμερισμός LST	51
5.1.3	Συντελεστής Υδατικού Στρες K_s	52

5.2 Μελλοντική έρευνα 52

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται το αντικείμενο και οι στόχοι της παρούσας εργασίας. Επίσης, παρατίθενται το κίνητρο, καθώς και μία σύντομη περιγραφή των κεφαλαίων που θα ακολουθήσουν.

1.1 Αντικείμενο και στόχοι

Αντικείμενο της εργασίας αποτελούσε η ανίχνευση υδατικού στρες σε ποτιστικές καλλιέργειες βαμβακιού με απώτερο σκοπό την βέλτιστη διαχείριση της άρδευσης και του αρδεύσιμου νερού. Για την άρδευση καλλιεργειών παγκοσμίως, χρησιμοποιείται ποσοστό μεγαλύτερο του 70% νερού (Foley et al. 2011) για αυτό η κατάλληλη χρήση του αποτελεί μείζον ζήτημα. Στις περιοχές με μεσογειακό κλίμα παρατηρείται έντονα το πρόβλημα της λειψυδρίας κάτι που τα επόμενα χρόνια αναμένεται να γίνει πιο οξύ, λόγω της παρατηρούμενης ανοδικής τάσης της θερμοκρασίας και της μη κανονικότητας στις βροχοπτώσεις λόγω κλιματικής αλλαγής (Olivera-Guerra, Merlin, and Er-Raki 2020). Από την άλλη πλευρά, μείζον ζήτημα αποτελεί και για τους αγρότες, καθώς το υδατικό στρες συνδέεται άμεσα με την τελική παραγωγή. Επίσης, στην περίπτωση καλλιεργειών που μεγαλύτερη σημασία έχει η ποιότητα, όπως το αμπέλι, το υδατικό στρες αποτελεί σημαντικό συντελεστή.

Ο στόχος της εργασίας ήταν να εξεταστεί ένας συνδυασμός οπτικών και θερμικών δεδομένων τηλεπισκόπησης με σκοπό τη διερεύνηση και εξαγωγή μιας μεθοδολογίας που θα ανιχνεύει το υδατικό στρες κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

1.2 Κίνητρο και συνεισφορά

Κίνητρο της συγκεκριμένης εργασίας αποτελεί η ανάγκη για καταλληλότερη και πιο στοχευμένη χρήση των υδάτινων πόρων από τους αγρότες, μέσω της γνώσης του επιπέδου του υδατικού στρες των φυτών.

Η υλοποίηση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, πραγματοποιήθηκε με ελεύθερα δορυφορικά δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης Sentinel-2 της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (ESA) και ECOSTRESS της Αμερικανικής Διαστημικής Υπηρεσίας (NASA). Τα δεδομένα αυτά καλύπτουν τις περισσότερες αγροτικές εκτάσεις παγκοσμίως, συνεπώς η εφαρμογή της, μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μεγάλη κλίμακα με χαμηλό κόστος.

1.3 Δομή

Στο κεφάλαιο 2, παρατίθενται αρχικά κάποιες θεωρητικές έννοιες σχετικά με το αντικείμενο της εργασίας, καθώς και εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί διεθνώς, με σκοπό την εκτίμηση του υδατικού στρες στα φυτά. Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 3, αναλύεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αλλά και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν. Στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα τελικά αποτελέσματα. Τέλος, στο κεφάλαιο 5.2, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προοπτικές που προκύπτουν από το σύνολο της εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό μέρος

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται αρχικά κάποιες βασικές έννοιες σχετικές με το αντικείμενο της εργασίας και στη συνέχεια προϋπάρχουσες εργασίες σχετικές με το αντικείμενο μελέτης. Επίσης, πραγματοποιείται μία σύντομη περιγραφή των δεδομένων που αξιοποιήθηκαν και του πλαισίου της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε.

2.1 Καλλιέργεια Βαμβακιού

Το βαμβάκι είναι φυτό τροπικών και υποτροπικών περιοχών. Το είδος *Gossypiumhirsutum* είναι το κυρίως καλλιεργούμενο είδος σήμερα, αφού η παραγωγή του αντιπροσωπεύει περίπου το 90% της παγκόσμιας παραγωγής. Στην Ελλάδα αποτελεί την πιο δυναμική καλλιέργεια ανάμεσα στα φυτά μεγάλης καλλιέργειας και το πρώτο, από άποψη συναλλαγματικής αξίας, αγροτικό προϊόν.



(a) Το βαμβάκι κατά το φαινολογικό στάδιο της ανθοφορίας.



(b) Το βαμβάκι κατά το τελικό φαινολογικό στάδιο της ωρίμανσης.

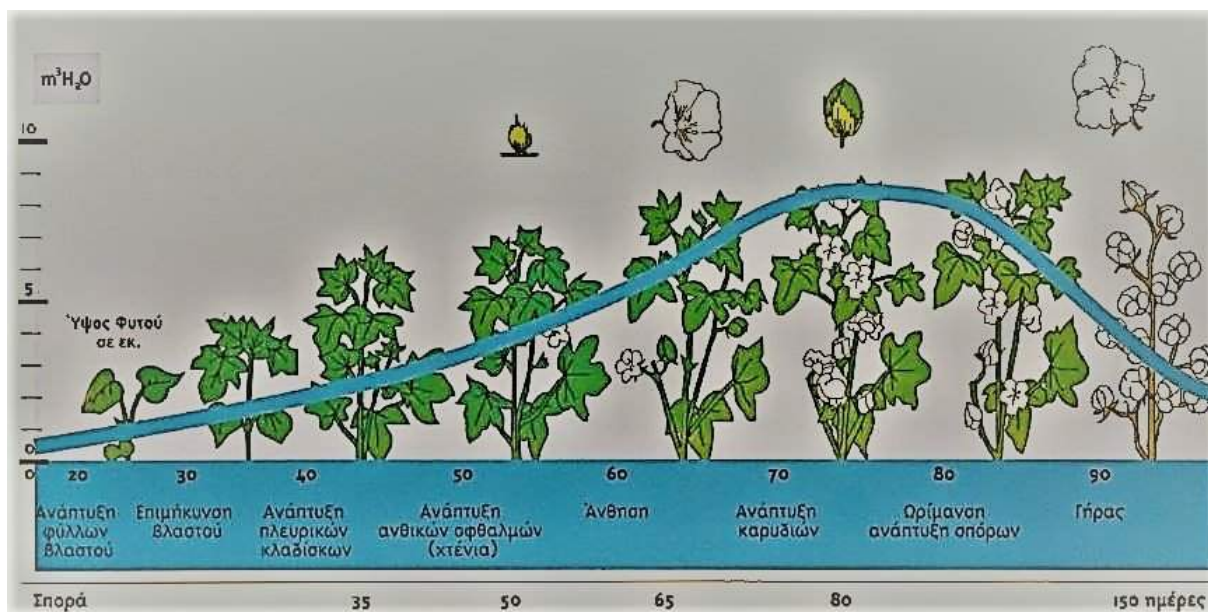
Εικόνα 2.1. Το βαμβάκι κατά τα φαινολογικά στάδια a) της ανθοφορίας και b) της ωρίμανσης.

Τα φυτά είναι ετήσιοι θάμνοι ύψους 1 έως 1.5 με λίγους φυλλοφόρους βλαστούς. Τα φύλλα σχηματίζουν 3 έως 5 λοβούς, το σχήμα των βρακτίων είναι τριγωνικό με 4 έως 12 δόντια και τα καρύδια στρογγυλοειδή επιμήκη με 3 έως 5 χώρους. Οι σπόροι, καλύπτονται από παχύ στρώμα ινών και συνήθως από πυκνό χνούδι. Όπως είναι γνωστό από την βιβλιογραφία, το βαμβάκι είναι φυτό που απαιτεί υψηλές τιμές θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της αύξησης και ανάπτυξής του, ώστε να αποδώσει υψηλές τιμές βιομάζας.

Κατά την περίοδο καλλιέργειάς του, απαιτεί μεγάλες ποσότητες σε νερό. Λόγο των μη διαθέσιμων άφθονων νερών, πρέπει να γίνεται σωστή εκμετάλλευση ώστε με τη λιγότερη ποσότητα νερού να παρουσιαστούν ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά και την τελική απόδοση της καλλιέργειας. Αν το νερό δεν είναι επαρκές κατά την καλλιεργήσιμη περίοδο, τότε οι αποδόσεις και η ποιότητα του μειώνεται δραματικά.

Ο βιολογικός κύκλος του βαμβακιού διαιρείται σε 5 επιμέρους φαινολογικά στάδια:

1. Στάδιο φυτρώματος (Διάρκεια 8-10 ημέρες).
2. Στάδιο πρώτης ανάπτυξης (Διάρκεια 35-50 ημέρες).
3. Στάδιο προάνθησης (Διάρκεια 20-25 ημέρες).
4. Στάδιο ανθοφορίας-καρποφορίας (Διάρκεια 45-50 ημέρες).
5. Στάδιο ωρίμανσης (Διάρκεια 45-70 ημέρες).



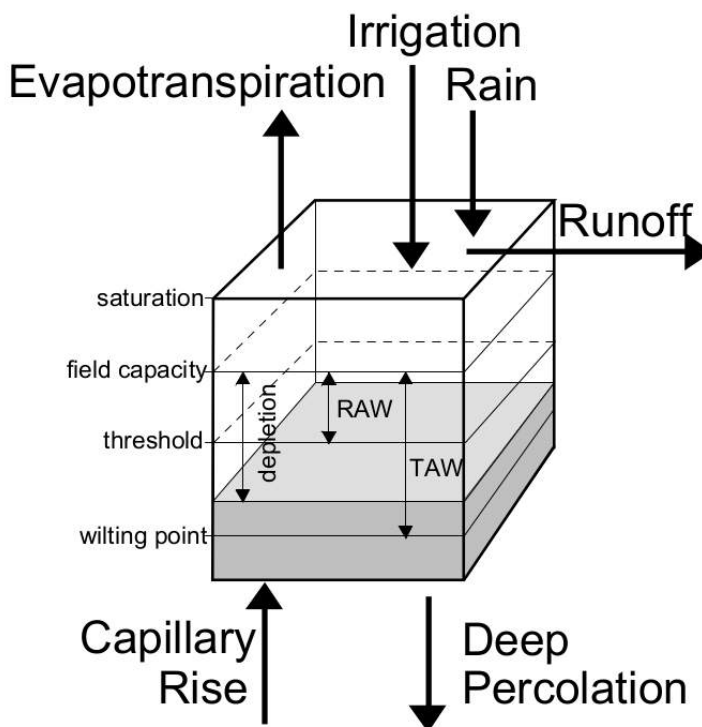
Εικόνα 2.2. Τα φαινολογικά στάδια του βαμβακιού και οι απαιτήσεις σε νερό σε κάθε στάδιο. Πηγή: [agravia](#)

Τα βασικά στάδια ανάπτυξης του βαμβακιού που επηρεάζονται περισσότερο από την άρδευση, είναι η περίοδος ανάπτυξης των χτενιών, η άνθηση, η ανάπτυξη και η ωρίμανση των καρυδιών. Η σημαντικότερη περίοδος στην καλλιέργεια του βαμβακιού είναι η περίοδος της προάνθησης και της ανθοφορίας-καρποφορίας. Κατά τα πρώτα φαινολογικά στάδια της ανάπτυξής του, υπάρχει ανοχή νερού, οπότε η περίσσεια νερού στο έδαφος δεν ενισχύει την καλλιέργεια.

2.2 Βασικές Έννοιες σχετικά με την εκτίμηση του υδατικού στρες

2.2.1 Ο συντελεστής K_s , η μέθοδος εκτίμησης εξατμισοδιαπνοής και η διαδικασία $FAO - 2Kc$

Η μέθοδος $FAO - 2Kc$, αποτελεί ένα μοντέλο υδατικού ισοζυγίου εξαρτόμενο από μετεωρολογικές μεταβλητές για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ET_0 ή PET , καθώς και τις κατακριμνήσεις και εφαρμογές άρδευσης που συνδυαστικά ορίζουν την συνολική παροχή νερού στο έδαφος. Ο σκοπός της μεθόδου είναι η προσομοίωση της διαθεσιμότητας νερού στο βάθος του ριζικού συστήματος για τις διαδικασίες της εξάτμισής του από το έδαφος και διαπνοής του από τα φυτά.



Εικόνα 2.3. Αναπαράσταση του υδατικού ισοζυγίου στο επίπεδο του ριζικού συστήματος όπως προτάθηκε από τους Allen, Pereira, et al. 1998.

Στην ουσία, η μέθοδος $FAO - 2K_c$ χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής μέσω της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και 3 συντελεστών μείωσης οι οποίοι παρουσιάζονται στη παρακάτω σχέση:

$$ET = (K_s * K_{cb} + K_e) * ET_0 \quad (2.1)$$

όπου K_{cb} είναι ένας συντελεστής που αφορά το φυτό, $K_s \in [0, 1]$ είναι ο συντελεστής υδατικού στρες που αναπαριστά την υδατική κατάσταση του φυτού και λειτουργεί ως συντελεστής μείωσης της διαδικασίας της εξατμισοδιαπνοής, καθώς και ο συντελεστής K_e που αφορά την εξάτμιση του νερού από το έδαφος.

Ο συντελεστής K_s αποτελεί μία αδιάστατη τιμή και υπολογίζεται, σύμφωνα με τους Allen, Pereira, et al. 1998, σε ημερήσια κλίμακα μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_r}{TAW * (1 - p)} \quad (2.2)$$

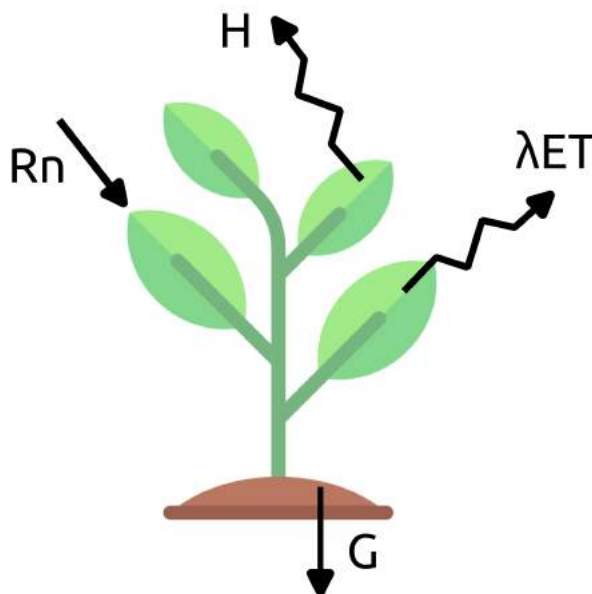
όπου D_r (mm) είναι η εξάντληση του νερού στο έδαφος στο επίπεδο του ριζικού συστήματος, TAW είναι το συνολικό ύψος νερού που το φυτό είναι εφικτό να αντλήσει, και RAW το συνολικό ύψος νερού που μπορεί να αντληθεί χωρίς να βρεθεί υπό υδατικό στρες. Υδατικό στρες παρουσιάζεται όταν το D_r γίνεται μεγαλύτερο από το RAW και συνεπώς ο συντελεστής K_s μικρότερος του 1. Αντίθετα, όταν η τιμή $D_r \leq RAW$ ο συντελεστής K_s είναι ίσος με 1.

2.2.2 Μοντέλα ισοζυγίου ενέργειας επιφάνειας (*SEB*)

Οι πιο σύνθετες μέθοδοι τηλεπισκόπησης για τον υπολογισμό της διαδικασίας της εξατμισοδιαπνοής βασίζονται πίσω από την θεωρία των μοντέλων ισοζυγίου ενέργειας *SEB* (Biggs et al. 2015). Η σχέση του ισοζυγίου ενέργειας είναι:

$$R_n = \lambda ET - H - G \quad (2.3)$$

όπου R_n (Wm^{-2}) η καθαρή ακτινοβολία, G (Wm^{-2}) η ροή θερμότητας στο έδαφος, λET (Wm^{-2}) η λανθάνουσα ροή θερμοκρασίας ή ενέργεια που απορροφάται λόγω της διαδικασίας της εξατμισοδιαπνοής και H (Wm^{-2}) η αισθητή θερμοκρασία.



Εικόνα 2.4. Αναπαράσταση του ενεργειακού ισοζυγίου πάνω από ένα φυτό.

Τα *SEB*, ανάλογα με τις συνιστώσες διαμερισμού, που είναι η επίλυση του ενεργειακού ισοζυγίου για τη βλάστηση και το έδαφος συνδυαστικά ή ξεχωριστά, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

1. Τα Single-Source Energy Balance models (*SSEB*), όπου η βλάστηση με το έδαφος αναλύονται συνδυαστικά
2. ή τα Two-Source Energy Balance models (*TSEB*), όπου η βλάστηση αναλύεται ξεχωριστά με το έδαφος.

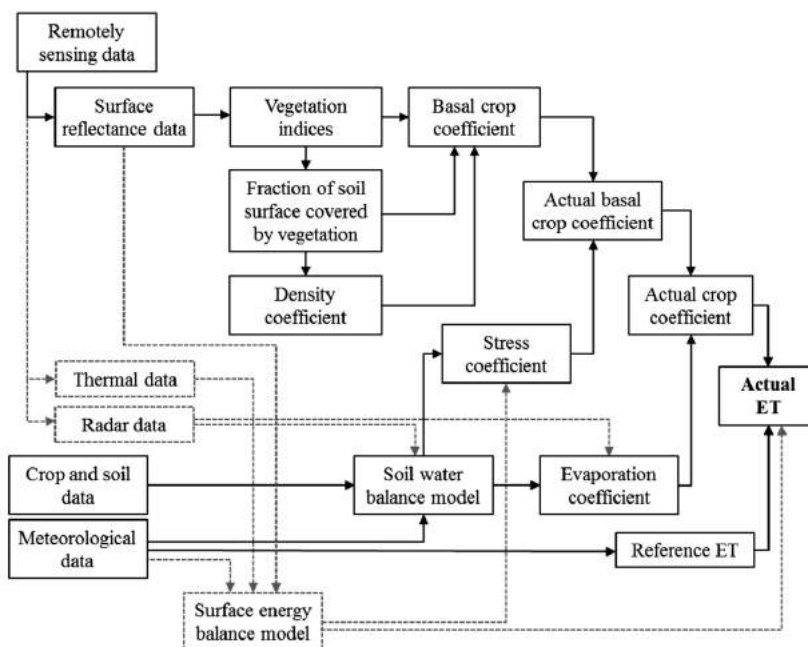
Υπάρχουν μοντέλα που αναλύουν σε παραπάνω από δυο συνιστώσες το ενεργειακό ισοζύγιο όπως το *SEB - 4S* (Merlin et al. 2014), που διαμερίζει τις ροές ενέργειας σε 4 συνιστώσες. Μερικά από τα πιο γνωστά *SSEB* είναι το Surface Energy Balance Algorithm for Land - *SEBAL* (Bastiaanssen et al. 1998), το Simplified Surface Energy Balance Index ή *S - SEBI* (Roerink, Su, and Menenti 2000), το Surface Energy Balance System ή *SEBS* (Z. Su 2002), το Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration ή *METRIC* (Allen, Tasumi, and Trezza 2007) και το Operational Simplified Surface Energy Balance ή *SSEBop* (Senay et al. 2013).

Αντίστοιχα, μερικά από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα *TSEB* είναι το Two-Source Energy Balance Model ή *TSEB* (J.M. Norman, Kustas, and Humes 1995), το Two-

Source Time Integrated Model ή *TSTIM* (Anderson et al. 1997), το Atmosphere-Land Exchange Inverse ή *ALEXI* (Mecikalski et al. 01 Sep. 1999), το Dual Temperature Difference ή *DTD* (John Norman et al. 2000) και το Enhanced Two-Source Evapotranspiration Model for Land ή *ETEML* (Yang et al. 2015).

2.3 Σχετική βιβλιογραφία

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει αναπτυχθεί μία σειρά από στρατηγικές, μεθόδους και τεχνολογίες για την καταλληλότερη χρήση του νερού στις καλλιέργειες. Η ανάγκη της καταλληλότερης χρήσης των υδατικών πόρων, είναι η αυξανόμενη συχνότητα εμφάνισης λειψυδρίας και ξηρασίας στις καλλιέργειες λόγω κλιματικής αλλαγής (Jovanovic et al. 2020). Η σωστή διαχείριση των υδάτων είναι πολύ σημαντική, είτε από οικονομικής, είτε από περιβαλλοντικής σκοπιάς (Kandylakis et al. 2020). Η υιοθέτηση αυτών των πρακτικών και μεθοδολογιών συνεπάγεται την ακριβή ποσοτικοποίηση των απαιτήσεων για νερό από τις καλλιέργειες μέσω των συντελεστών του FAO-56.



Εικόνα 2.5. Διάγραμμα ροής με τις μεθοδολογίες για τον υπολογισμό των συντελεστών του FAO-2Kc.

Τα δεδομένα θερμοκρασιών επιφάνειας *LST* και τα οπτικά δεδομένα τηλεπισκόπησης, έχουν χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εργασιών διεθνώς σε συνδυασμό με τις μεθόδους που προτάθηκαν από τον *FAO*. Πιο πρόσφατα, χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή του συντελεστή υδατικού στρες K_s (DeJonge et al. 2015; Ihuoma and Madramootoo 2017; Kullberg, DeJonge, and Chávez 2017). Οι πιο πρόσφατες εργασίες είναι αυτές των Olivera-Guerra, Merlin, Er-Raki, et al. 2018 και Olivera-Guerra, Merlin, and Er-Raki 2020.

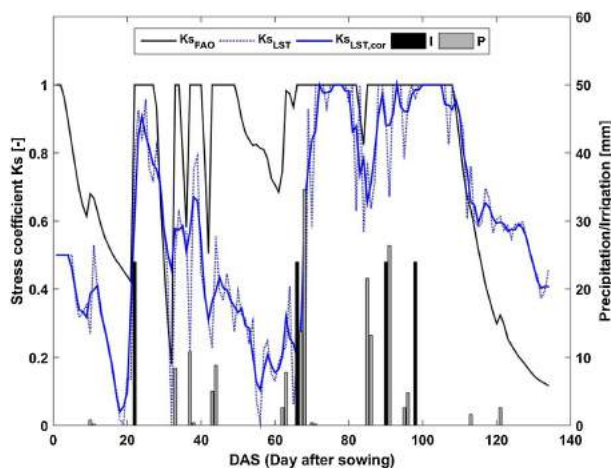
Πιο συγκεκριμένα, οι Olivera-Guerra, Merlin, and Er-Raki 2020, χρησιμοποίησαν οπτικά και θερμικά δεδομένα Landsat 7-8 για την εκτίμηση του υδατικού στρες. Επίσης, μέσω ενός μοντέλου υδατικού ισοζυγίου που ανέπτυξαν, εκτίμησαν τις πιθανές ημερομηνίες εφαρμογής άρδευσης στα αγροτεμάχια που μελέτησαν, καθώς και το ύψος νερού. Η προσέγγισή τους χωριζόταν σε 4 βήματα:

1. Το διαμερισμό των δεδομένων θερμοκρασίας επιφάνειας Landsat 7-8 σε επιμέρους

συνιστώσες θερμοκρασίας βλάστησης T_v και T_s , μέσω ενός μοντέλου που ανέπτυξαν με βάση το *TSEB* (J.M. Norman, Kustas, and Humes 1995) και του χώρου $LST - f_v$.

2. Τον υπολογισμό του συντελεστή K_s από τη συνιστώσα θερμοκρασίας βλάστησης.
3. Την εκτίμηση της υγρασίας μέσω του συντελεστή K_s .
4. Την εξαγωγή των πιθανών ημερομηνιών και του ύψους νερού μέσω της σχέσης υδατικού ισοζυγίου, όπως προτάθηκαν από τους Allen, Pereira, et al. 1998.

Σε άλλη εργασία οι Olivera-Guerra, Merlin, Er-Raki, et al. 2018 χρησιμοποίησαν επίγεια LST δεδομένα σε ημερήσια κλίμακα για την εκτίμηση των συντελεστών του *FAO - 2Kc*. Για τον υπολογισμό του συντελεστή K_s , χρησιμοποίησαν και πάλι τα θερμικά επίγεια δεδομένα, και για τον διαμερισμό των θερμοκρασιών ένα συνδυασμό του ενός *SEB* όπως προτάθηκε από τους Stefan et al. 2015 σε συνδυασμό με την απεικόνιση των δεδομένων στο χώρο $LST - f_v$ αντίστοιχα με την προηγούμενη εργασία.



Εικόνα 2.6. Ο συντελεστής υδατικού στρες K_s , όπως τον υπολόγισαν οι Olivera-Guerra, Merlin, Er-Raki, et al. 2018 σε ημερήσια κλίμακα.

2.4 Περιγραφή δεδομένων

Για τη διεκπαιρέωση της εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι δεδομένων τηλεπισκόπησης. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν θερμικά δεδομένα της αποστολής ECOSTRESS, τα οποία είναι πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης, ικανής για τη μελέτη σε επίπεδο αγροτεμαχίου και πολύ υψηλής χρονικής ανάλυσης, παρ'ότι η αποστολή βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο.

Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν πολυφασματικά δεδομένα από την αποστολή Sentinel 2, που είναι συνδυασμός δύο δίδυμων δορυφόρων, ικανών για καταγραφή δεδομένων πολύ υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης στο ορατό, το εγγύς υπέρυθρο και μέσο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Τέλος, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας συλλέχθηκαν πληροφορίες για 4 αγροτεμάχια, των οποίων ήταν γνωστές οι πρακτικές που εφάρμοσε ο αγρότης, καθώς και οι τοποθεσίες επιπλέον 3300 στρεμμάτων βαμβακιού.

Κεφάλαιο 3

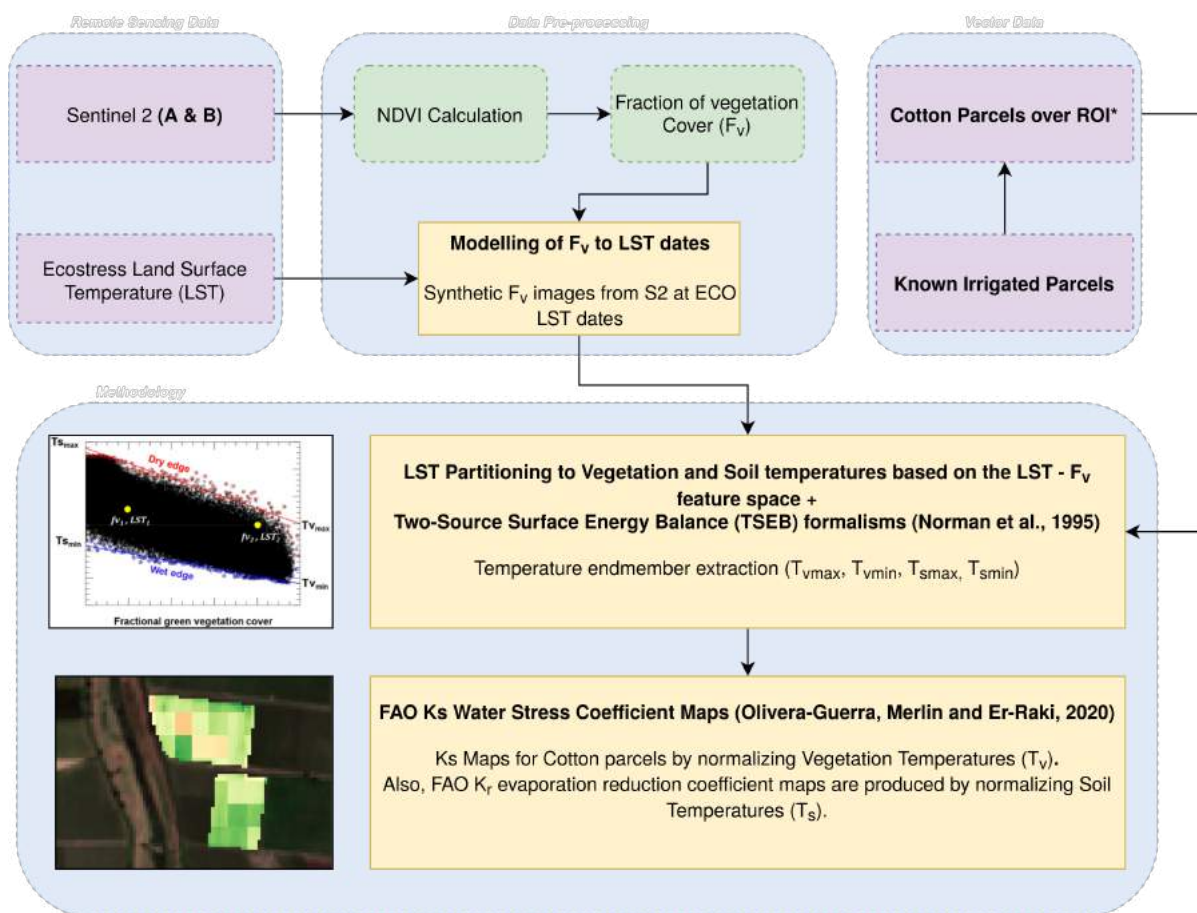
Μεθοδολογία

Στις παρακάτω ενότητες θα αναλυθούν τα βήματα και οι επεξεργασίες που ακολουθήθηκαν για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων. Η εικόνα 3.1 αποτελεί το συνολικό διάγραμμα μεθοδολογίας της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, στην ενότητα 3.1 αναλύεται η περιοχή μελέτης, καθώς και τα επίγεια δεδομένα που συλλέχθηκαν, ενώ στην ενότητα 3.2 αναλύονται τα δορυφορικά πολυφασματικά και θερμικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι διαδικασίες επεξεργασίας τους. Στην ενότητα 3.3 αναλύεται η διαδικασία για τον διαμερισμό των θερμοκρασιών επιφάνειας σε θερμοκρασίες βλάστησης και εδάφους και τέλος στην ενότητα 3.4 αναλύεται η διαδικασία για την εξαγωγή του συντελεστή K_s , όπως προτάθηκε από την εργασία των Allen, Pereira, et al. 1998.

3.1 Περιοχή Μελέτης

Ως περιοχή μελέτης όριστηκε μία ζώνη αγροτεμαχίων με βαμβάκι, ανατολικά της πόλης του Παλαμά, Καρδίτσα, Θεσσαλία, Ελλάδα ($39.4690^\circ B$, $22.0823^\circ A$). Σύμφωνα με στοιχεία του Μετεωρολογικού Υποσταθμού Παλαμά, το κλίμα της περιοχής μελέτης μπορεί να θεωρηθεί ως ηπειρωτικό με εναλλαγή υγρής και ξηρής περιόδου. Η μέση ετήσια θερμοκρασία ανέρχεται σε $15.3^\circ C$. Θερμότερος μήνας είναι ο Ιούλιος (μέση θερμοκρασία $27.6^\circ C$) και ψυχρότερος ο Ιανουάριος (μέση θερμοκρασία $3.4^\circ C$). Την περιοχή διασχίζουν οι ποταμοί Ονόχωνος, Καλέντζης, Ενιπέας και Φαρσαλίτης καθώς και πολλοί χείμαρροι. Οι κύριες καλλιέργειες της περιοχής είναι το βαμβάκι, το τριφύλλι, το καλαμπόκι και το σιτάρι. Το βαμβάκι, που αποτελεί και την καλλιέργεια ενδιαφέροντος, σπέρνεται στη περιοχή την περίοδο Απριλίου-Μαΐου και συλλέγεται την περίοδο Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου.

Στο διάγραμμα 3.2 παρουσιάζονται η μέση θερμοκρασία ανά ημέρα και το ύψος των βροχοπτώσεων για την καλλιεργητική περίοδο του 2020 στην περιοχή μελέτης. Τα δεδομένα κατακρινήσεων προήλθαν από το πρόγραμμα ERA5 του Ευρωπαϊκού Ινστιτούτου ECMWF, ενώ των ημερίσιων θερμοκρασιών από το πρόγραμμα POWER της NASA. Σύμφωνα με τα δεδομένα, στην περιοχή μελέτης, το συνολικό ύψος βροχοπτώσεων ήταν 111 mm . Η μέγιστη θερμοκρασία την καλλιεργητική περίοδο του 2020 ήταν στις 31-07 με θερμοκρασία $32^\circ C$, ενώ η ελάχιστη θερμοκρασία ήταν στις 27-05 με τιμή $15^\circ C$.



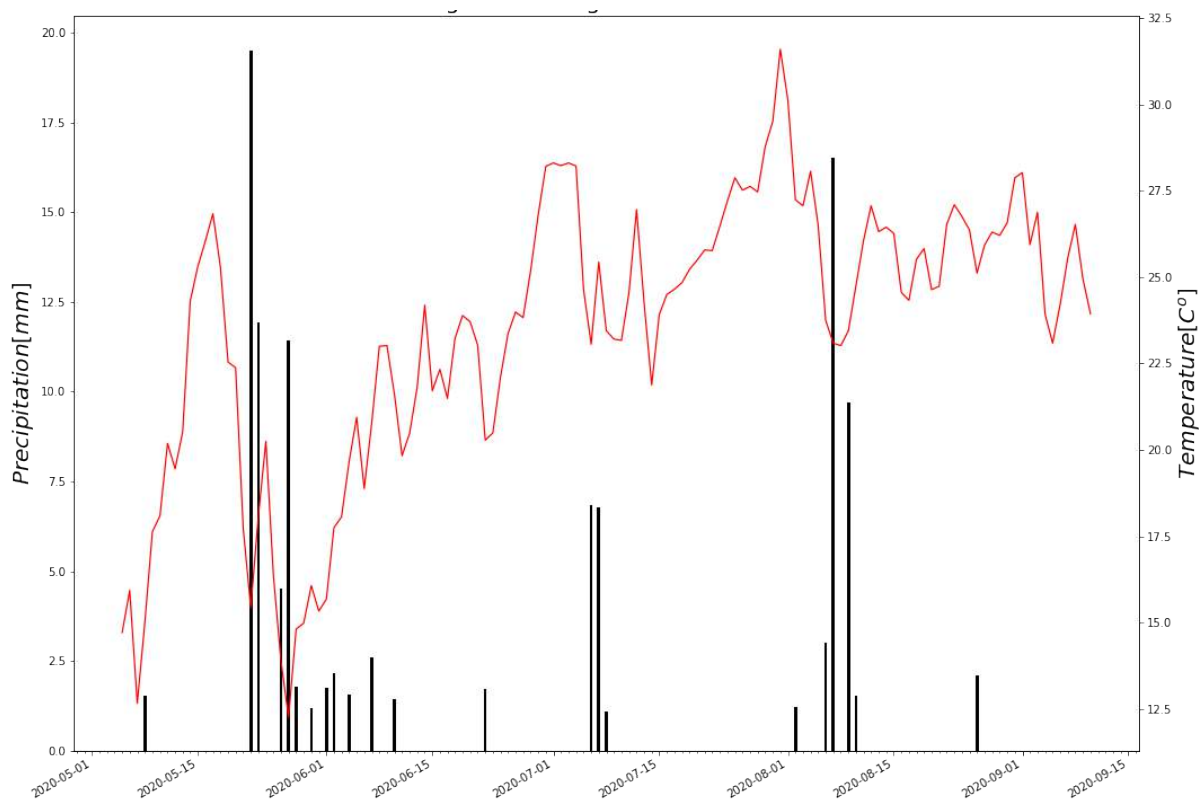
Εικόνα 3.1. Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας της εργασίας.

3.1.1 Επίγεια Δεδομένα Ελέγχου

Για την καλλιεργητική περίοδο του 2020, συλλέχθηκαν δεδομένα άρδευσης και σημαντικών παραμέτρων για 4 αγροτεμάχια (P0, P1, P2, P3). Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα αφορούσαν το ύψος νερού που εφαρμοζόταν σε κάθε πότισμα, ο τρόπος ποτίσματος, καθώς και η ημερομηνία σποράς. Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα δεδομένα.

Στο αγροτεμάχιο P0 εφαρμόστηκαν στο σύνολο 151 mm νερού σε 7 εφαρμογές άρδευσης. Ο τύπος χώματος του αγροτεμαχίου είναι αργιλοπυλώδης (13% άμμος, 28% ύλις, 57% άργιλος) και η ημερομηνία σποράς ήταν 23-04-2020. Το εμβαδό του αγροτεμαχίου είναι 56 στρέμματα. Όμοια, στο αγροτεμάχιο P1 εφαρμόστηκαν στο σύνολο 150 mm ύψος νερού κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου σε 6 εφαρμογές. Ο τύπος χώματος του αγροτεμαχίου είναι ο ίδιος με το P0 και η ημερομηνία σποράς ήταν 24-04-2020. Το εμβαδό του αγροτεμαχίου είναι 36 στρέμματα. Στο αγροτεμάχιο P2 πραγματοποιήθηκε μόνο μία εφαρμογή άρδευσης, στις 20-07-2020, με ύψος νερού 22 mm και ο τύπος χώματος είναι ιλυοαργιλώδης (17.3% άμμος, 54% ύλις, 28.7% άργιλος). Το εμβαδό του αγροτεμαχίου είναι 13 στρέμματα. Στο αγροτεμάχιο P3 δεν πραγματοποιήθηκε καμία εφαρμογή άρδευσης, με ημερομηνία σποράς 20-05-2020, και αμμοπυλώδη τύπο χώματος (57.3% άμμος, 26% ύλις, 16.7% άργιλος) με συνολικό εμβαδό 49 στρέμματα. Σε όλες τις περιπτώσεις ο τρόπος ποτίσματος ήταν με τεχνητή βροχή, που αποτελεί και τον πιο διαδεδομένο τρόπο ποτίσματος στην Ελλάδα (Φυτιλής 2008).

Να σημειωθεί ότι δεν πραγματοποιήθηκε κάποιος προγραμματισμός άρδευσης ή



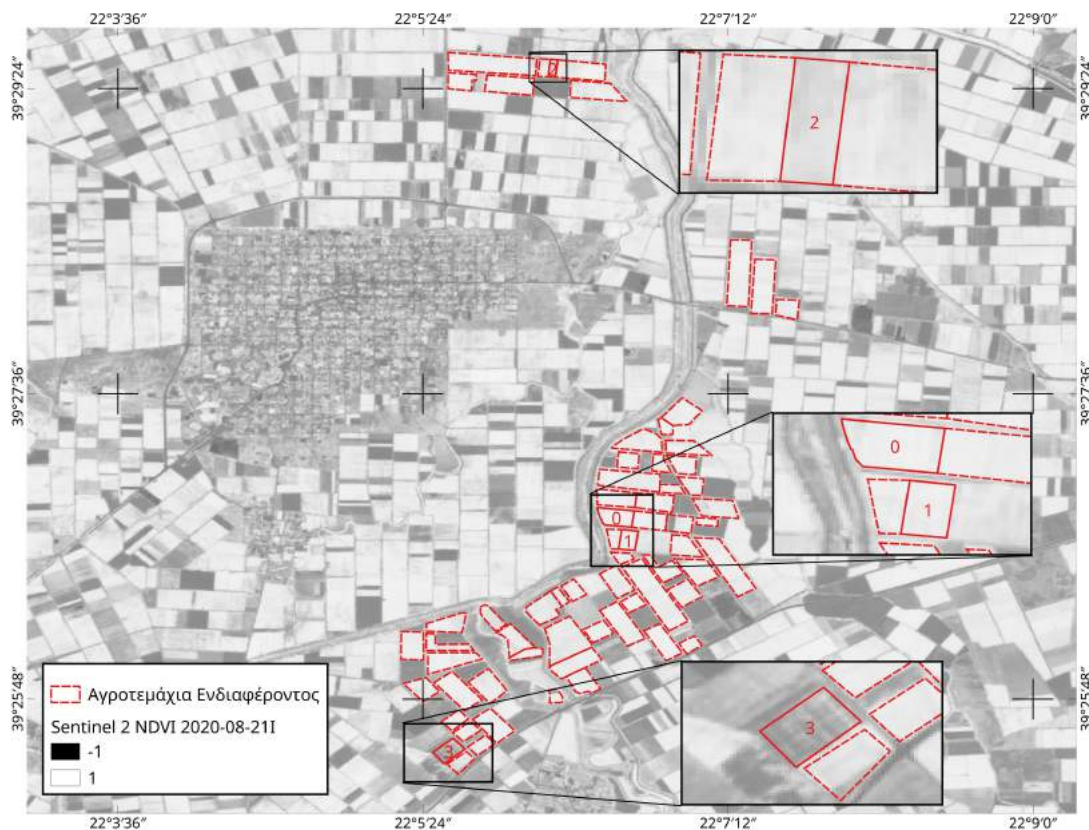
Εικόνα 3.2. Διάγραμμα με τις μέσες θερμοκρασίες ανά ημέρα (κόκκινη γραμμή) και το ύψος των βροχοπτώσεων (μαύρη στήλη) κατά την καλλιεργητική περίοδο του 2020.

Αγροτεμάχιο	Εμβαδό [στρ.]	Τύπος Χώματος	Κοκκομετρική Σύσταση	Ημερομηνία Σποράς	Εφαρμογές Άρδευσης [#]	Συνολικό Ύψος [mm]
P0	56	αργιλοπυλώδες	13% άμμος, 28% ύλις, 57% άργιλος	23-04-2020	7	151
P1	36	αργιλοπυλώδες	13% άμμος, 28% ύλις, 57% άργιλος	24-04-2020	6	150
P2	13	ιλοαργιλώδες	17.3% άμμος, 54% ύλις, 28.7% άργιλος	20-04-2020	1	22
P3	49	αμμοπυλώδες	57.3% άμμος, 26% ύλις, 16.7% άργιλος	20-05-2020	-	-

Πίνακας 3.1. Δεδομένα άρδευσης και παραμέτρων για 4 αγροτεμάχια.

οποιαδήποτε ενέργεια για τις ανάγκες τις παρούσας εργασίας, παρά μόνο καταγραφή των πρακτικών του αγρότη που παρείχε τα δεδομένα.

Εκτός από τα παραπάνω δεδομένα, συλλέχθηκαν επιπλέον αγροτεμάχια με καλλιέργειες βαμβακιού για την περιοχή, για την κατάλληλη υλοποίηση της μεθοδολογίας, η οποία θα παρουσιαστεί στις παρακάτω ενότητες. Πιο συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν στο σύνολο 3300 στρέμματα στην ευρύτερη περιοχή, με χρήση G.P.S χειρός μετά από επίσκεψη στην περιοχή μελέτης τον 08-2020. Στην εικόνα 3.3 παρουσιάζονται τα αγροτεμάχια με βαμβάκι που συλλέχθηκαν, καθώς και τα 4 αγροτεμάχια με γνωστές τις πρακτικές του αγρότη.



Εικόνα 3.3. Χάρτης με τα αγροτεμάχια που συλλέχθηκαν κατά την καλλιεργητική περίοδο του 2020.

3.2 Δορυφορικά Δεδομένα

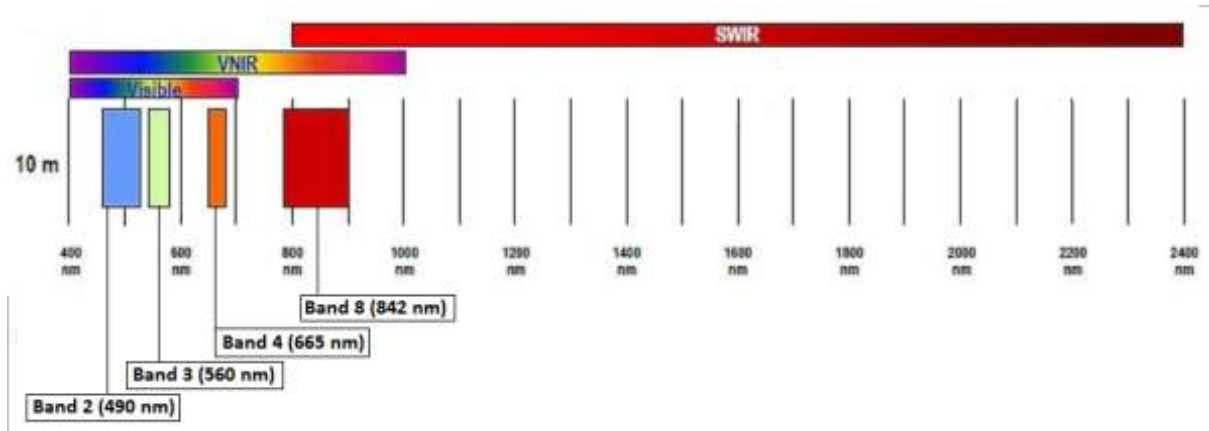
Στη παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα δορυφορικά δεδομένα που αντλήθηκαν για την μεθοδολογία και τα βήματα επεξεργασίας για την προετοιμασία τους.

3.2.1 Δορυφορικά Πολυφασματικά Δεδομένα Sentinel 2

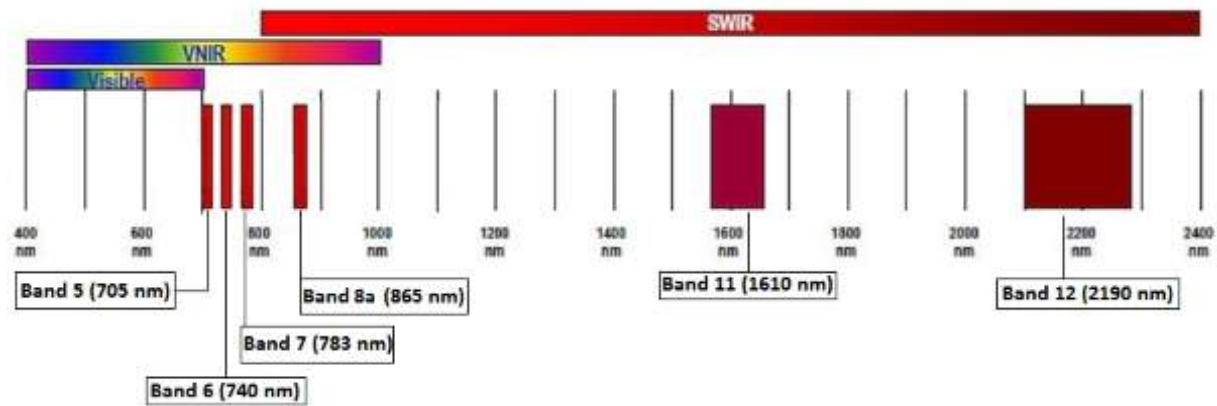
Η αποστολή των δορυφόρων Sentinel-2 (2A, 2B), αποτελεί ένα μακροπρόθεσμο σχέδιο της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (E.S.A.). Πρόκειται για ένα σύστημα δίδυμων δορυφόρων, οι οποίοι έχουν σκοπό την παροχή υψηλής ποιότητας τηλεπισκοπικών εικόνων της γης, ικανών να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο διάφορων εφαρμογών. Ο Sentinel 2A εκτοξεύθηκε με επιτυχία στις 23 Ιουνίου του 2015 και αποτελεί τον πρώτο πολυφασματικό δορυφόρο του προγράμματος Copernicus. Η αποστολή ολοκληρώθηκε με την επιτυχημένη εκτόξευση του Sentinel 2B στις 7 Μαρτίου του 2017.

Η αποστολή παρέχει με πολύ μεγάλη συχνότητα δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης, συνεπώς είναι χρήσιμη για την παρακολούθηση καλλιεργειών αλλά και άλλων εφαρμογών. Με βάση την τροχιά των δίδυμων δορυφόρων, παρέχεται πληροφορία ανά 5 ημέρες. Τα όρια κάλυψης του δορυφόρου είναι από 56° Νότια έως 84° Βόρεια. Η τροχιά των δύο δορυφόρων είναι ηλιοσύγχρονη, δηλαδή το τροχιακό επίπεδο περιστρέφεται γύρω από την γη με τον ίδιο ρυθμό που ο ήλιος κινείται κατά μήκος της γήινης επιφάνειας, σε υψόμετρο περίπου 786 km. Αυτό συμβαίνει, γιατί οι δέκτες των δορυφόρων είναι παθητικού τύπου, δηλαδή οι δέκτες καταγραφής δεν εκπέμπουν κάποια ακτινοβολία που ανακλάται στην επιφάνεια και επιστρέφει σε αυτούς, αλλά καταγράφουν την ανάκλαση του ηλιακού φωτός από την

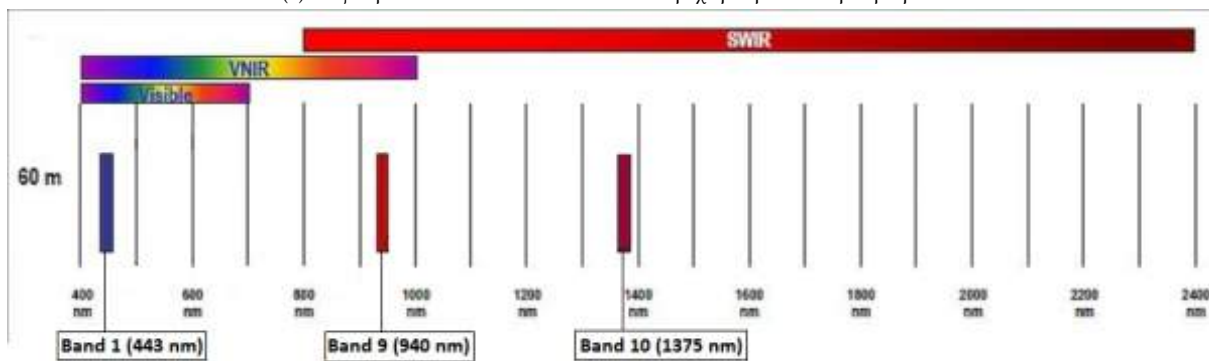
γη. Για να επιτευχθεί αύξηση της συχνότητας λήψης εικόνων και επομένως υψηλότερη διαθεσιμότητα των δεδομένων της αποστολής, το σύστημα είναι σχεδιασμένο θεωρώντας ότι θα είναι σε λειτουργία ταυτόχρονα και οι δύο δίδυμοι δορυφόροι Sentinel-2A και Sentinel-2B.



(a) Τα φασματικά κανάλια του Sentinel 2 στην χωρική ανάλυση 10 μέτρων.



(b) Τα φασματικά κανάλια του Sentinel 2 στην χωρική ανάλυση 20 μέτρων.



(c) Τα φασματικά κανάλια του Sentinel 2 στην χωρική ανάλυση 100 μέτρων.

Εικόνα 3.4. Τα φασματικά κανάλια του Sentinel 2 με χωρική ανάλυση α) 10 μέτρων, β) 20 μέτρων και γ) 60 μέτρων.

Οι δορυφόροι ακολουθούν την ίδια τροχιά, με διαφορά φάσης ίση με 180° . Επιπλέον, οι δορυφόροι Sentinel 2 έχουν σχεδιαστεί με παραμέτρους κοντά σε αυτές των προγραμμάτων LANDSAT και SPOT, καθιστώντας εύκολη την δημιουργία μακροχρόνιων χρονοσειρών δεδομένων. Ως προς τους δορυφόρους, καθένας από αυτούς είναι εξοπλισμένος με πολυφασματική κάμερα (MSI) με δυνατότητα καταγραφής εικόνας σε 13 κανάλια τα οποία καλύπτουν το ορατό, το εγγύς υπέρυθρο και το μέσο υπέρυθρο ηλεκτρομαγνητικό τμήμα του φάσματος, από 443 nm έως 2190 nm . Το πλάτος κάλυψης (Swath Width) είναι 290 km . Η χωρική ανάλυση των καναλιών είναι 10 m (κανάλια 2, 3, 4, 8), 20 m (5, 6, 7, 8A, 11, 12) και 60 m (κανάλια 1, 9, 10 που χρησιμοποιούνται κυρίως για την ατμοσφαιρική διόρθωση των δεδομένων). Οι δίδυμοι δορυφόροι δεν έχουν θερμικό ανιχνευτή, όπως ο Landsat 8. Η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα του MSI είναι 12 bit και μεταφράζεται σε 4095 διαφορετικούς τόνους του γκρι και μετατρέπονται σε 16 bit (65536 τόνοι του γκρι) στα προϊόντα που γίνονται διαθέσιμα για λήψη από τους χρήστες.

Οι εφαρμογές οι οποίες μπορούν να υποστηριχθούν από το σύστημα αυτό είναι:

- εντοπισμός αλλαγών για περιβαλλοντικό έλεγχο,
- αγροτικές εφαρμογές, όπως παρακολούθηση και διαχείριση καλλιεργειών που ενισχύουν τη διατροφική ασφάλεια,
- λεπτομερή παρακολούθηση βλάστησης και δασών, με δημιουργία παραμέτρων (δείκτης επιφάνειας φυλλώματος, συγκέντρωση χλωροφύλλης κ.α),
- παρακολούθηση μη-θαλάσσιων υδάτινων πόρων,
- παρακολούθηση παράκτιων περιοχών (θαλάσσιου περιβάλλοντος, παράκτιας ζώνης),
- παρακολούθηση παγετώνων, χαρτογράφηση έκτασης πάγου, κάλυψη επιφάνειας από χιόνι κσι
- χαρτογράφηση περιοχών που πλήττονται από πλημμύρες και διαχείριση (ανάλυση ρίσκου, διαχείριση κρίσεων, εκτίμηση ζημίας).

Πιο συγκεκριμένα, στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα εύρη των καναλιών και πληροφορίες για τη χρησιμότητά τους σε τηλεπισκοπικές εφαρμογές.

Η πολυφασματική κάμερα χρησιμοποιεί push-broom μηχανισμό λήψης. Οι σαρωτές τύπου push-broom, χρησιμοποιούν έναν γραμμικό σχηματισμό δεκτών, ο άξονας των οποίων είναι τοποθετημένος ώστε να είναι εγκάρσιος στον άξονα που ορίζει τη διεύθυνση πτήσης του δορυφόρου. Καθώς ο δορυφόρος προχωρεί, η εικόνα συλλέγεται μία γραμμή τη φορά, με τις τιμές όλων των εδαφοψηφίδων να μετρώνται ταυτόχρονα. Κατά τη σάρωση, η κατά πλάτος εδαφοκάλυψη είναι 25 km και η κατα μήκος 23 km από την τροχιά του δορυφόρου. Τα σχηματιζόμενα πολύγωνα συνενώνονται δημιουργώντας ένα μωσαϊκό (mosaicking) και γεωαναφέρονται (ortho-rectified) παρόμοια με τον Landsat 8, χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM). Τέλος, αποκόπτονται σε κομμάτια $100 * 100\text{ km}^2$ (tiles) και προβάλλονται στην UTM προβολή. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) το οποίο χρησιμοποιείται για τη γεωαναφορά τους, είναι το [PlanetDEM 90](#).



(a) Φυσικό σύνθετο έγχρωμο (RGB-432) από τα φασματικά κανάλια του Sentinel 2 στις 07-12 στην χωρική ανάλυση 10 μέτρων.



(b) Ψευδέχρωμο σύνθετο (RGB-843) από τα φασματικά κανάλια του Sentinel 2 στις 07-12 στην χωρική ανάλυση 10 μέτρων.

Εικόνα 3.5. Εικόνες α) φυσικού σύνθετου έγχρωμου και ψευδέχρωμου σύνθετου από Sentinel 2 στις 07-12.

3.2. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Κανάλι	Χωρική Ανάλυση [m]	Κεντρικό Μήκος Κύματος [nm]	Εύρος Κάλυψης [nm]	Χρησιμότητα
Κανάλι 1 (Coastal Blue)	60	443	20	Για την ανίχνευση αερολυμάτων
Κανάλι 2 (Blue)	10	490	65	Είναι χρήσιμο για την διαφοροποίηση μεταξύ χρώματος και βλάστησης, τύπων δάσους και την ανίχνευση ανθρωπογενών κατασκευών. Απορροφάται από τη χλωροφύλλη που έχει ως αποτέλεσμα η ζωντανή βλάστηση να έχει χαμηλή ανακλαστικότητα στο συγκεκριμένο κανάλι.
Κανάλι 3 (Green)	10	560	35	Έχει καλή αντίθεση μεταξύ καθαρού και λασπώδους νερού. Βοηθά στην ανίχνευση πετρελαίου και βλάστησης στο νερό.
Κανάλι 4 (Red)	10	665	30	Έχει υψηλή ανακλαστικότητα στα νεκρά φύλλα και είναι χρήσιμο στην ανίχνευση τύπων βλάστησης. Απορροφάται από τη χλωροφύλλη.
Κανάλι 5 (Red Edge)	20	705	15	Για την ταξινόμηση της βλάστησης.
Κανάλι 6 (NIR)	20	740	15	Για την ταξινόμηση της βλάστησης.
Κανάλι 7 (NIR)	20	783	20	Για την ταξινόμηση της βλάστησης
Κανάλι 8 (NIR)	10	842	115	Είναι χρήσιμο για την χαρτογράφηση ακτογραμμών και βιομάζας, επίσης στην ανίχνευση και την ανάλυση της υγείας της βλάστησης.
Κανάλι 8A (NIR)	20	865	20	Για την ταξινόμηση της βλάστησης.
Κανάλι 9 (NIR)	60	945	20	Για την ανίχνευση υδρατμών.
Κανάλι 10 (SWIR)	60	1375	30	Για την ανίχνευση νέφων.
Κανάλι 11 (SWIR)	20	1610	90	Χρήσιμο για την μέτρηση των επιπέδων υγρασίας στο χόμα και την βλάστηση και στη ανίχνευση διαφορετικών τύπων βλάστησης. Επίσης στη διαφοροποίηση σύννεφων από το χιόνι.
Κανάλι 12 (SWIR)	20	2190	180	Αντίστοιχη με το κανάλι 11.

Πίνακας 3.2. Τα φασματικά κανάλια των δορυφόρων Sentinel 2 και οι δυνατότητες τους.

Τα προϊόντα L1C, που είναι Top-of-Atmosphere ανακλαστικότητες, είναι διαθέσιμα για το κοινό στο Sentinel Data Hub ή στον Earth Explorer. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα εφαρμογής ατμοσφαιρικών διορθώσεων, ώστε τα διαθέσιμα δεδομένα L1C να μετατρέπονται σε Bottom-of-Atmosphere (L2A) ανακλαστικότητες. Η μετατροπή υλοποιείται μέσω του λογισμικού Sen2Cor, που διατίθεται χωρίς κόστος στους χρήστες από την Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (ESA). Επίσης τα δεδομένα μετά τον 09-2017 είναι διαθέσιμα απευθείας σε Bottom-of-Atmosphere (BOA) ανακλαστικότητες (L2A). Τα δεδομένα του δορυφόρου δίνονται σε συμπιεσμένο φορμάτ JP2000 φέροντας ενσωματωμένη τη γεωαναφορά τους.

Το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς των εικόνων για τη περιοχή μελέτης ήταν το WGS 84 (World Geodetic System) / Zone 34 N.

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, λήφθηκαν ατμοσφαιρικά διορθωμένα (L2A) δεδομένα, από το Μάιο του 2020 έως και τον Αύγουστο του 2020. Κατά την λήψη των δεδομένων, εφαρμόστηκε το κριτήριο νεφοκάλυψης μικρότερο του 30%, αλλά στα δεδομένα

πραγματοποιήθηκε και έλεγχος μέσω φωτοερμηνείας στην περιοχή για την αφαίρεση εικόνων που μπορεί να εξακολουθούσαν να υπάρχουν νέφη. Στον πίνακα 3.3 παρουσιάζονται η ημερομηνία των τελικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της εργασίας, ο δορυφόρος, καθώς και το προβολικό σύστημα.

Δορυφόρος	Επίπεδο (Level)	Ημερομηνία	Προβολικό Σύστημα Αναφοράς	Κωδικός Σκηνής (Tile)
S2B	L2A	05/08/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2A	L2A	05/13/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2A	L2A	05/23/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2A	L2A	06/02/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2B	L2A	06/07/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2A	L2A	06/12/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2B	L2A	06/17/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2A	L2A	06/22/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2B	L2A	06/27/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2A	L2A	07/02/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2A	L2A	07/12/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2B	L2A	07/17/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2A	L2A	07/22/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2B	L2A	07/27/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2A	L2A	08/01/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2A	L2A	08/11/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2B	L2A	08/16/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2A	L2A	08/21/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2B	L2A	08/26/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ
S2A	L2A	08/31/20	WGS 84 / UTM Zone 34N	34SEJ

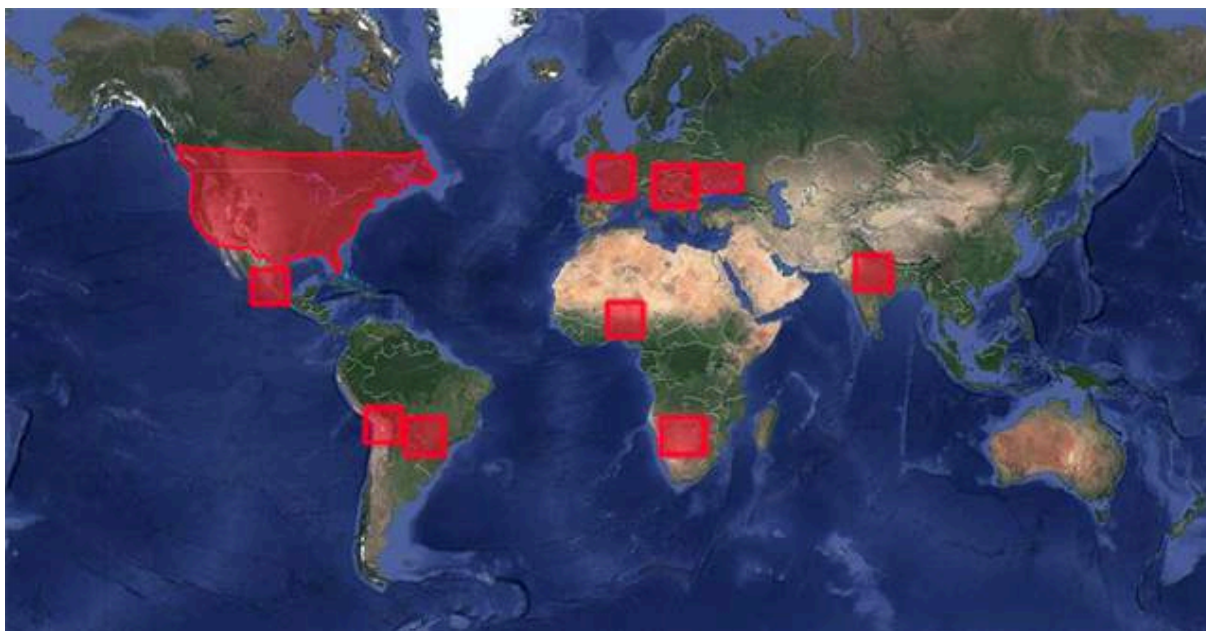
Πίνακας 3.3. Διαθέσιμα δεδομένα Sentinel 2 για την περιοχή μελέτης την καλλιεργητική περίοδο του 2020 με κριτήριο νεφοκάλυψης <30%.

3.2.2 Δορυφορικά Θερμικά Δεδομένα ECOSTRESS

Η αποστολή ECOSystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station (ECOSTRESS) της NASA είναι εξειδικευμένη για την ακριβή μέτρηση θερμοκρασιών σε φυτά. Τα φυτά ρυθμίζουν τη θερμοκρασία, τους απελευθερώνοντας νερό μέσω μικροσκοπικών πόρων που ονομάζονται στόματα. Αν στο έδαφος υπάρχει αρκετή ποσότητα νερού, τότε τα φυτά μπορούν να διατηρήσουν τη θερμοκρασία τους, αλλά αν υπάρχει έλλειψη, τότε η θερμοκρασία αυξάνεται και στο φυτό παρουσιάζεται υδατικό στρες. Η αποστολή ECOSTRESS εξειδικεύεται στην ανίχνευση αυτών των διαφορών θερμοκρασίας.

Η διαχείριση της αποστολής πραγματοποιείται από το εργαστήριο [Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology](#) και το τμήμα επιστήμης της Γης της NASA. Το πρόγραμμα τέθηκε σε λειτουργία στις 29 Ιουνίου 2018. Τα δεδομένα καταγράφονται μέσω του δέκτη HypSIRI Thermal Infrared Radiometer (PHyTIR) στο διεθνή διαστημικό σταθμό (ISS). Το PHyTIR αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος Earth Science Technology Office (ESTO) Instrument Incubator Program (IIP). Από τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (ISS) ο δέκτης παρέχει δεδομένα με $38 * 70 m^2$ και ακρίβεια στις μετρήσεις θερμοκρασίας $< 0.1K$. Το όργανο έχει μάζα περίπου $465 kg$, μέση κατανάλωση ισχύος $527 W$, όγκο $1.3 m^3$, μέσο ρυθμό καταγραφής δεδομένων $2.3 Mbit/s$ (με ονομαστικό ρυθμό καταγραφής $4.5 Mbit/s$) και διάρκεια ζωής 5 έτη. Η τροχιά του ISS επιτρέπει εξαιρετική κάλυψη των επιλεγμένων στόχων (εικόνα 3.6) και τυπικά η επανεπίσκεψη στις περιοχές ενδιαφέροντος κατά 90%

πραγματοποιείται κάθε 4 ημέρες, όμως διαφορετικές ώρες κατά την διάρκεια του ημερήσιου κύκλου.



Εικόνα 3.6. Χάρτης με τις περιοχές ενδιαφέροντος της αποστολής ECOSTRESS.

Ο δέκτης διαθέτει τη δυνατότητα καταγραφής σε 5 διαφορετικά τμήματα του θερμικού υπέρυθρου, στο εύρος των 8 έως 12.5 μm . Οι θέσεις στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα των τριών φασματικών καναλιών είναι κοντά με τα τρία πρώτα φασματικά κανάλια του δέκτη ASTER, ενώ δύο φασματικά κανάλια είναι ακριβώς στο ίδιο μήκος κύματος με του ASTER και του MODIS (12–14 φασματικά κανάλια του ASTER και 31, 32 του MODIS).

Τα δεδομένα διατίθενται σε 5 διαφορετικά επίπεδα (Level 0-4). Το πρώτο επίπεδο (Level 0) αφορά τα αρχικά δεδομένα όπως συλλέχθηκαν από τον δέκτη, ενώ τα δεδομένα του 2ου επιπέδου (Level 1) αποτελούν δεδομένα με τιμές ανακλαστικότητας και γεωαναφορά. Το επίπεδο 2, στο οποίο ήταν και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, αποτελεί ατμοσφαιρικά διορθωμένα δεδομένα με τιμές θερμοκρασίας επιφάνειας (*LST*) και εκπομπής (*Emissivity*). Για τη δημιουργία των δεδομένων *LST* χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Temperature / Emissivity Separation (TES) (Gillespie et al. 1998) και χρησιμοποιούνται όλα τα διαθέσιμα φασματικά κανάλια στο θερμικό υπέρυθρο του επιπέδου 1. Τα επόμενα δύο επίπεδα προσφέρουν ένα προϊόν εξατμισοδιαπνοής (Level 3) και τα προϊόντα που αφορούν το υδατικό στρες, Water Use Efficiency και Evaporative Stress Index (Level 4).

Τα δεδομένα της αποστολής ECOSTRESS διατίθενται ελεύθερα από διάφορα αποθετήρια, μερικά εκ των οποίων παρατίθενται στην παρακάτω λίστα:

- [NASA Land Processes Distributed Active Archive Center \(LP DAAC\)](#)
- [AppEEARS](#)
- [USGS Earth Explorer](#)

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας λήφθηκαν δεδομένα *LST* από το αποθετήριο [AppEEARS](#). Τα δεδομένα αυτά αφορούσαν το διάστημα της καλλιεργητικής περιόδου του 2020 (Μάιο-Σεπτέμβριο). Στο σύνολο λήφθηκαν 86 εικόνες για την περιοχή μελέτης, όμως



Εικόνα 3.7. Εικόνα ECOSTRESS LST στις 08-31.

φιλτραρίστηκαν με βάση τα μεταδεδομένα τους και μέσω φωτοερμηνείας και απέμειναν 32. Ο έλεγχος των δεδομένων αφορούσε τα νέφη και την κάλυψη της περιοχής μελέτης. Τα διαθέσιμα δεδομένα ήταν εικόνες τύπου Geotiff με ενσωματωμένη τη γεωαναφορά σε σύστημα αναφοράς WGS 84 (World Geodetic System). Ο τύπος αποθήκευσης των δεδομένων ήταν 16 bit (65536 τόνοι του γκρι) και η μονάδα μέτρησης ήταν οι K . Για την μετατροπή των ψηφιακών τιμών σε θερμοκρασίες χρησιμοποιήθηκαν από τα μεταδεδομένα οι τιμές μετατροπής *scale, offset*.

Ένα επιπλέον βήμα επεξεργασίας που πραγματοποιήθηκε στα δεδομένα ECOSTRESS, ήταν ο μετασχηματισμός των δεδομένων στο σύστημα αναφοράς και στις διαστάσεις της πρώτης εικόνας με βάση την ημερομηνία, διότι παρατηρήθηκε ότι τα δεδομένα είχαν μικρές μετατοπίσεις (μικρότερες του 1 εικονοστοιχείου). Για την δημιουργία των νέων εικόνων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος αναδόμησης του εγγύτερου γείτονα για να διατηρηθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η αρχική πληροφορία. Αυτό το πρόβλημα των δεδομένων παρουσιάζεται κατά την επεξεργασία και τους μετασχηματισμούς που εφαρμόζονται στα δεδομένα από το αποθετήριο [AppEARS](#) για την εξαγωγή τους σε τύπο εικόνας Geotiff.

Τέλος, οι τελικές εικόνες ήταν καθαρές από νέφη, κάλυπταν πλήρως την εξεταζόμενη περιοχή και είχαν σωστή γεωαναφορά. Στον πίνακα 3.5 παρουσιάζεται η τελική λίστα με τα δεδομένα, καθώς και η ημερομηνία και ώρα λήψης.

Περιγραφή	Τιμή	Μονάδα Μετρησης	Σχόλιο
Αριθμός Φασματικών Καναλιών	5		
Κεντρικό Μήκος Κύματος	Κανάλι 1 - 8.29, *Κανάλι 2 - 8.78, Κανάλι 3 - 9.20, *Κανάλι 4 - 10.49, *Κανάλι 5 - 12.09	μm	Τα κανάλια με * είναι διαθέσιμα μετά τις 15-05-2019.
Έυρος Κάλυψης	Κανάλι 1 - 0.354, Κανάλι 2 - 0.310, Κανάλι 3 - 0.396, Κανάλι 4 - 0.410, Κανάλι 5 - 0.611	μm	
Χωρική Ανάλυση (nadir)	69*38	m	
Πλάτος Κάλυψης	384	km	Εξαρτάται με το υψόμετρο του ISS
Μέγεθος Σκηνής	5400*5632	pixels	
Ονομαστική ραδιομετρική αξιοπιστία στα 300 K	0.5	K	
Ονομαστική ραδιομετρική ακρίβεια στα 300 K	0.15	K	
Ραδιομετρική ακρίβεια στα 300 K ανά κανάλι	0.21,0.13,0.10,0.10,0.29	K	
Αριθμός Μελανών Σωμάτων	2		1 μεταξύ 16°C to 24°C και 1 στους 46°C
Δυναμικό Εύρος	200-435	K	
Μέγεθος Διαφράγματος	200	mm	
F	2.1		
IFOV	96	μrads	

Πίνακας 3.4. Δεδομένα φασματικών καναλιών του ECOSTRESS

3.2.3 Υπολογισμός f_v από τα δεδομένα Sentinel 2

Σύμφωνα με το [Copernicus Global Land Service](#) ως f_v ορίζεται ο λόγος κάλυψης της πράσινης βλάστησης ως προς την επιφάνεια εδάφους. Πρακτικά, αποτελεί μια ποσοτικοποίηση της χωρικής έκτασης που καλύπτεται από βλάστηση. Επειδή το f_v είναι ανεξάρτητο από την κατεύθυνση φωτισμού και ευαίσθητο αποκλειστικά στην ποσότητά της, αποτελεί ένα σημαντικό υποψήφιο για την αντικατάσταση των κλασικών δεικτών βλάστησης. Επίσης, αποτελεί μια δομική ιδιότητα του φυλλώματος χρήσιμη για την περιγραφή της κατάστασης της γήινης επιφάνειας και την παρακολούθηση των οικοσυστημάτων. Τέλος, το f_v σχετίζεται άμεσα με την διαδικασία διαμερισμού της θερμοκρασίας επιφάνειας (LST) σε βλάστησης και εδάφους. Έχουν πραγματοποιηθεί μια σειρά από εργασίες διεθνώς που χρησιμοποιούν το f_v για αυτήν ακριβώς τη διαδικασία όπως οι [Olivera-Guerra, Merlin, and Er-Raki 2020](#); [Jiang and Islam 2003](#); [Long and Singh 2012](#); [Merlin et al. 2014](#); [Sandholt, Rasmussen, and Andersen 2002](#).

Ο υπολογισμός του f_v με τηλεπισκοπικά δεδομένα, πραγματοποιείται μέσω του γραμμικού συνδυασμού της ελάχιστης και μέγιστης τιμής του κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης ($NDVI$). Ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης $NDVI$ ([Rouse et al. 1974](#)) αποτελεί τον ευρύτερα χρησιμοποιούμενο δείκτη βλάστησης. Βασίζεται στην αντίθεση ανάμεσα στη μέγιστη απορροφητικότητα του κόκκινου τμήματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από τη χλωροφύλλη και τη μέγιστη ανακλαστικότητα της χλωροφύλλης στο υπέρυθρο. Ο τύπος υπολογισμού είναι:

Όνομα	Ημερομηνία	Ώρα (GTM+0)
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020119090449_aid0001_reprojected.tif	2020-04-28	09:04:49
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020123073044_aid0001_reprojected.tif	2020-05-02	07:30:44
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020126232602_aid0001_reprojected.tif	2020-05-05	23:26:02
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020127055626_aid0001_reprojected.tif	2020-05-06	05:56:26
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020130215136_aid0001_reprojected.tif	2020-05-09	21:51:36
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020131042206_aid0001_reprojected.tif	2020-05-10	04:22:06
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020154122500_aid0001_reprojected.tif	2020-06-02	12:25:00
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020162091547_aid0001_reprojected.tif	2020-06-10	09:15:47
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020166074108_aid0001_reprojected.tif	2020-06-14	07:41:08
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020169065447_aid0001_reprojected.tif	2020-06-17	06:54:47
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020170060630_aid0001_reprojected.tif	2020-06-18	06:06:30
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020173052005_aid0001_reprojected.tif	2020-06-21	05:20:05
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020192212759_aid0001_reprojected.tif	2020-07-10	21:27:59
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020193035809_aid0001_reprojected.tif	2020-07-11	03:58:09
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020201004824_aid0001_reprojected.tif	2020-07-19	00:48:24
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020208150841_aid0001_reprojected.tif	2020-07-26	15:08:41
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020212133412_aid0001_reprojected.tif	2020-07-30	13:34:12
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020216120047_aid0001_reprojected.tif	2020-08-03	12:00:47
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020224152338_aid0001_reprojected.tif	2020-08-11	15:23:38
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020232054637_aid0001_reprojected.tif	2020-08-19	05:46:37
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020236041234_aid0001_reprojected.tif	2020-08-23	04:12:34
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020240023902_aid0001_reprojected.tif	2020-08-27	02:39:02
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020244073516_aid0001_reprojected.tif	2020-08-31	07:35:16
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020247233136_aid0001_reprojected.tif	2020-09-03	23:31:36
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020252042742_aid0001_reprojected.tif	2020-09-08	04:27:42
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020255202415_aid0001_reprojected.tif	2020-09-11	20:24:15
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020256025455_aid0001_reprojected.tif	2020-09-12	02:54:55
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020259185116_aid0001_reprojected.tif	2020-09-15	18:51:16
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020260012211_aid0001_reprojected.tif	2020-09-16	01:22:11
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020263234858_aid0001_reprojected.tif	2020-09-19	23:48:58
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020271204407_aid0001_reprojected.tif	2020-09-27	20:44:07
ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2020275124127_aid0001_reprojected.tif	2020-10-01	12:41:27

Πίνακας 3.5. Τελικές εικόνες του ECOSTRESS

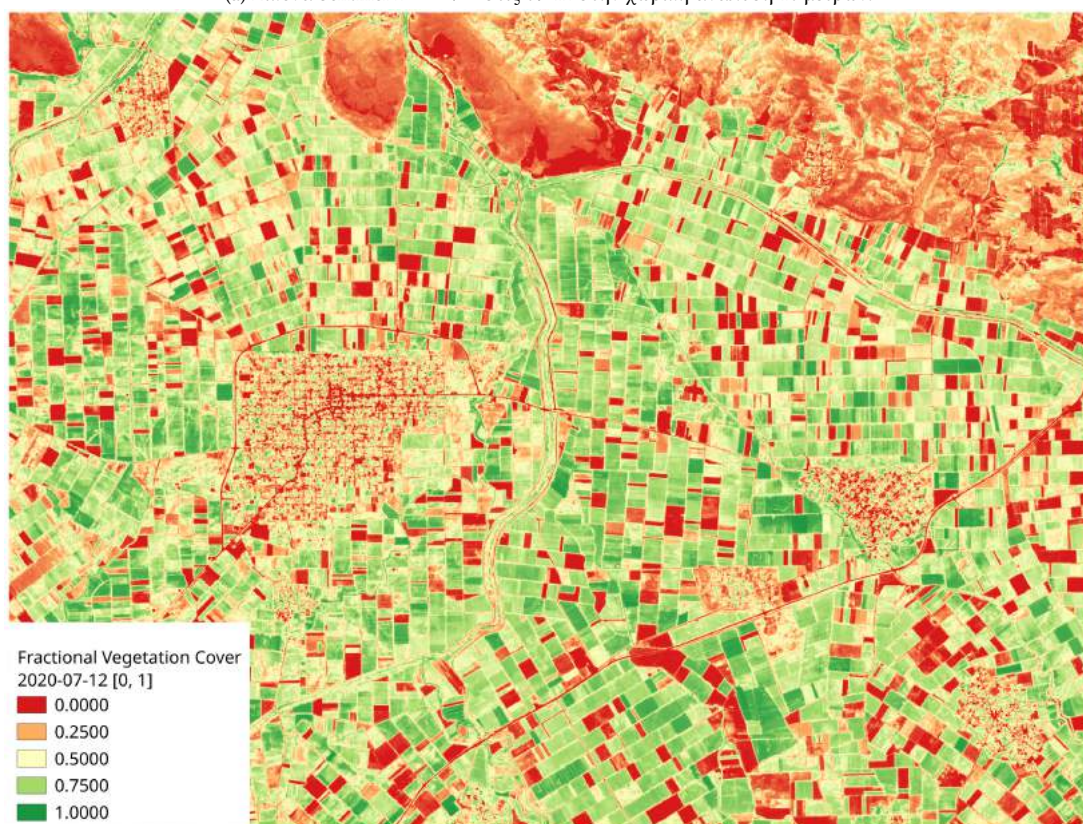
$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3.1)$$

ενώ από τα δεδομένα Sentinel 2 υπολογίζεται από τα φασματικά κανάλια B8 (NIR) και B4 (RED) με χωρική ανάλυση τα 10 m. Τότε, ο τύπος υπολογισμού είναι:

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4} \quad (3.2)$$



(a) Εικόνα Sentinel 2 $NDVI$ στις 07-12 στην χωρική ανάλυση 10 μέτρων.



(b) Εικόνα Sentinel 2 f_v στις 07-12 στην χωρική ανάλυση 10 μέτρων.

Εικόνα 3.8. Εικόνες των α) $NDVI$ και β) f_v από Sentinel 2 στις 07-12.

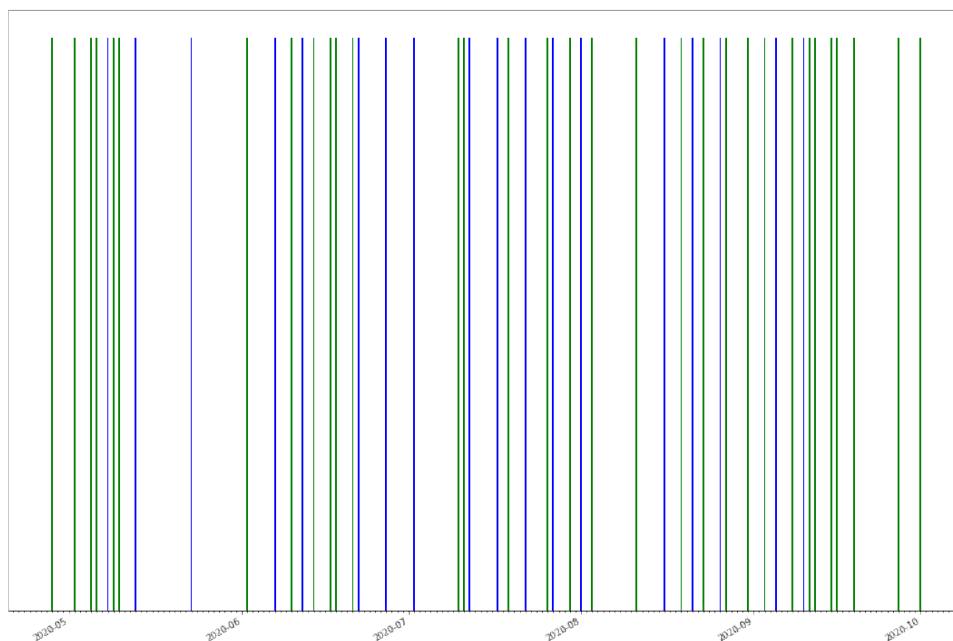
Η ελάχιστη και μέγιστη τιμή του $NDVI$ στην περίπτωση μελέτης της βλάστησης, όπως και στην παρούσα εργασία, συνήθως αναπαριστά το γυμνό έδαφος ($NDVI_s$) και την πλήρως ανεπτυγμένη πράσινη βλάστηση ($NDVI_v$) αντίστοιχα (Gutman and Ignatov 1998). Οι τιμές που προτείνονται από τη διεθνή βιβλιογραφία για $NDVI_v$ και $NDVI_s$ για τον χειμερινό σίτο (*Triticum aestivum*) είναι 0.93 και 0.14 (Olivera-Guerra, Merlin, and Er-Raki 2020; Duchemin et al. 2006). Έπειτα από φωτοερμηνεία των εικόνων στην περιοχή μελέτης, διατηρήθηκαν οι ίδιες τιμές καθώς περιγράφουν το βαμβάκι στην περιοχή μελέτης. Ο υπολογισμός του f_v πραγματοποιείται σύμφωνα με τον τύπο 3.3.

$$f_v = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v + NDVI_s} \quad (3.3)$$

3.2.4 Συνθετικά Δεδομένα Sentinel 2 f_v

Στις παραπάνω υποενότητες αναλύθηκαν οι πηγές και τα τηλεπισκοπικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας. Τα δεδομένα ECOSTRESS και τα δεδομένα Sentinel 2, καθώς προέχονται από δύο διαφορετικές αποστολές με διαφορετική χρονική ανάλυση, ήταν στις περισσότερες περιπτώσεις κατά την διάρκεια όλης της καλλιεργητικής περιόδου, σε διαφορετικές ημερομηνίες. Για την υλοποίηση της εργασίας, τα δεδομένα ήταν απαραίτητο να μεταφερθούν στις ίδιες ημερομηνίες και οι διαθέσιμες δυνατές επιλογές ήταν 3 στο σύνολο:

1. Αντιστοίχιση του f_v στις ημερομηνίες του ECOSTRESS LST
2. Αντιστοίχιση του ECOSTRESS LST στις ημερομηνίες του Sentinel 2 f_v
3. Αντιστοίχιση και των δύο χρονοσειρών δεδομένων στις επιθυμητές ημερομηνίες



Εικόνα 3.9. Ημερομηνίες Sentinel 2 (μπλέ) και ECOSTRESS LST (πράσινο) για την καλλιεργητική περίοδο του 2020.

Από τις 3 πιθανές επιλογές για τις ανάγκες της εργασίας επιλέχθηκε η πρώτη. Ο λόγος επιλογής ήταν το γεγονός ότι η μοντελοποίηση της θερμοκρασίας αποτελεί μία πολύ σύνθετη

διαδικασία. Αντίθετα, το f_v , όπως προαναφέρθηκε αποτελεί ένα απλό γραμμικό συνδυασμό του δείκτη βλάστησης $NDVI$ και δεν παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου με αυξητική τάση κατά την διάρκεια ανάπτυξης του φυτού και σταθεροποίηση στο τέλος της περιόδου. Ένα αρνητικό της επιλογής της αντιστοίχισης των δεδομένων f_v στις ημερομηνίες των δεδομένων ECOSTRESS LST , είναι η μη σταθερή επισκεψιμότητα του ISS για την περιοχή μελέτης. Τέλος, η τρίτη επιλογή απαιτούσε το συνδυασμό των δύο παραπάνω, οπότε για τους ίδιους λόγους απορρίφθηκε.

Για τη δημιουργία των συνθετικών δεδομένων f_v , επιλέχθηκε να δημιουργηθούν γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης ανάμεσα στις διαδοχικές εικόνες Sentinel 2 f_v και να εξαχθούν σε μορφή Geotiff οι αντίστοιχες ημερομηνίες ECOSTRESS. Στην εικόνα 3.9 παρουσιάζονται οι ημερομηνίες των δεδομένων Sentinel 2 (μπλέ) και των δεδομένων ECOSTRESS (πράσινο).

3.3 Διαμερισμός των Θερμοκρασιών Επιφάνειας (LST)

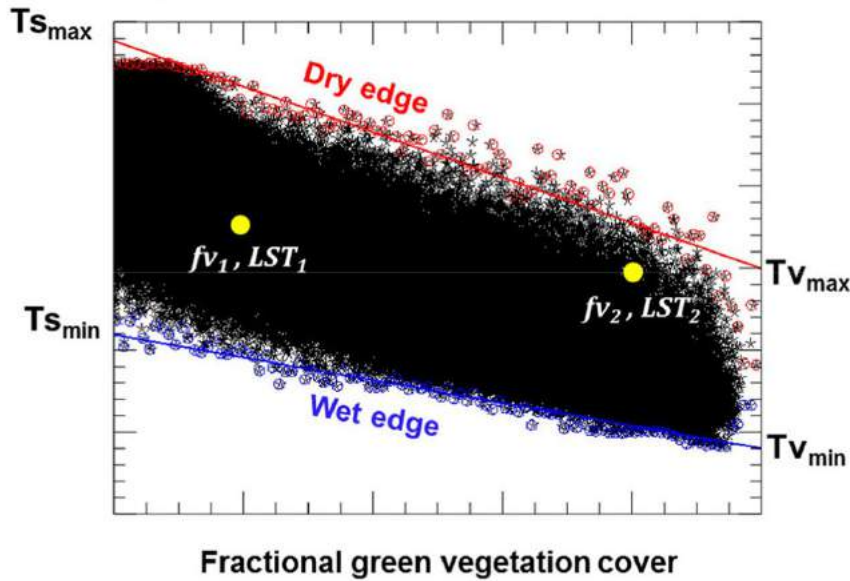
Για την εξαγωγή του τελικού συντελεστή K_s από τα οπτικά και θερμικά δεδομένα και τελικώς την εκτίμηση του υδατικού στρες στα αγροτεμάχια βαμβακιού, ήταν απαραίτητος ο διαμερισμός του LST σε επιμέρους συνιστώσες. Ο συντελεστής K_s , όπως προαναφέρθηκε αποτελεί ουσιαστικά ένα συντελεστή μείωσης της διαδικασίας της εξατμισοδιαπνοής. Τα τηλεπισκοπικά δεδομένα, αποτελούν το πιο υποσχόμενο εργαλείο για την μελέτη του υδατικού στρες μέσω της εξατμισοδιαπνοής (Glenn et al. 2007; Gowda et al. 2008; Wagle, Xiao, et al. 2017; Wagle, Bhattarai, et al. 2017). Οι πιο σύνθετες μέθοδοι για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής, μέσω τηλεπισκόπησης, βασίζονται στη θεωρία πίσω από τα Surface Energy Balance Models (SEB) (Biggs et al. 2015).

3.3.1 Υπολογισμός ακραίων τιμών θερμοκρασίας

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον διαμερισμό της θερμοκρασίας σε θερμοκρασία εδάφους και θερμοκρασία βλάστησης, βασίστηκε στον χώρο $LST - f_v$ (Olivera-Guerra, Merlin, and Er-Raki 2020; Jiang and Islam 2003; Long and Singh 2012; Merlin et al. 2014; Sandholt, Rasmussen, and Andersen 2002) και στη βάση του Two-Source Surface Energy Balance (J.M. Norman, Kustas, and Humes 1995) όπως προτάθηκε από τους Olivera-Guerra, Merlin, and Er-Raki 2020. Πρώτα ο χώρος $LST - f_v$ χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των ακραίων τιμών θερμοκρασίας (T_{vmax} , T_{smax} , T_{vmin} , T_{smin}) από ένα πολύγωνο που ορίζεται από μία "στεγνή" πλευρά και μία "υγρή" πλευρά. Η θερμοκρασία T_{vmax} αποτελεί τη μέγιστη θερμοκρασία βλάστησης και συνεπώς την θερμοκρασία που θα έχει το φυτό όταν βρίσκεται υπό υδατικό στρες, ενώ η θερμοκρασία T_{vmin} την ελάχιστη θερμοκρασία βλάστησης και τη θερμοκρασία του δυνητικά ποτισμένου φυτού. Αντίστοιχα, η ακραία τιμή θερμοκρασίας T_{smax} , αποτελεί την μέγιστη τιμή θερμοκρασίας εδάφους και η T_{smin} την ελάχιστη. Η "στεγνή" πλευρά ορίζεται ως η γραμμή που ενώνει τις τιμές T_{vmax} και T_{smax} , ενώ η "υγρή" πλευρά ορίζεται ως η γραμμή που σχηματίζεται από τις ακραίες τιμές T_{smin} και T_{vmin} .

Για την εύρεση των ακραίων τιμών θερμοκρασίας, διαχωρίστηκε το συνολικό εύρος του f_v , με $f_v \in [0, 1]$ σε διαστήματα βήματος 0.1 και διατηρήθηκαν οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές LST σε κάθε κατηγορία. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν από τα δεδομένα κάθε κατηγορίας γραμμικές παλινδρομήσεις για να δημιουργηθούν οι δύο ευθείες γραμμές. Τότε, για την "στεγνή" πλευρά η τιμή T_{smax} προκύπτει από την τιμή του μοντέλου όταν το f_v είναι ίσο 0 και η τιμή T_{vmax} όταν η τιμή του f_v είναι ίση με 1. Αντίστοιχα και για την "υγρή" πλευρά η τιμή θερμοκρασίας T_{smin} προκύπτει από την τιμή του μοντέλου όταν το f_v ίσο με το 0 και

του T_{vmin} όταν το f_v είναι ισό με 1. Στην εικόνα 3.10 παρουσιάζεται μία αναπαράσταση του χώρου $LST - f_v$, των ακραίων τιμών θερμοκρασίας (T_{vmax} , T_{smax} , T_{vmin} , T_{smin}), καθώς και των πλευρών του σχηματιζόμενου πολυγώνου.



Εικόνα 3.10. Αναπαράσταση του χώρου $LST - f_v$ των ακραίων τιμών θερμοκρασίας (T_{vmax} , T_{smax} , T_{vmin} , T_{smin}), καθώς και της "υγρής" πλευράς (μπλέ) και "στεγνής" πλευράς (κόκκινο) του σχηματιζόμενου πολυγώνου.

Η συγκεκριμένη διαδικασία εφαρμόστηκε σε κάθε ημερομηνία των δεδομένων ECOSTRESS και χρησιμοποιήθηκε το σύνολο των αγροτεμαχίων που συλλέχθηκαν την καλλιεργητική περίοδο του 2020, ώστε οι ακραίες τιμές θερμοκρασίας να αντιπροσωπεύουν καλύτερα την περιοχή μελέτης.

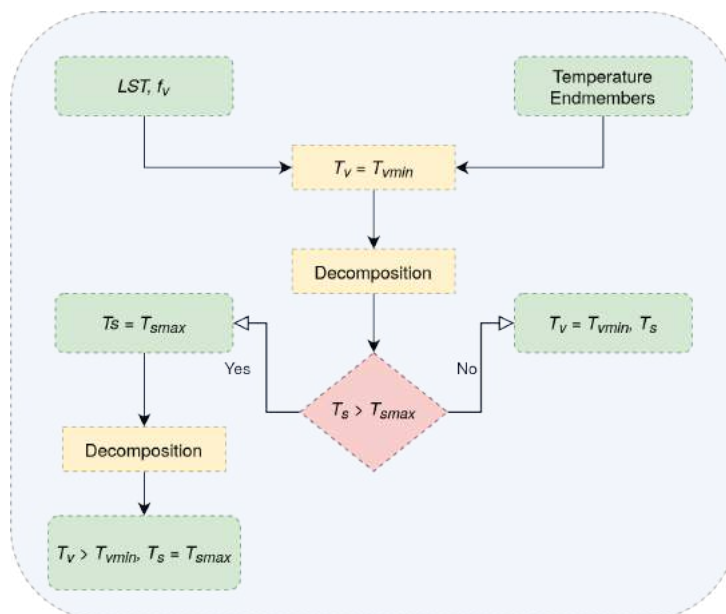
3.3.2 Αλγόριθμος Διαμερισμού Θερμοκρασίας

Το τελευταίο βήμα για τον διαμερισμό του LST , μετά την εξαγωγή των ακραίων θερμοκρασιών (T_{vmax} , T_{smax} , T_{vmin} , T_{smin}), ήταν η απόδοση τιμών θερμοκρασίας σε βλάστηση (T_v) και έδαφος (T_s) με βάση τις αρχές του μοντέλου TSEB (J.M. Norman, Kustas, and Humes 1995). Για τη διαδικασία αυτή, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση που συνδέει γραμμικά το LST με τις θερμοκρασίες T_v και T_s μέσω του f_v (Olivera-Guerra, Merlin, and Er-Raki 2020; Long and Singh 2012):

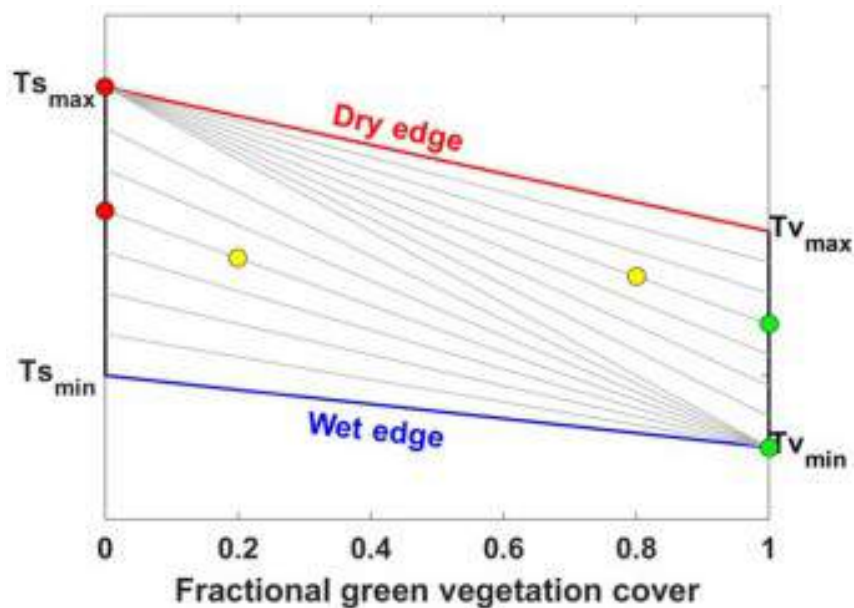
$$T_v = \frac{LST - (1 - f_v) * T_s}{f_v} \quad (3.4)$$

Η διαδικασία διαμερισμού, αρχικοποιείται θέτωντας το $T_v = T_{vmin}$ και λύνοντας την εξίσωση 3.4 ως προς T_s . Το παραπάνω βήμα πραγματοποιείται με βάση το TSEB και ουσιαστικά ο ρυθμός διαπνοής του φυτού αρχικοποιείται στο μέγιστο δυνατό, δηλαδή $T_v = T_{vmin}$ (Olivera-Guerra, Merlin, and Er-Raki 2020). Στη συνέχεια, εάν το $T_s > T_{smax}$, τότε το $T_s = T_{smax}$ και μέσω της σχέσης 3.4 υπολογίζεται νέο T_v . Σε αυτή την περίπτωση, το φυτό βρίσκεται υπό υδατικό στρες ($T_v > T_{vmin}$). Έτσι, σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές με βάση του TSEB στο χώρο $LST - f_v$, η θερμοκρασία T_v είναι ίση με T_{vmin} για κάθε T_s μικρότερο του T_{smax} , ενώ το T_s παραμένει ίσο με το T_{smax} για κάθε T_v μεγαλύτερο του T_{vmin} .

Στην εικόνα 3.11 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της παραπάνω διαδικασίας, ενώ στην εικόνα 3.12 μία αναπαράσταση για τον διαμερισμό δύο εικονοστοιχείων (κίτρινο) και τις τιμές T_v (πράσινο) και T_s (κόκκινο) όπως θα προέκυπταν από τη διαδικασία που αναλύθηκε.



Εικόνα 3.11. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου διαμερισμού.



Εικόνα 3.12. Αναπαράσταση για το διαμερισμό δύο εικονοστοιχείων (κίτρινο) και τις τιμές T_v (πράσινο) και T_s (κόκκινο) όπως θα προέκυπταν από τη διαδικασία.

3.4 Υπολογισμός του συντελεστή Υδατικού Στρέσ K_s

Ο συντελεστής K_s αποτελεί και το τελικό αποτέλεσμα και στόχο της παρούσας εργασίας. Όπως προαναφέρθηκε, ο $K_s \in [0, 1]$ αποτελεί έναν αδιάστατο συντελεστή μείωσης της διαδικασίας της διαπνοής ενός φυτού λόγω έλλειψης υγρασίας από το έδαφος (Allen, Pereira, et al. 1998).

Ο υπολογισμός του K_s πραγματοποιήθηκε μέσω της παρακάτω σχέσης (Olivera-Guerra, Merlin, Er-Raki, et al. 2018; Olivera-Guerra, Merlin, and Er-Raki 2020):

$$K_s = \frac{T_{vmax} - T_v}{T_{vmax} - T_{vmin}} \quad (3.5)$$

Έτσι, ο K_s εκτιμάται από την κανονικοποίηση των θερμοκρασιών βλάστησης, μέσω της μέγιστης (T_{vmax}) και ελάχιστης (T_{vmin}) τιμής θερμοκρασίας. Ως εκ τούτου, οι τιμές του K_s κυμαίνονται από 0, όπου αντιστοιχεί σε βλάστηση με μηδενικό ρυθμό διαπνοής ή πλήρως ωριμανσμένη ή νεκρή βλάστηση, και 1 όπου αντιστοιχεί στα δυνητικά επίπεδα διαπνοης (υδατικά πλήρες σύστημα).

Κεφάλαιο 4

Αποτελέσματα και Αξιολόγηση

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3. Η αξιολόγηση της μεθοδολογίας πραγματοποιήθηκε με βάση τα αγροτεμάχια που συλλέχθηκαν με γνωστές τις πρακτικές του αγρότη. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά αναλύονται τα αποτελέσματα που αφορούν τον υπολογισμό του f_v και τη δημιουργία συνθετικών δεδομένων για τη μεταφορά τους στις ημερομηνίες ECOSTRESS. Στη συνέχεια, αναλύονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού των ακραίων τιμών θερμοκρασίας T_{vmax} , T_{smax} , T_{vmin} , T_{smin} καθώς και η απόδοση τιμών θερμοκρασίας T_v και T_s σε κάθε εικονοστοιχείο των αγροτεμαχίων ενδιαφέροντος σε όλες τις πιθανές ημερομηνίες μέσω του μοντέλου που αναλύθηκε στην μεθοδολογία και οι αντίστοιχοι χάρτες για κάθε αγροτεμάχιο. Τέλος, αναλύονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού του συντελεστή υδατικού στρες K_s και πραγματοποιείται σύγκριση με τα δεδομένα άρδευσης που συλλέχθηκαν για την καλλιεργητική περίοδο του 2020, καθώς και παρουσίαση των τελικών χαρτών K_s .

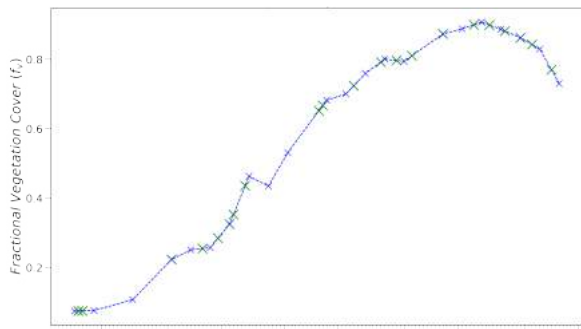
4.1 Αποτελέσματα υπολογισμού f_v

Ο υπολογισμός του f_v αποτέλεσε σημείο κλειδί της μεθοδολογίας για την κατάλληλη εκτίμηση του υδατικού στρες στα αγροτεμάχια. Για τον υπολογισμό του, όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης $NDVI$ και στη συνέχεια διαδοχικά γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης για τη δημιουργία συνθετικών εικόνων στις ημερομηνίες των δεδομένων ECOSTRESS.

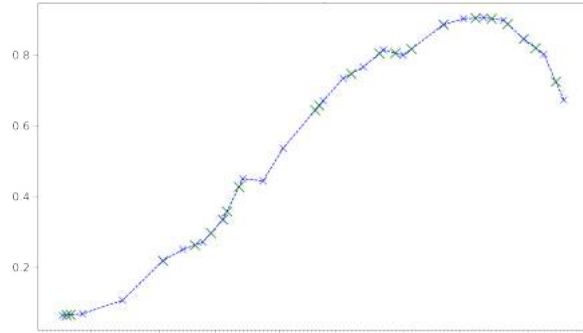
Στο διάγραμμα 4.1a παρουσιάζεται η καμπύλη του f_v από τα δεδομένα Sentinel 2 (μπλέ γραμμή) ενώ και τα αντίστοιχα αποτελέσματα από το μοντέλο στις ημερομηνίες ECOSTRESS (πράσινο) για το αγροτεμάχιο P0. Αντίστοιχα και στα διαγράμματα 4.1b, 4.1c και 4.1d για τα αγροτεμάχια P1, P2 και P3. Σε όλες τις περιπτώσεις το f_v , υπολογισμένο από τον κανονικοποιημένο δείκτη βλάστησης $NDVI$, παρουσιάζει αυξητική τάση με μικρές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Στα αγροτεμάχια P0 και P1 το f_v παρουσίασε τη μέγιστη τιμή ίση με 0.9 στις 15-08. Το αγροτεμάχιο P2 παρουσίασε και αυτό μέγιστη τιμή στις 15-08 με τιμή ίση με 0.8 με ελαφρώς χαμηλότερα επίπεδα φυλλώματος από τα P0 και P1. Αντίθετα, το αγροτεμάχιο P3, στο οποίο δεν πραγματοποιήθηκε κανένα πότισμα από τον αγρότη, παρουσίασε αυξητική τάση, αλλά η μέγιστη τιμή που παρουσιάστηκε την 01-09 ήταν 0.3. Το αγροτεμάχιο P3 είναι λογικό να παρουσίασε αργότερα τη μέγιστη τιμή του, σε σχέση με τα υπόλοιπα, καθώς η ημερομηνία σποράς ήταν πολύ αργότερα.

Στην εικόνα 4.2 παρουσιάζονται τα 4 αγροτεμάχια στις αντίστοιχες ημερομηνίες που

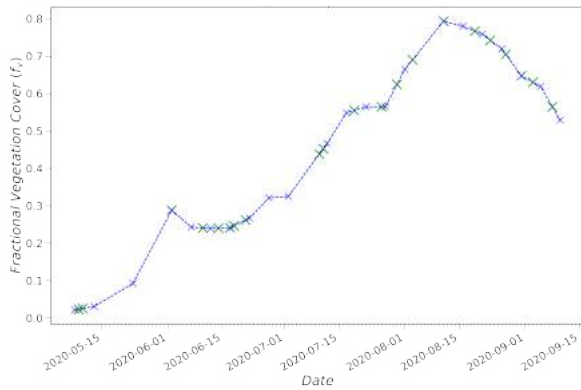
παρουσιάστηκε η μέγιστη τιμή f_v .



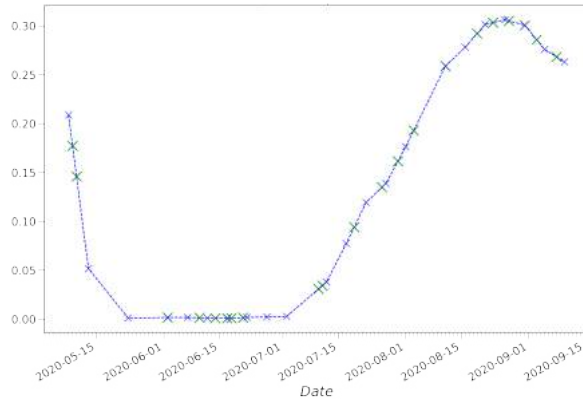
(a) Χρονοσειρά f_v για το αγροτεμάχιο P0.



(b) Χρονοσειρά $LST - f_v$ για το αγροτεμάχιο P1.

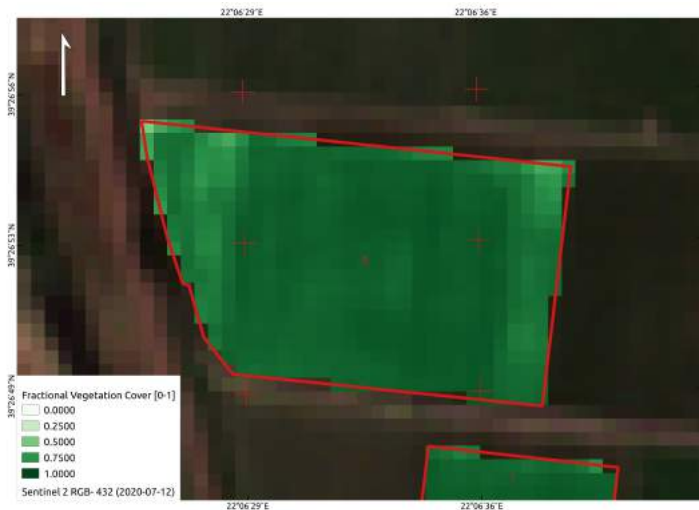


(c) Χρονοσειρά $LST - f_v$ για το αγροτεμάχιο P2.



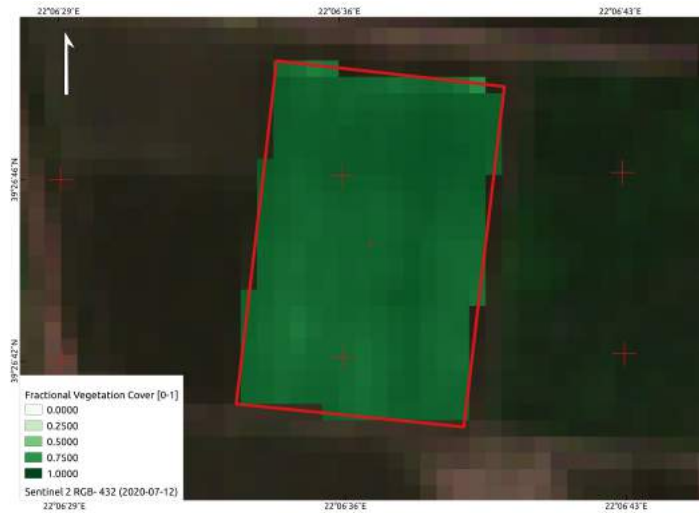
(d) Χρονοσειρά $LST - f_v$ για το αγροτεμάχιο P3.

Εικόνα 4.1. Χρονοσειρές με το μέσο όρο f_v από τα δεδομένα Sentinel 2 (μπλέ) και από τα συνθετικά δεδομένα (πράσινο) για τα αγροτεμάχια α) P0, β) P1, γ) P2 και δ) P3.

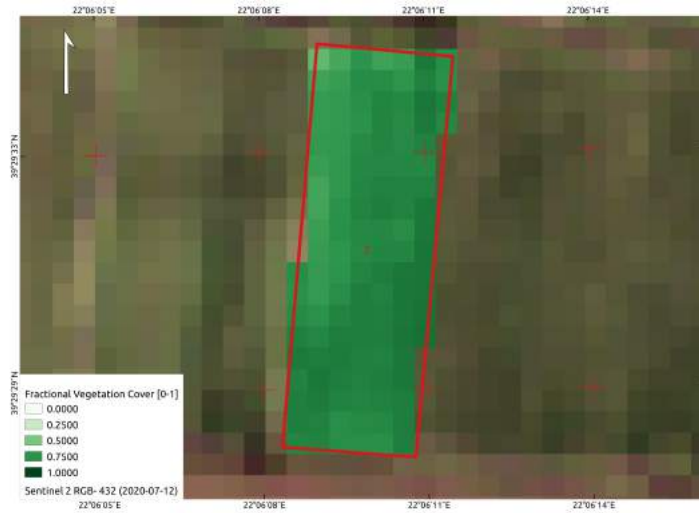


(a) Χάρτης f_v για το αγροτεμάχιο P0 στις 08-15.

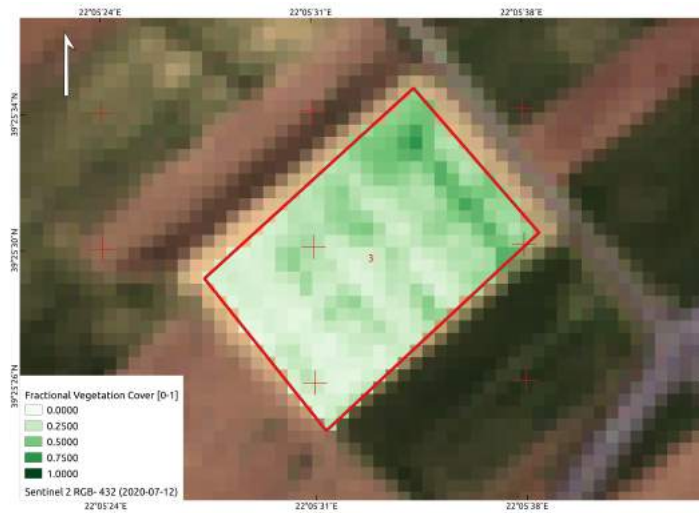
4.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ F_V



(b) Χάρτης f_v για το αγροτεμάχιο P1 στις 08-15.



(c) Χάρτης f_v για το αγροτεμάχιο P2 στις 08-15.



(d) Χάρτης f_v για το αγροτεμάχιο P3 στις 08-27.

Εικόνα 4.2. Χάρτες με την ημερομηνία που παρουσιάστηκε το κατά μέσο όρο μεγαλύτερο f_v για τα αγροτεμάχια a) P0, b) P1, c) P2 και d) P3.

4.2 Αποτελέσματα υπολογισμού ακραίων τιμών θερμοκρασίας

Για τον υπολογισμό των ακραίων τιμών θερμοκρασίας, όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3 χρησιμοποιήθηκαν 3300 στρέμματα αγροτεμαχίων βαμβακιού, ώστε να αντιπροσωπευτεί όσο το δυνατόν καλύτερα η περιοχή μελέτης.

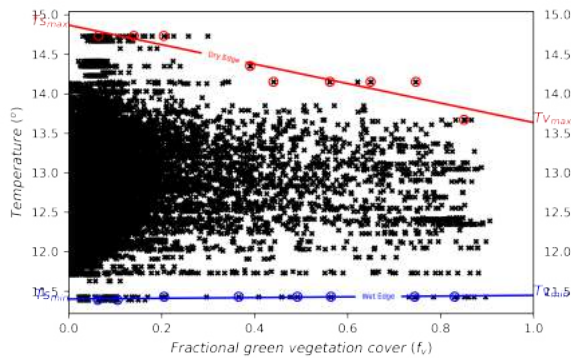
Στο σύνολο δημιουργήθηκαν 21 ζεύγη ακραίων θερμοκρασιών (T_{vmax} , T_{smax} , T_{vmin} , T_{smin}), όσα και οι τελικές ημερομηνίες ECOSTRESS, όπως προέκυψαν από τον χώρο $LST - f_v$. Στην εικόνα 4.3, παρουσιάζονται σε όλες τις διαθέσιμες ημερομηνίες το τετράπλευρο που προέκυψε από την ανάλυση στον χώρο $LST - f_v$. Σε όλες τις περιπτώσεις η μέθοδος υπολογισμού που χρησιμοποιήθηκε κάλυπτε σε μεγάλο βαθμό τα εικονοστοιχεία της περιοχής μελέτης σε κάθε διαφορετική ημερομηνία. Βέβαια μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι ακραίες τιμές T_{vmax} , T_{smax} , T_{vmin} , T_{smin} των πολυγώνων στο χώρο $LST - f_v$ ποικίλουν από ημερομηνία σε ημερομηνία. Αυτό έχει να κάνει αφενός με τη διαφορετική ώρα λήψης των δεδομένων ECOSTRESS, τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούσαν, αλλά και με τη διαφοροποίηση στα επίπεδα βλάστησης στα αγροτεμάχια κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

Αντίστοιχα, στον πίνακα 4.1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ακραίων τιμών θερμοκρασίας T_{vmax} , T_{smax} , T_{vmin} , T_{smin} στις αντίστοιχες ημερομηνίες και ώρες λήψης των δεδομένων.

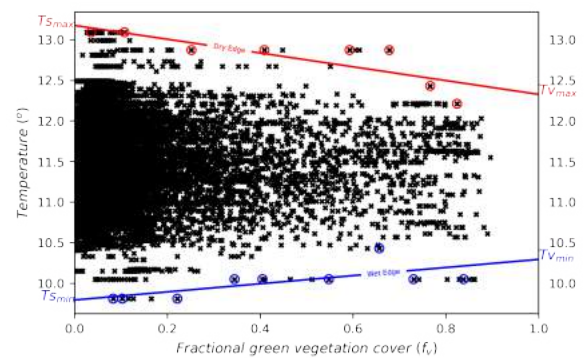
Date	Time [GTM +0]	T_{vmax} [$^{\circ}C$]	T_{vmin} [$^{\circ}C$]	T_{smax} [$^{\circ}C$]	T_{smin} [$^{\circ}C$]
2020-05-09	21:51:36	13.6	11.4	14.9	11.4
2020-05-10	04:22:06	12.3	10.3	13.2	9.8
2020-06-02	12:25:00	39.0	31.4	40.7	27.4
2020-06-10	09:15:47	38.1	33.9	48.0	32.2
2020-06-14	07:41:08	37.9	32.9	40.9	32.9
2020-06-17	06:54:47	31.6	28.3	34.3	28.8
2020-06-18	06:06:30	32.3	27.9	34.2	27.0
2020-06-21	05:20:05	24.3	22.1	26.1	21.4
2020-07-10	21:27:59	20.4	15.5	19.9	16.2
2020-07-11	03:58:09	16.8	14.9	16.8	15.0
2020-07-19	00:48:24	18.1	16.0	18.0	16.5
2020-07-26	15:08:41	38.3	27.8	37.7	32.7
2020-07-30	13:34:12	45.0	25.3	44.8	36.6
2020-08-03	12:00:47	45.2	28.4	43.4	36.0
2020-08-11	15:23:38	36.8	27.9	32.8	29.5
2020-08-19	05:46:37	24.6	20.2	23.2	21.5
2020-08-23	04:12:34	17.6	13.6	15.7	14.2
2020-08-27	02:39:02	17.1	14.2	16.0	14.7
2020-08-31	07:35:16	33.7	25.3	33.5	28.6
2020-09-03	23:31:36	18.8	14.3	18.0	16.0
2020-09-08	04:27:42	17.1	13.1	15.7	13.9

Πίνακας 4.1. Ημερομηνίες, ώρα λήψης των δεδομένων και οι ακραίες τιμές θερμοκρασίας T_{vmax} , T_{smax} , T_{vmin} , T_{smin}

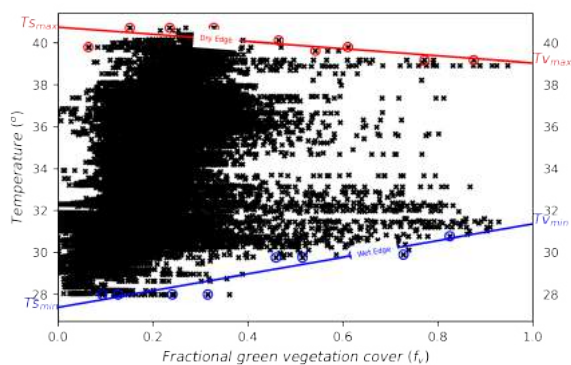
4.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΚΡΑΪΩΝ ΤΙΜΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ



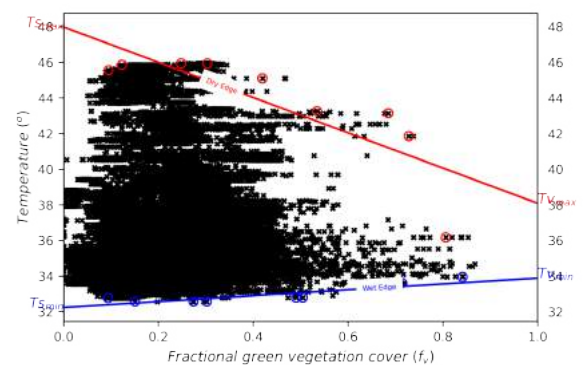
(a) Χώρος $LST - f_v$ 05-09.



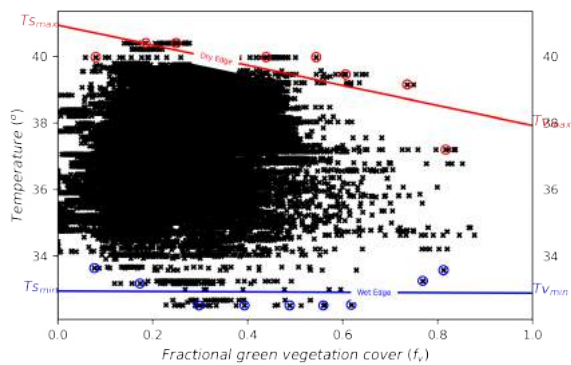
(b) Χώρος $LST - f_v$ 05-10.



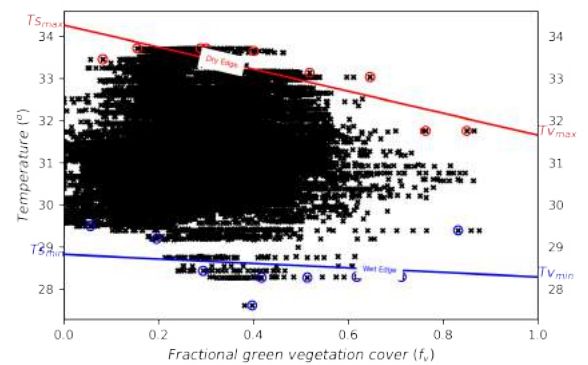
(c) Χώρος $LST - f_v$ 06-02.



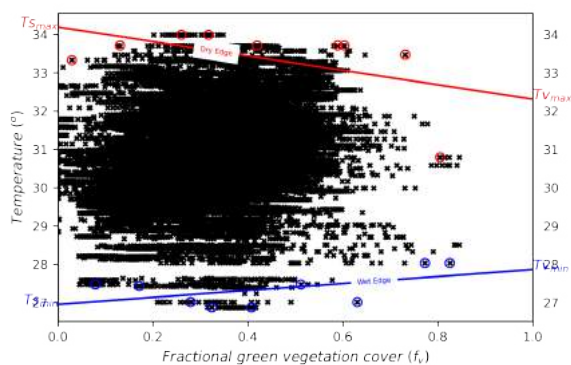
(d) Χώρος $LST - f_v$ 06-10.



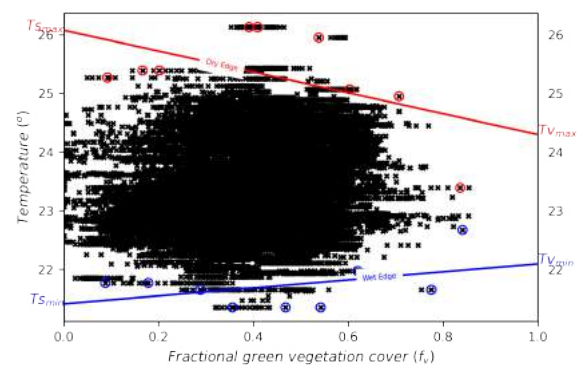
(e) Χώρος $LST - f_v$ 06-14.



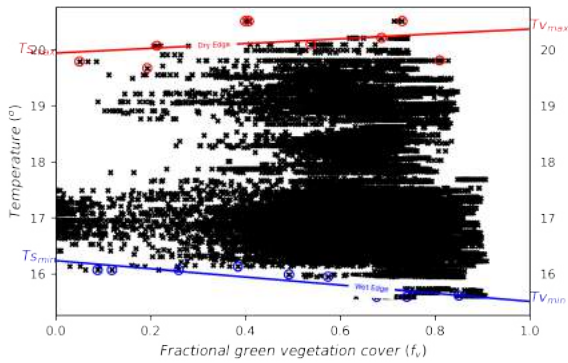
(f) Χώρος $LST - f_v$ 06-17.



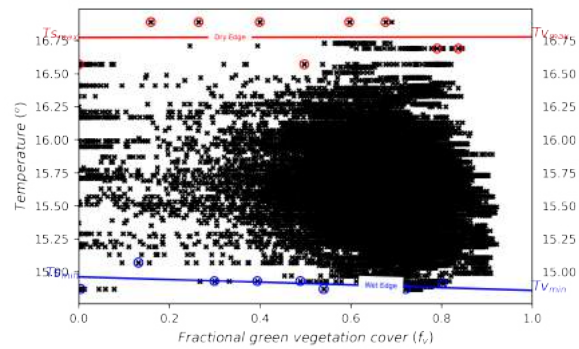
(g) Χώρος $LST - f_v$ 06-18.



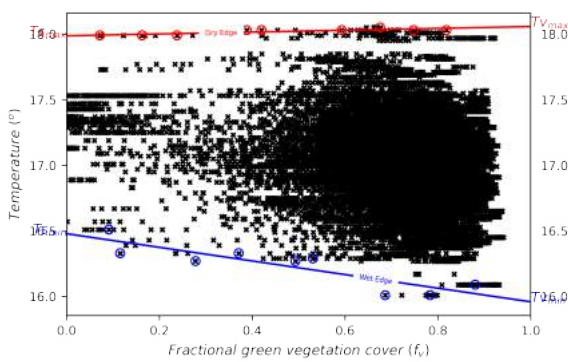
(h) Χώρος $LST - f_v$ 06-21.



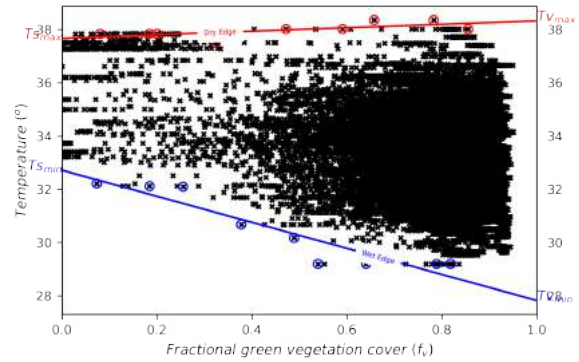
(i) Χώρος $LST - f_v$ 07-10.



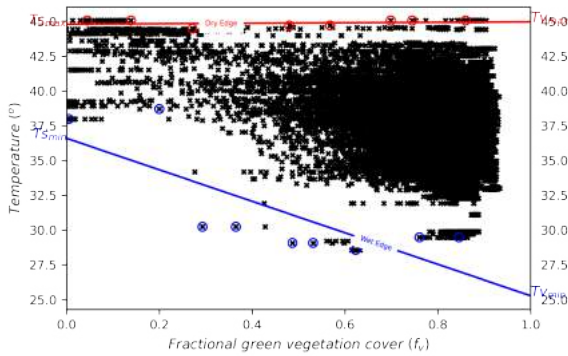
(j) Χώρος $LST - f_v$ 07-11.



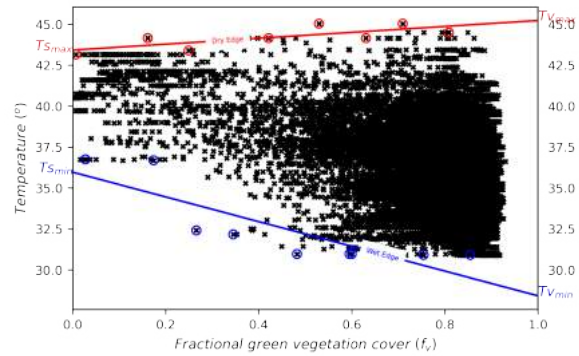
(k) Χώρος $LST - f_v$ 07-19.



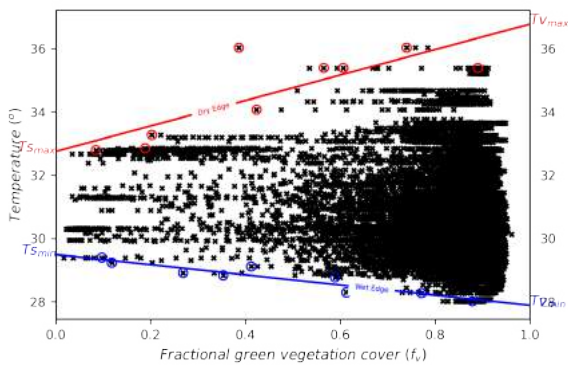
(l) Χώρος $LST - f_v$ 07-26.



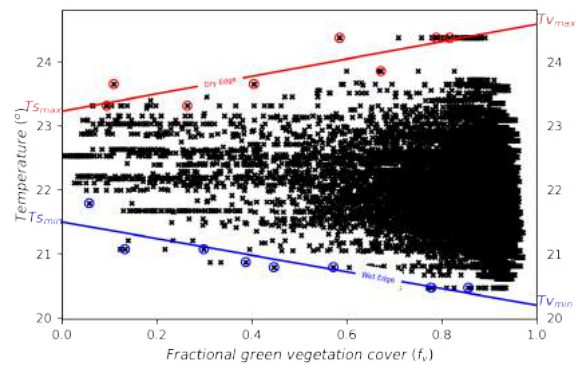
(m) Χώρος $LST - f_v$ 07-30.



(n) Χώρος $LST - f_v$ 08-03.

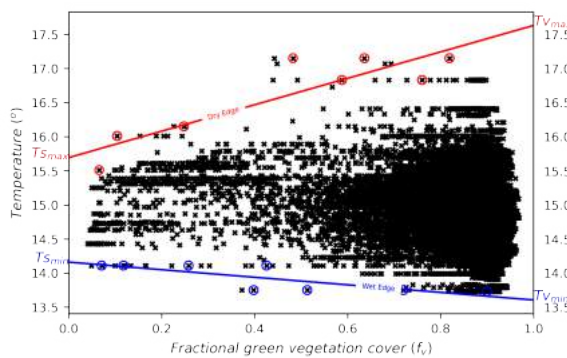


(o) Χώρος $LST - f_v$ 08-11.

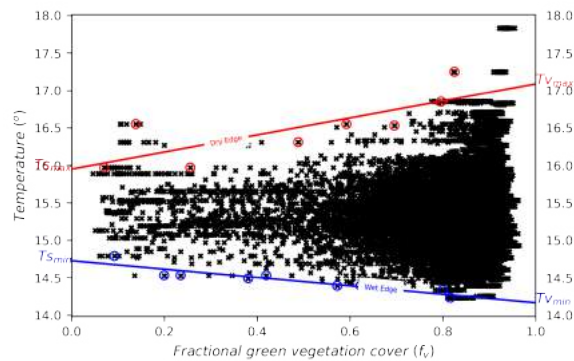


(p) Χώρος $LST - f_v$ 08-19.

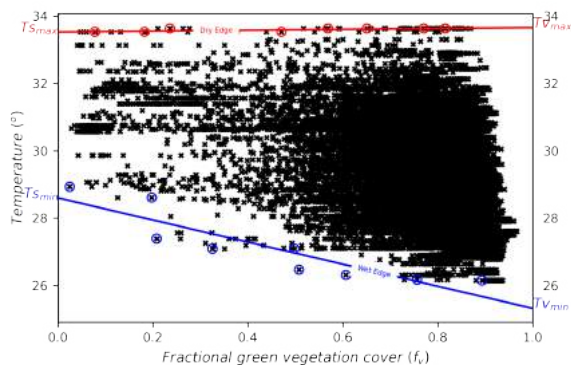
4.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΚΡΑΪΩΝ ΤΙΜΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ



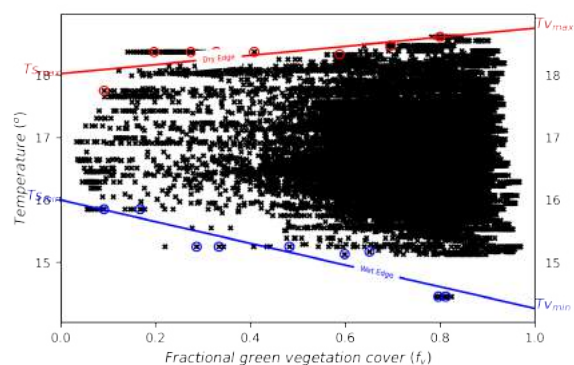
(q) Χώρος $LST - f_v$ 08-23.



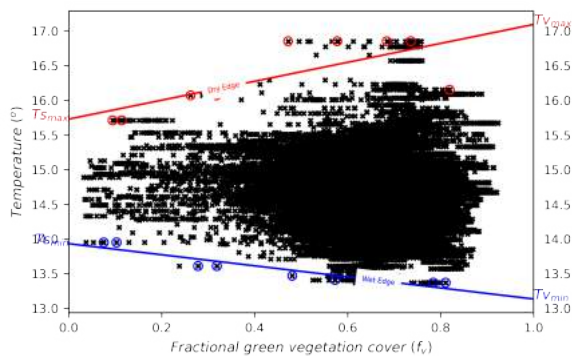
(r) Χώρος $LST - f_v$ 08-27.



(s) Χώρος $LST - f_v$ 08-31.



(t) Χώρος $LST - f_v$ 09-03.



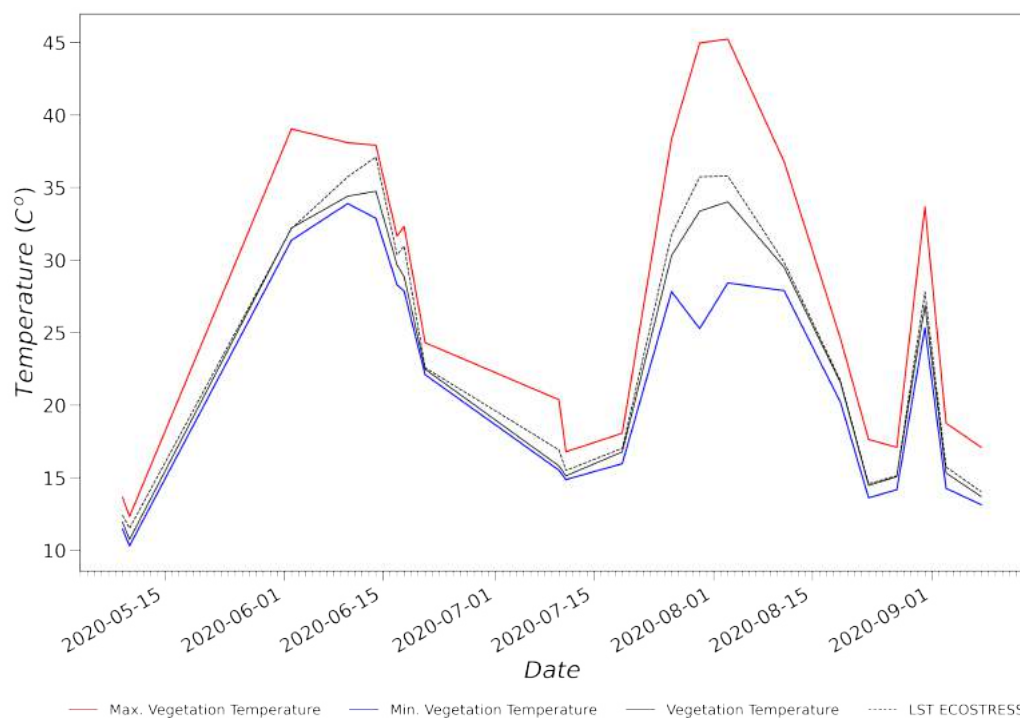
(u) Χώρος $LST - f_v$ 09-08.

Εικόνα 4.3. Αποτελέσματα στον χώρο $LST - f_v$ για όλες τις ημερομηνίες ECOSTRESS

4.3 Αποτελέσματα διαμερισμού της θερμοκρασίας LST σε T_v και T_s

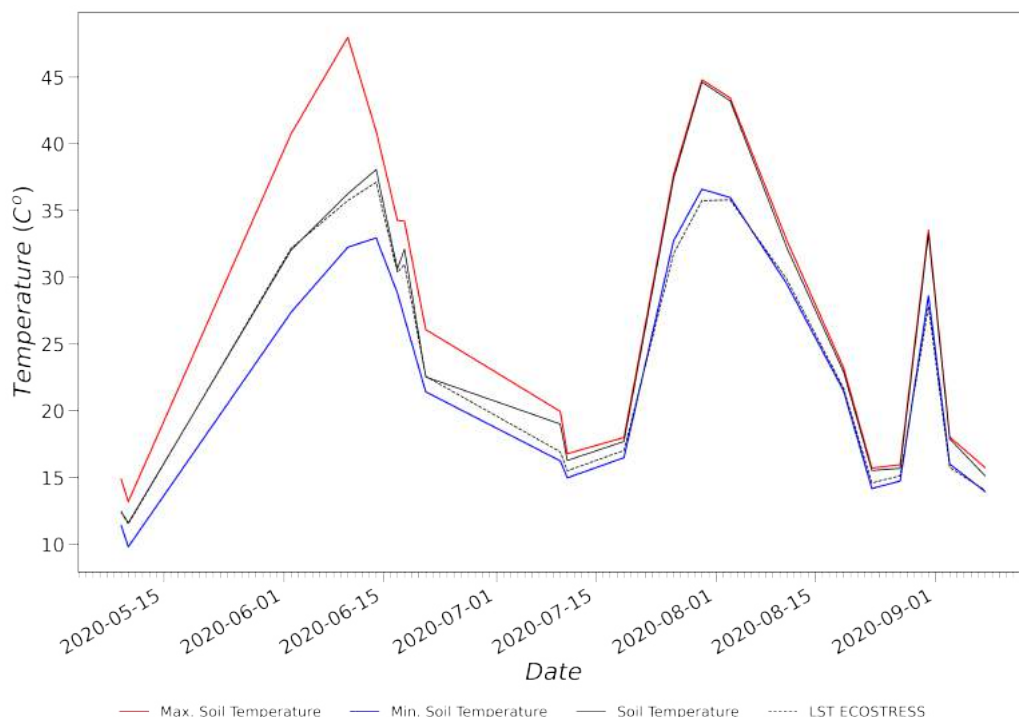
Για τον υπολογισμό του συντελεστή K_s , ήταν απαραίτητος ο διαμερισμός του LST σε συνιστώσες θερμοκρασίας εδάφους και θερμοκρασίας βλάστησης. Ο λόγος, ήταν ότι ο συντελεστής K_s αφορά αποκλειστικά τη διαδικασία της διαπνοής του φυτού και λειτουργεί σαν συντελεστής μείωσης της διαδικασίας. Για το διαμερισμό του LST χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος όπως αναλύθηκε στην υποενότητα 3.3.2 που βασίζεται στις αρχές του TSEB (J.M. Norman, Kustas, and Humes 1995).

Στο διάγραμμα 4.4 παρουσιάζονται η μέση τιμή LST , οι θερμοκρασίες T_{vmax} και T_{vmin} , καθώς και η μέση θερμοκρασία T_v για το αγροτεμάχιο P0 σε όλη την καλλιεργητική περίοδο. Οι ακραίες τιμές T_{vmax} και T_{vmin} ήταν πλήρως συμβατές με τις θερμοκρασίες LST και η θερμοκρασία T_v ήταν κοντά στο T_{vmin} καθ'όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Στις 30-07 και 03-08, σύμφωνα με τα αποτελέσματα, παρουσιάστηκε ύδατικό στρες στο αγροτεμάχιο με τη μέση θερμοκρασία βλάστησης T_v στους $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ ενώ η θερμοκρασία T_{vmin} ήταν $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα.

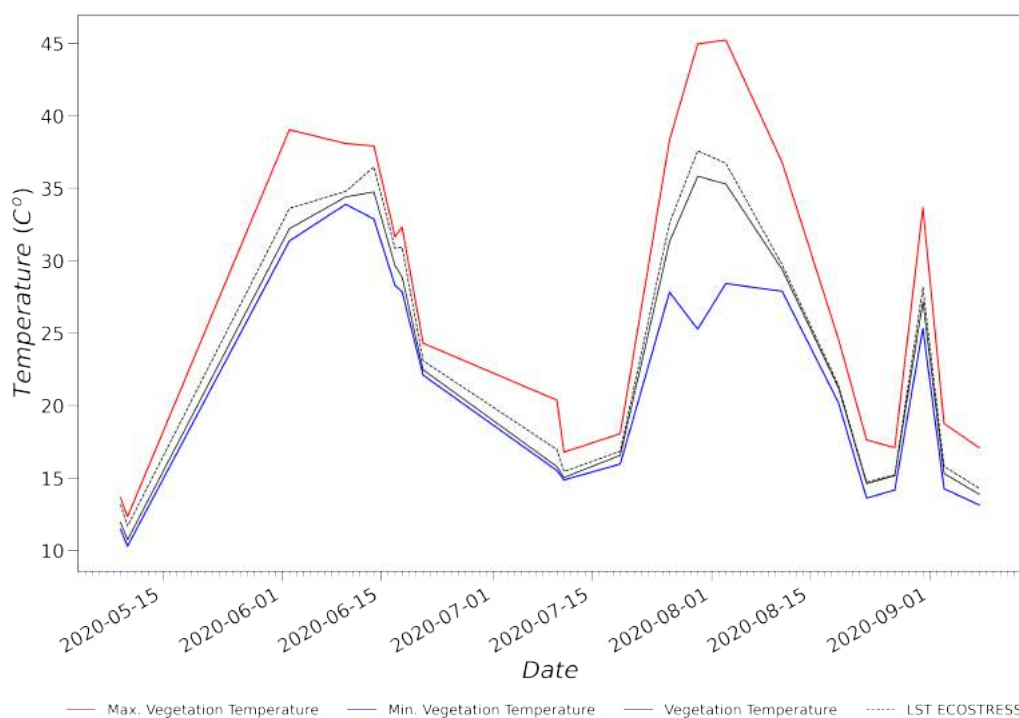


Εικόνα 4.4. Διάγραμμα με τις μέσες θερμοκρασίες LST (μαύρη διακεκομμένη γραμμή), τη θερμοκρασία βλάστησης T_v (μαύρη γραμμή), και τις ακραίες θερμοκρασίες T_{vmax} (κόκκινη γραμμή) και T_{vmin} (μπλέ γραμμή) για το αγροτεμάχιο P0.

Στο διάγραμμα 4.5, παρουσιάζονται η μέση τιμή LST , οι θερμοκρασίες T_{smax} και T_{smin} , καθώς και η μέση θερμοκρασία T_s για το αγροτεμάχιο P0, σε όλη την καλλιεργητική περίοδο. Οι ακραίες τιμές T_{smax} και T_{smin} και σε αυτή τη περίπτωση ήταν πλήρως συμβατές με τις θερμοκρασίες LST και η θερμοκρασία T_s ήταν κοντά στο T_{smax} καθ'όλη τη διάρκεια της περιόδου.



Εικόνα 4.5. Διάγραμμα με τις μέσες θερμοκρασίες LST (μαύρη διακεκομμένη γραμμή), την θερμοκρασία εδάφους T_s (μαύρη γραμμή), και τις ακραίες θερμοκρασίες T_{smax} (κόκκινη γραμμή) και T_{smin} (μπλέ γραμμή) για το αγροτεμάχιο P0.

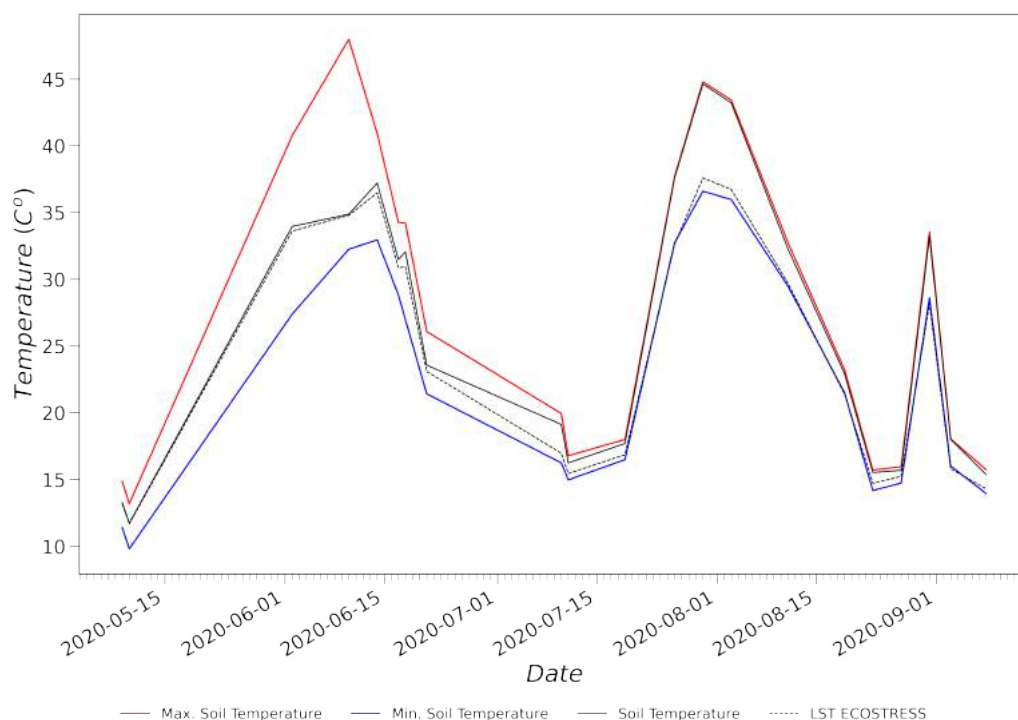


Εικόνα 4.6. Διάγραμμα με τις μέσες θερμοκρασίες LST (μαύρη διακεκομμένη γραμμή), την θερμοκρασία βλάστησης T_v (μαύρη γραμμή), και τις ακραίες θερμοκρασίες T_{vmax} (κόκκινη γραμμή) και T_{vmin} (μπλέ γραμμή) για το αγροτεμάχιο P1.

Στο διάγραμμα 4.6, παρουσιάζονται η μέση τιμή LST , οι θερμοκρασίες T_{vmax} και T_{vmin} , καθώς και η μέση θερμοκρασία T_v για το αγροτεμάχιο P1 σε όλη την καλλιεργητική περίοδο.

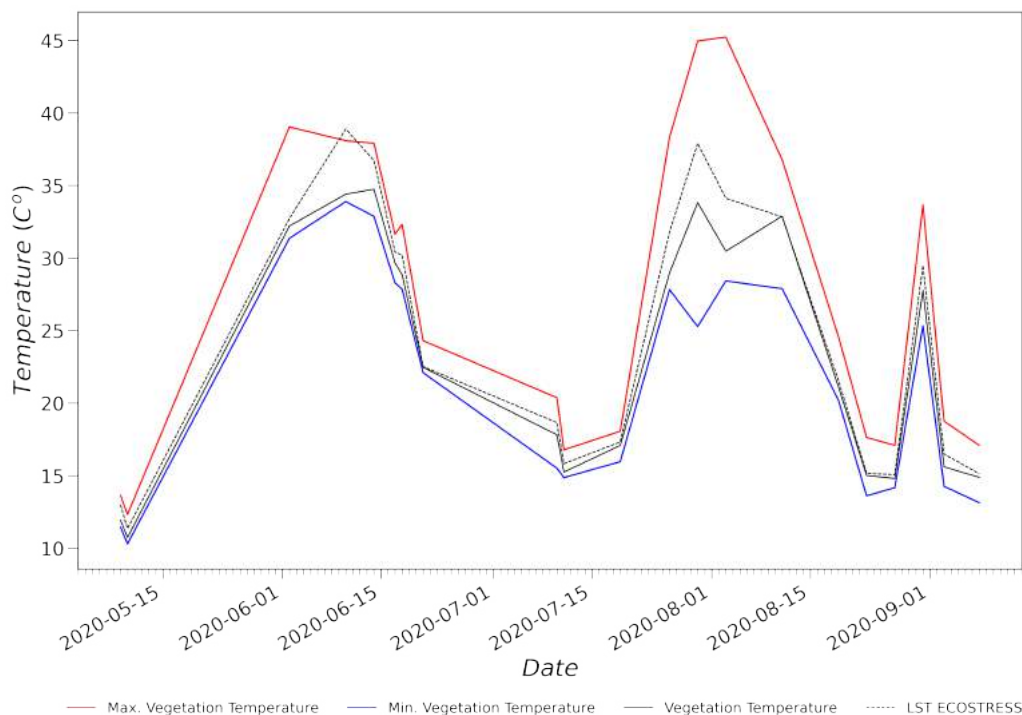
Οι ακραίες τιμές T_{vmax} και T_{vmin} ήταν πλήρως συμβατές με τις θερμοκρασίες LST και σε αυτή την περίπτωση, ενώ η θερμοκρασία T_v ήταν κοντά στο T_{vmin} καθ'όλη τη διάρκεια της περιόδου. Το αγροτεμάχιο P1 παρουσίασε παρόμοια συμπεριφορά με το P0 και κρίνοντας από τις πρακτικές που ακολουθήθηκαν από τον αγρότη, που στην ουσία ήταν ίδιες για τα συγκεκριμένα αγροτεμάχια, επιβεβαιώνει τη δυνατότητα της παρούσας μεθοδολογίας να ανιχνεύει αγροτεμάχια με χαμηλό υδατικό στρες.

Αντίστοιχα, στο διάγραμμα 4.7, παρουσιάζονται η μέση τιμή LST , οι θερμοκρασίες T_{smax} και T_{smin} , καθώς και η μέση θερμοκρασία T_s για το αγροτεμάχιο P1 σε όλη την καλλιεργητική περίοδο. Οι ακραίες τιμές T_{smax} και T_{smin} και σε αυτή την περίπτωση ήταν πλήρως συμβατές με τις θερμοκρασίες LST και η θερμοκρασία T_s ήταν κοντά στο T_{smax} καθ'όλη την διάρκεια της περιόδου, αντίστοιχα με το P0.

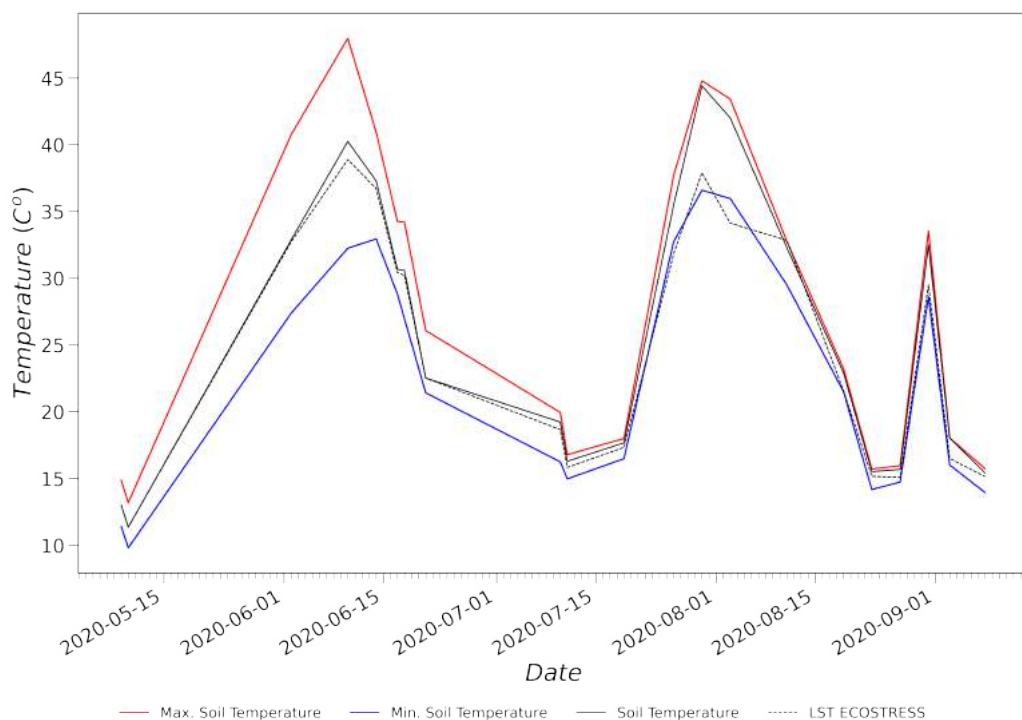


Εικόνα 4.7. Διάγραμμα με τις μέσες θερμοκρασίες LST (μαύρη διακεκομμένη γραμμή), τη θερμοκρασία εδάφους T_s (μαύρη γραμμή), και τις ακραίες θερμοκρασίες T_{smax} (κόκκινη γραμμή) και T_{smin} (μπλέ γραμμή) για το αγροτεμάχιο P1.

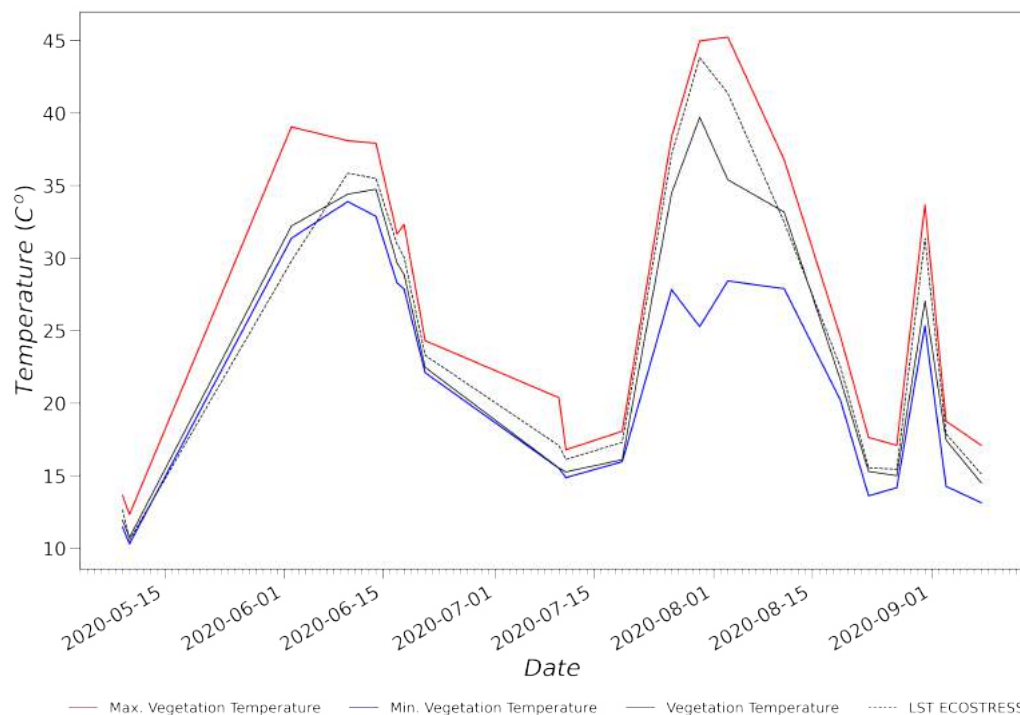
Στο διάγραμμα 4.8 παρουσιάζονται η μέση τιμή LST , οι θερμοκρασίες T_{vmax} και T_{vmin} , καθώς και η μέση θερμοκρασία T_v για το αγροτεμάχιο P2. Οι ακραίες τιμές T_{vmax} και T_{vmin} ήταν πλήρως συμβατές με τις θερμοκρασίες LST και σε αυτή την περίπτωση πλην της ημερομηνίας 14-06 όπου η μέση τιμή LST ξεπέρασε κατά $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ την μέγιστη θερμοκρασία T_{vmax} . Από το σχεδιάσιμο της μεθοδολογίας, κάτι τέτοιο ήταν πιθανό να συμβεί σε περίπτωση ακραίων θερμοκρασιών σε σχέση με το υπόλοιπο δείγμα, όπως και συνέβη σε αυτή την περίπτωση. Η θερμοκρασία T_v δεν ήταν κοντά στο T_{vmin} καθ'όλη την διάρκεια της περιόδου παρά μόνο στην αρχή. Στις 10-07 που πραγματοποιήθηκε η μία και μοναδική εφαρμογή άρδευσης, η θερμοκρασία T_v πλησίασε την ελάχιστη ακραία θερμοκρασία T_{vmin} , δηλαδή δεν βρισκόταν υπό υδατικό στρες.



Εικόνα 4.8. Διάγραμμα με τις μέσες θερμοκρασίες LST (μαύρη διακεκομμένη γραμμή), τη θερμοκρασία βλάστησης T_v (μαύρη γραμμή), και τις ακραίες θερμοκρασίες T_{vmax} (κόκκινη γραμμή) και T_{vmin} (μπλέ γραμμή) για το αγροτεμάχιο P2.



Εικόνα 4.9. Διάγραμμα με τις μέσες θερμοκρασίες LST (μαύρη διακεκομμένη γραμμή), τη θερμοκρασία εδάφους T_s (μαύρη γραμμή), και τις ακραίες θερμοκρασίες T_{smax} (κόκκινη γραμμή) και T_{smin} (μπλέ γραμμή) για το αγροτεμάχιο P2.



Εικόνα 4.10. Διάγραμμα με τις μέσες θερμοκρασίες LST (μαύρη διακεκομμένη γραμμή), τη θερμοκρασία βλάστησης T_v (μαύρη γραμμή), και τις ακραίες θερμοκρασίες T_{vmax} (κόκκινη γραμμή) και T_{vmin} (μπλέ γραμμή) για το αγροτεμάχιο P3.

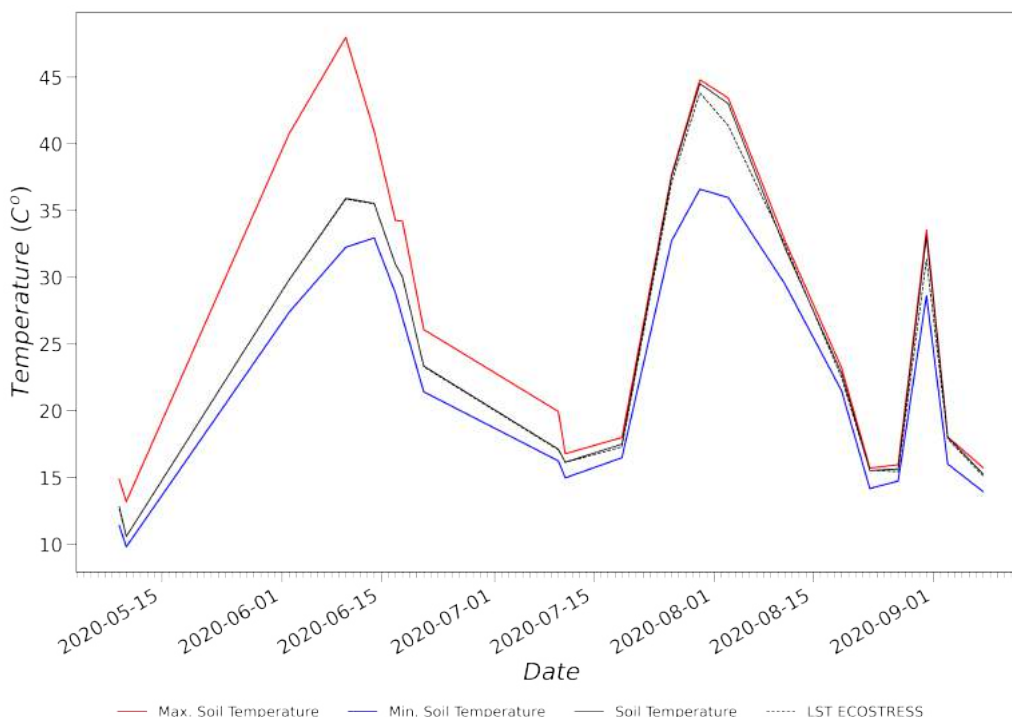
Αντίστοιχα, στο διάγραμμα 4.9, παρουσιάζονται η μέση τιμή LST , οι θερμοκρασίες T_{smax} και T_{smin} , καθώς και η μέση θερμοκρασία T_s για το αγροτεμάχιο P2 σε όλη την καλλιεργητική περίοδο. Οι ακραίες τιμές T_{smax} και T_{smin} και σε αυτή την περίπτωση ήταν πλήρως συμβατές με τις θερμοκρασίες LST και η θερμοκρασία T_s ήταν κοντά στο T_{smax} καθ'όλη την διάρκεια της περιόδου, αντίστοιχα με το P0 και P1, με τη διαφορά ότι απείχε λίγο περισσότερο από τις προηγούμενες 2 περιπτώσεις.

Τέλος, στο διάγραμμα 4.10, παρουσιάζονται η μέση τιμή LST , οι θερμοκρασίες T_{vmax} και T_{vmin} , καθώς και η μέση θερμοκρασία T_v για το αγροτεμάχιο P3. Οι ακραίες τιμές T_{vmax} και T_{vmin} ήταν πλήρως συμβατές με τις θερμοκρασίες LST και σε αυτή την περίπτωση. Η θερμοκρασία T_v δεν ήταν κοντά στο T_{vmin} καθ'όλη την διάρκεια της περιόδου, παρά μόνο μέχρι τις 20-07. Το αγροτεμάχιο P3 βρισκόταν στο μεγαλύτερο υδατικό στρες σε σχέση με τα προηγούμενα 3 αγροτεμάχια, κρίνοντας από τη γενική εικόνα και συμπεριφορά των θερμοκρασιών βλάστησης. Αυτό συμβάδιζε με τα δεδομένα ελέγχου, καθώς δεν πραγματοποιήθηκε καμία εφαρμογή άρδευσης στο συγκεκριμένο αγροτεμάχιο και ήταν λογικό να εμφανίσει μεγαλύτερες θερμοκρασίες βλάστησης, παρ'ότι οι τύποι χώματος ήταν διαφορετικοί για τα αγροτεμάχια.

Στο διάγραμμα 4.11, παρουσιάζονται η μέση τιμή LST , οι θερμοκρασίες T_{smax} και T_{smin} , καθώς και η μέση θερμοκρασία T_s για το αγροτεμάχιο P3 σε όλη την καλλιεργητική περίοδο. Οι ακραίες τιμές T_{smax} και T_{smin} και σε αυτή την περίπτωση ήταν πλήρως συμβατές με τις θερμοκρασίες LST και η θερμοκρασία T_s ήταν κοντά στο T_{smax} καθ'όλη τη διάρκεια της περιόδου, αντίστοιχα με τα προηγούμενα αγροτεμάχια.

Αναλύοντας το σύνολο των διαγραμμάτων, παρατηρήθηκε ότι κατα το διαμερισμό των θερμοκρασιών, τα αγροτεμάχια P2 και P3 παρουσιάζαν έντονες διακυμάνσεις στις θερμοκρασίες T_v . Οι θερμοκρασίες αυτές ήταν ως επί το πλείστον υψηλότερες από

4.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΣΤΡΕΣ K_s ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ



Εικόνα 4.11. Διάγραμμα με τις μέσες θερμοκρασίες LST (μαύρη διακεκομμένη γραμμή), τη θερμοκρασία εδάφους T_s (μαύρη γραμμή), και τις ακραίες θερμοκρασίες T_{smax} (κόκκινη γραμμή) και T_{smin} (μπλέ γραμμή) για το αγροτεμάχιο P3.

αυτές των αγροτεμαχίων P0 και P1, τα οποία είχαν μια πιο ομαλή συμπεριφορά. Αυτές οι διακυμάνσεις, πιθανό να οφείλονται στις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή, κατά την διάρκεια λήψης των δεδομένων από την αποστολή ECOSTRESS, ή σε λάθη μοντελοποίησης της θερμοκρασίας LST ή και στην αποτυχία απόδοσης κατάλληλης τιμής από τη μεθοδολογία. Γενικά όμως, η μεθοδολογία εκτιμάται ότι ανιχνεύει σωστά τις περισσότερες φορές τις διαφορετικές περιπτώσεις επιπέδων υδατικού στρες στα αγροτεμάχια, μέσω της θερμοκρασίας βλάστησης.

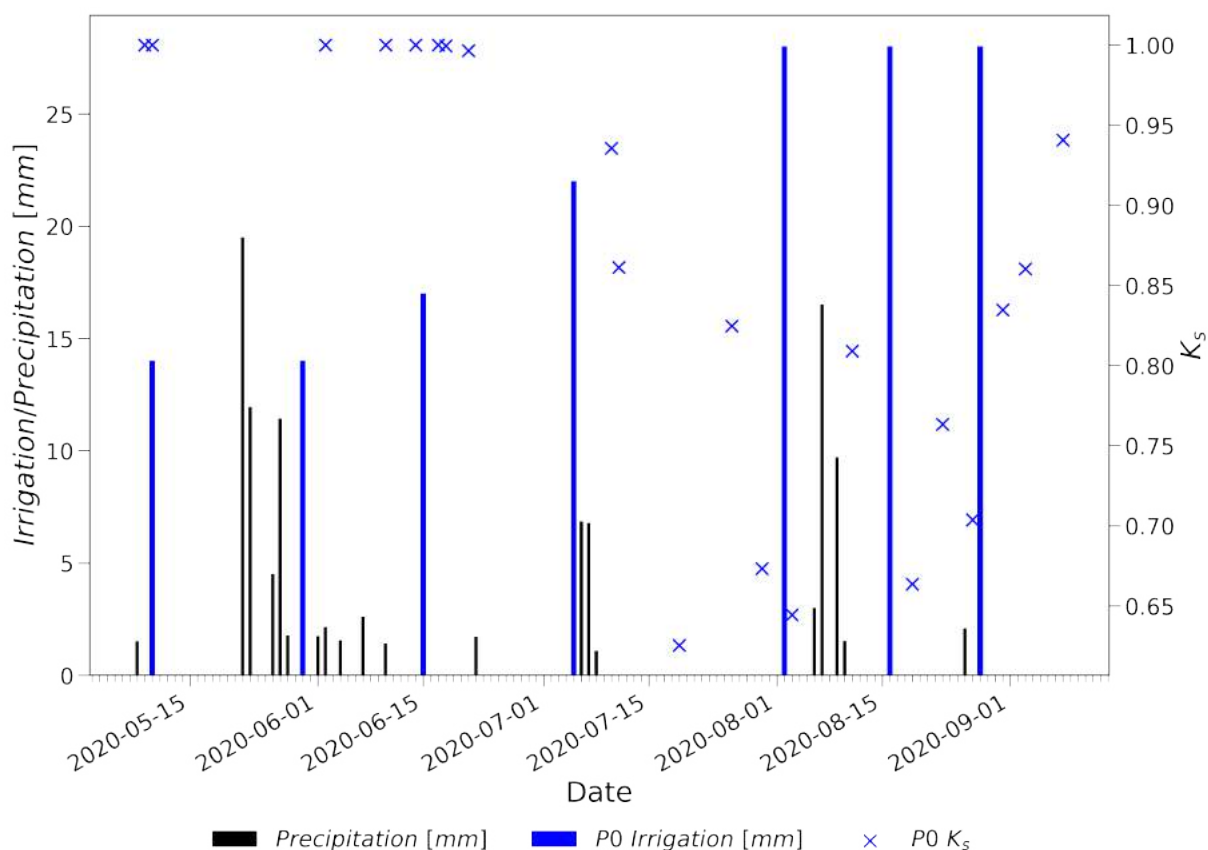
4.4 Αποτελέσματα υπολογισμού του συντελεστή υδατικού στρες K_s και αξιολόγηση

Το τελικό βήμα της παρούσας εργασίας όπως προαναφέρθηκε ήταν η ποσοτικοποίηση του υδατικού στρες μέσω του συντελεστή μείωσης K_s . Για τον υπολογισμό του K_s , χρησιμοποιήκε η σχέση 3.5, όπως προτάθηκε από τους Olivera-Guerra, Merlin, Er-Raki, et al. 2018; Olivera-Guerra, Merlin, and Er-Raki 2020.

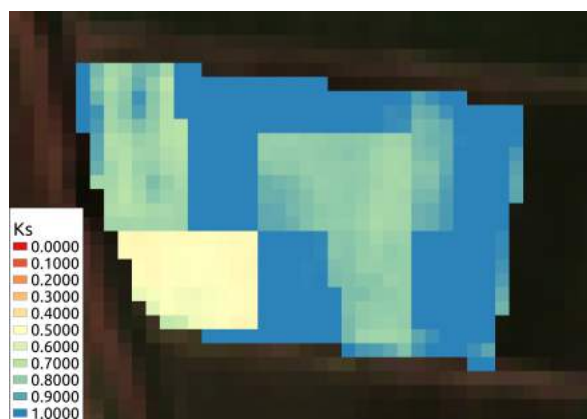
Στο διάγραμμα 4.12, παρουσιάζεται ο συντελεστής K_s (μπλέ σημεία) στις ημερομηνίες ECOSTRESS, ενώ επίσης παρουσιάζονται το ύψος νερού των αρδεύσεων (μπλέ στήλη), στις ημερομηνίες που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και το ύψος βροχής των κατακρμνήσεων στην περιοχή (μαύρη στήλη) για το αγροτεμάχιο P0. Ο συντελεστής K_s , από την αρχή της περιόδου μέχρι και τα τέλη του Ιουνίου ήταν κοντά στο 1 κάτι που ήταν λογικό, καθώς το βαμβάκι στην περιοχή μελέτης δεν βρίσκεται στη φάση ανάπτυξης ανθικών οφθαλμών (χτένια) που απαιτούνται σημαντικές ποσότητες νερού. Στο αγροτεμάχιο εκτός από τις 3 αρδεύσεις συνολικού ύψους 45 mm, το συνολικό ύψος βροχής ήταν 80 mm. Τα 3 ποτίσματα,

4.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΣΤΡΕΣ K_s ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

σύμφωνα με τον αγρότη ήταν ελαφρίες δόσεις νερού για την καλύτερη ανάπτυξη, λόγω του τύπου χώματος του αγροτεμαχίου. Η εικόνα μεταβλήθηκε στο πρώτο διάστημα του Ιουλίου (01-07 έως 20-07), που σύμφωνα με τα αποτελέσματα το f_v ξεπέρασε το 0.4, παρουσιάστηκε πτώση του K_s και ελαφρό υδατικό στρες στο αγροτεμάχιο. Στο διάστημα αυτό ήταν 3 οι διαθέσιμες ημερομηνίες ECOSTRESS και παρ'ότι το συνολικό ύψος νερού που προστέθηκε στο έδαφος ήταν 37 mm (15 mm από κατακρμνήσεις και 22 mm από 1 εφαρμογή άρδευσης) ο K_s από 0.93 στις 11-07 (Εικόνα 4.13a) κατέληξε στο 0.62 στις 19-07 (Εικόνα 4.13b).



Εικόνα 4.12. Διάγραμμα με το ύψος νερού από εφαρμογές άρδευσης (μπλέ στήλη), το ύψος των κατακρμνήσεων (μαύρη στήλη) και το συντελεστή K_s για το αγροτεμάχιο P0.

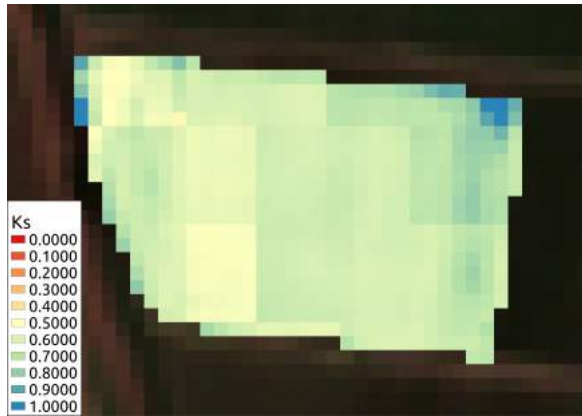


(a) Συντελεστής K_s στις 11-07 για το αγροτεμάχιο P0.

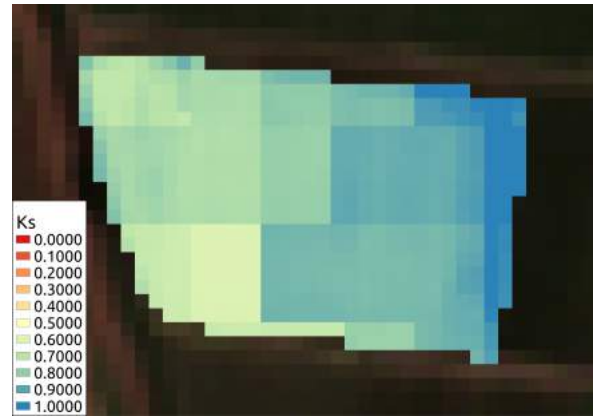


(b) Συντελεστής K_s στις 19-07 για το αγροτεμάχιο P0.

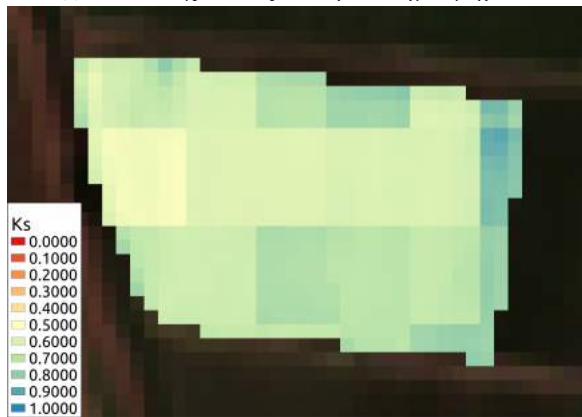
4.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΣΤΡΕΣ K_s ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ



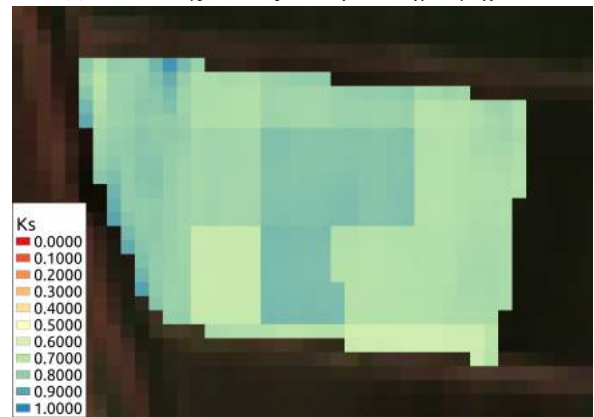
(c) Συντελεστής K_s στις 03-08 για το αγροτεμάχιο P0.



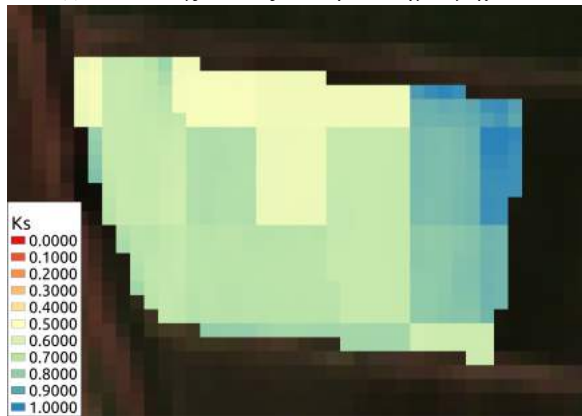
(d) Συντελεστής K_s στις 11-08 για το αγροτεμάχιο P0.



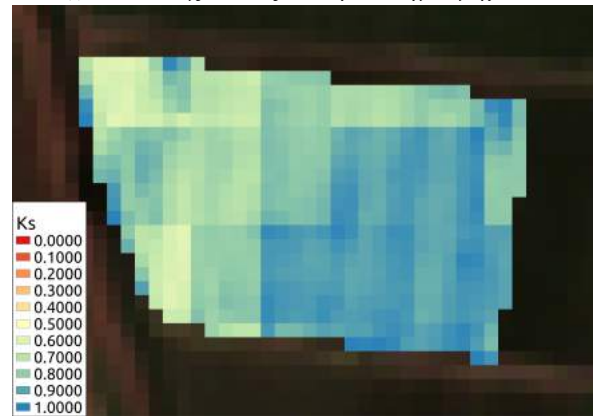
(e) Συντελεστής K_s στις 19-08 για το αγροτεμάχιο P0.



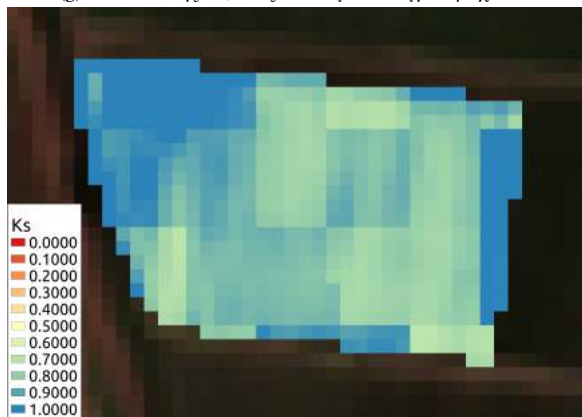
(f) Συντελεστής K_s στις 23-08 για το αγροτεμάχιο P0.



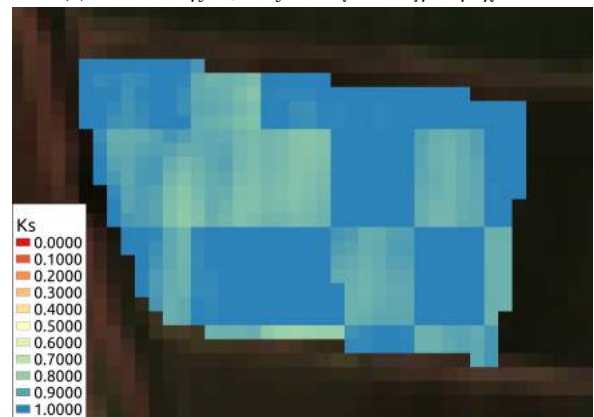
(g) Συντελεστής K_s στις 27-08 για το αγροτεμάχιο P0.



(h) Συντελεστής K_s στις 31-08 για το αγροτεμάχιο P0.



(i) Συντελεστής K_s στις 03-09 για το αγροτεμάχιο P0.



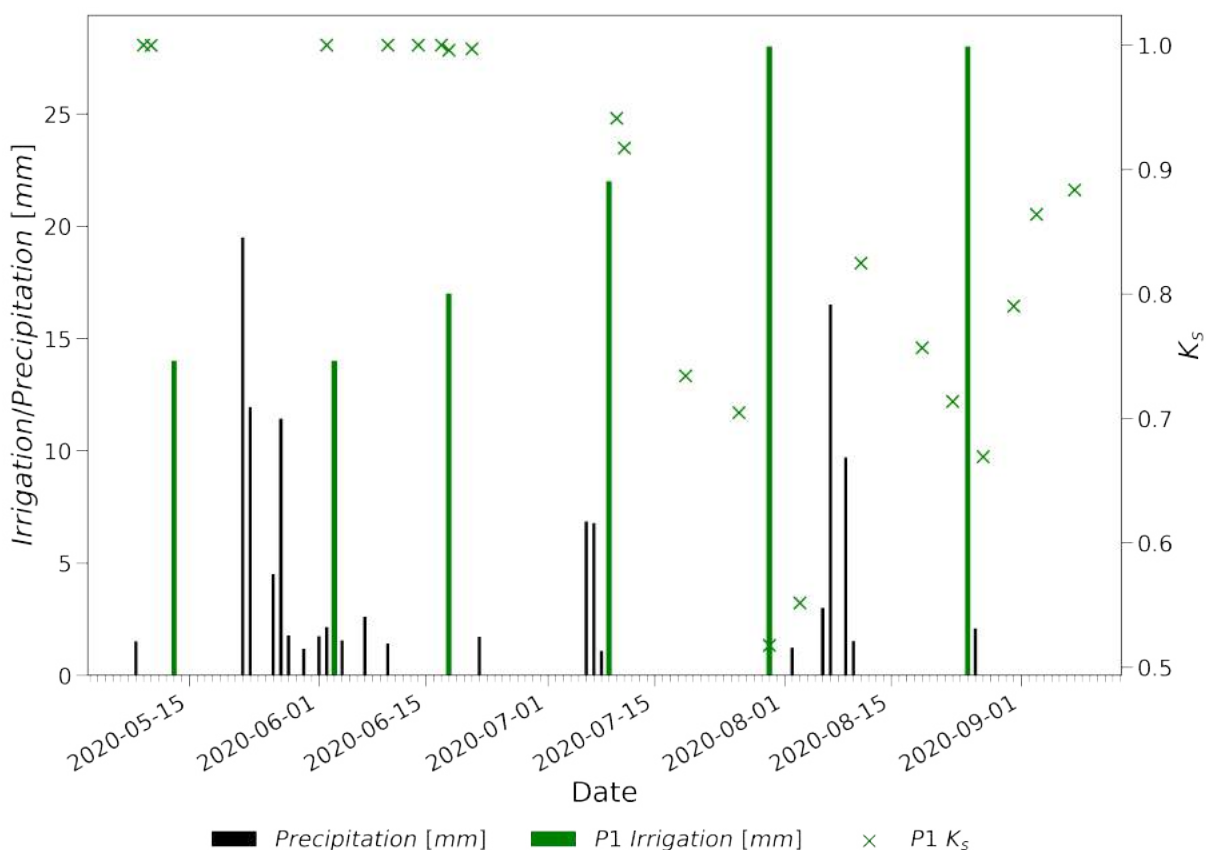
(j) Συντελεστής K_s στις 08-09 για το αγροτεμάχιο P0.

Εικόνα 4.13. Συντελεστής K_s σε διάφορες ημερομηνίες για το αγροτεμάχιο P0.

Στη συνέχεια ο K_s στο επόμενο χρονικό (20-07 έως 01-08) διάστημα παρουσίασε διακυμάνσεις, καθώς ανέβηκε ξανά στο 0.80 στις 08-03 (Εικόνα 4.13c) και στη συνέχεια μειώθηκε ξανά στο 0.66 (Εικόνα 4.13e). Αυτό είναι πιθανό να οφειλόταν στις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή ή σε σφάλμα απόδοσης τιμής κατάλληλης θερμοκρασίας από το μοντέλο.

Στις 02-08 ο αγρότης πρόσθεσε 28 mm ύψος νερού στο έδαφος και στο διάστημα 06 έως 10 Αυγούστου προστέθηκαν στο έδαφος επιπλέον 90 mm ύψος νερού από βροχοπτώσεις. Ο συντελεστής K_s , από το 0.64 στις 03-08 αυξήθηκε στο 0.81 στις 11-08 (Εικόνα 4.13d). Αυτή η μεταβολή υγρασίας στο έδαφος ανιχνεύθηκε από την διαδικασία που ακολουθήθηκε. 14 ημέρες αργότερα, στις 16-08, ο αγρότης πρόσθεσε επιπλέον 28 mm νερού στο έδαφος. Ο συντελεστής K_s στις 19-08 (Εικόνα 4.13e), ήταν στο 0.66 και στη συνέχεια στις 23-08 (Εικόνα 4.13f) άγγιξε το 0.77.

Τέλος, στις 28-08, (Εικόνα 4.13g) προστέθηκαν τα τελευταία 28 mm με τον δείκτη K_s από το 0.70 να αυξάνεται στο 0.83, 0.86 και 0.94 στις 31-08 (Εικόνα 4.13h), 03-09 (Εικόνα 4.13i) και 09-08 (Εικόνα 4.13j) αντίστοιχα. Στο σημείο αυτό, το αγροτεμάχιο είχε μικρές απαιτήσεις σε νερό, διότι εισήλθε στη φάση ωρίμανσης. Αυτή η συμπεριφορά ανιχνεύθηκε από τη διαδικασία που ακολουθήθηκε.



Εικόνα 4.14. Διάγραμμα με το ύψος νερού από εφαρμογές άρδευσης (πράσινη στήλη), το ύψος των κατακρμνήσεων (μαύρη στήλη) και το συντελεστή K_s για το αγροτεμάχιο P1.

Στο διάγραμμα 4.14, παρουσιάζεται ο συντελεστής K_s (πράσινα σημεία) στις ημερομηνίες ECOSTRESS, ενώ επίσης παρουσιάζονται το ύψος νερού των αρδεύσεων (πράσινη στήλη) στις ημερομηνίες που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και το ύψος βροχής των κατακρμνήσεων στην περιοχή (μαύρη στήλη) για το αγροτεμάχιο P1. Το αγροτεμάχιο P1 είχε παρόμοια

4.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΣΤΡΕΣ K_s ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

συμπεριφορά με του P0 όσον αφορά την ανάπτυξη του με βάση το f_v . Και σε αυτή την περίπτωση, στο αγροτεμάχιο εφαρμόστηκαν 3 αρδεύσεις από την σπορά του αγροτεμαχίου έως τις αρχές Ιουλίου με συνολικό ύψος 45 mm, ενώ το συνολικό ύψος βροχοπτώσεων ήταν 80 mm. Ο συντελεστής K_s παρέμεινε κοντά στο 1 σε όλο το χρονικό διάστημα, με πολύ μικρές διακυμάνσεις.

Και σε αυτή την περίπτωση, η εικόνα μεταβλήθηκε κατά το πρώτο μισό του Ιουλίου όπου και ξεκίνησε η πτώση του K_s . Πιο συγκεκριμένα, στο διάστημα 01 έως 15 Ιουλίου, όπως και στο αγροτεμάχιο P0, οι διαθέσιμες ημερομηνίες ECOSTRESS ήταν 3 και παρ'ότι το συνολικό ύψος νερού που προστέθηκε στο έδαφος ήταν 37 mm (15 mm από κατακρμνήσεις και 22 mm από 1 εφαρμογή άρδευσης) ο K_s από 0.91 στις 11-07 (Εικόνα 4.15a) κατέληξε στο 0.73 στις 19-07 (Εικόνα 4.15b). Το συγκεκριμένο αγροτεμάχιο βρισκόταν σε κατά μέσο όρο λιγότερο υδατικό στρες στο συγκεκριμένο διάστημα, σε σχέση με το P0. Στη συνέχεια, ο συντελεστής K_s , συνέχισε να παρουσιάζει πτωτική πορεία και κατέληξε στις 30-07 στο 0.51. Την ίδια ημερομηνία, σύμφωνα με τα δεδομένα, ο αγρότης πρόσθεσε στο έδαφος 28 mm ύψος νερού, ενώ στο διάστημα 06 έως 10 Αυγούστου προστέθηκαν στο έδαφος επιπλέον 90 mm ύψος νερού από βροχοπτώσεις και στις 11-08 (Εικόνα 4.15d) ο συντελεστής αγγίξε το 0.83 ακολουθώντας ανοδική πορεία, ενώ στις επόμενες 15 ημέρες παρουσιάστηκε ξανά μείωση.

Τέλος, στις 25-08 προστέθηκαν τα τελευταία 28 mm με τον δείκτη K_s από 0.66 στις 27-08 (Εικόνα 4.15e), αυξήθηκε στο 0.79, 0.86 και 0.88 στις 31-08 (Εικόνα 4.15f), 03-09 (Εικόνα 4.15g) και 09-08 (Εικόνα 4.15h) αντίστοιχα. Η συμπεριφορά του αγροτεμαχίου P1 ήταν παρόμοια με του αγροτεμαχίου P0 που αποτελούσαν και τα δύο καλά ποτισμένα αγροτεμάχια του δείγματος.



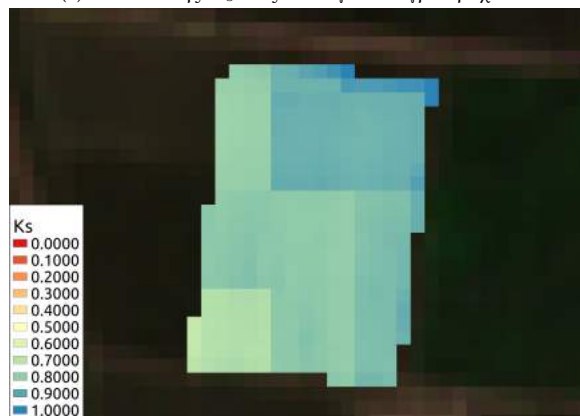
(a) Συντελεστής K_s στις 11-07 για το αγροτεμάχιο P1.



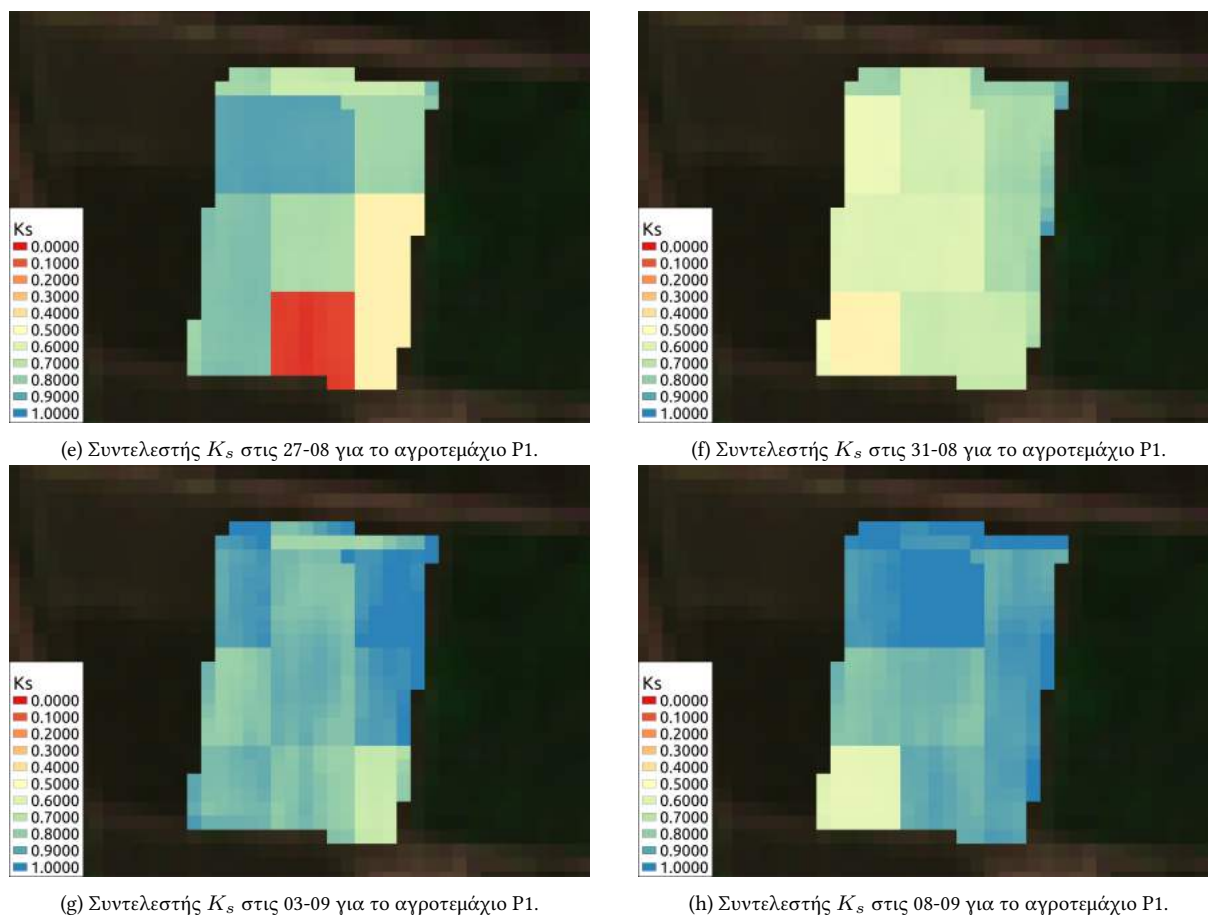
(b) Συντελεστής K_s στις 19-07 για το αγροτεμάχιο P1.



(c) Συντελεστής K_s στις 30-07 για το αγροτεμάχιο P1.



(d) Συντελεστής K_s στις 11-08 για το αγροτεμάχιο P1.



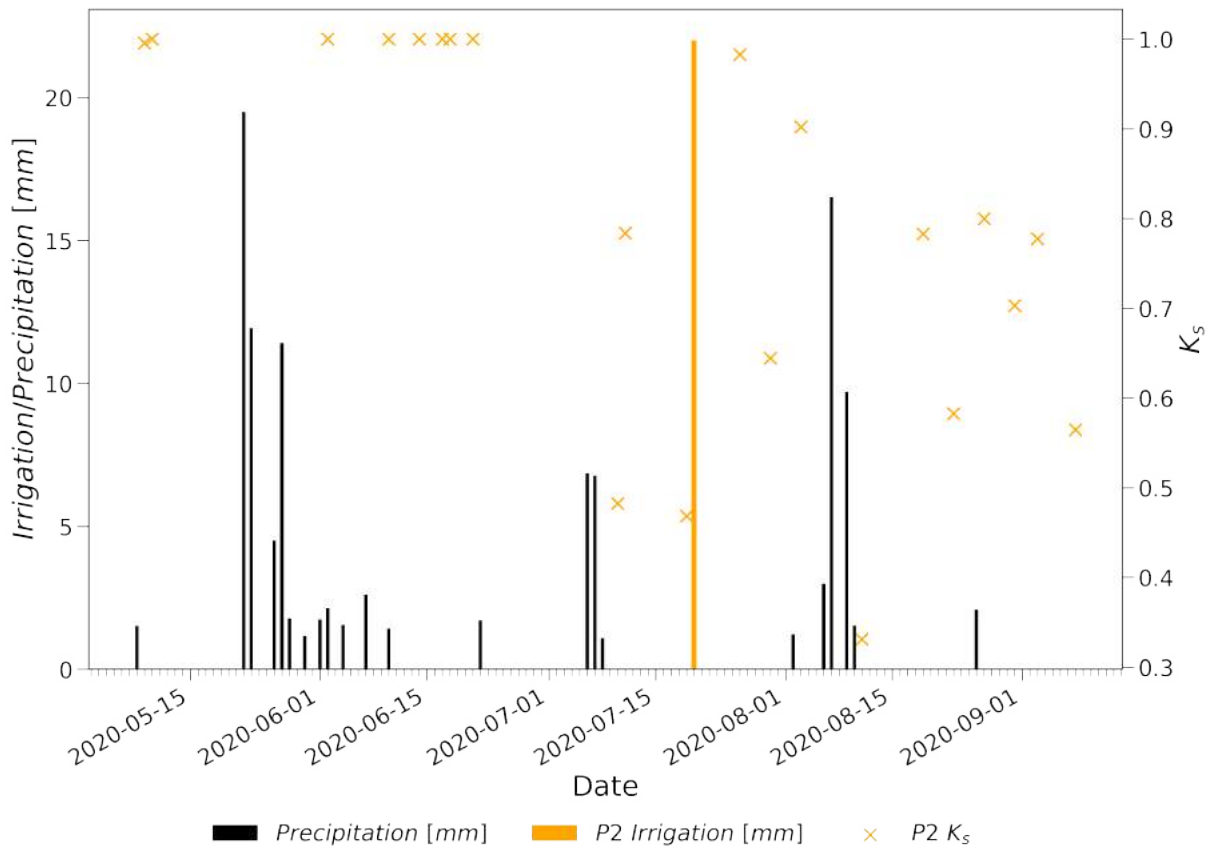
Εικόνα 4.15. Συντελεστής K_s σε διάφορες ημερομηνίες για το αγροτεμάχιο P1.

Στο διάγραμμα 4.16, παρουσιάζεται ο συντελεστής K_s (πορτοκαλί σημεία) στις ημερομηνίες ECOSTRESS, ενώ επίσης παρουσιάζονται το ύψος νερού των αρδεύσεων (πορτοκαλί στήλη) στις ημερομηνίες που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και το ύψος βροχής των κατακρμνήσεων στην περιοχή (μαύρη στήλη) για το αγροτεμάχιο P2. Στο διάστημα από την σπορά μέχρι τις αρχές Ιουλίου, ο συντελεστής K_s , βρισκόταν κοντά στο 1. Στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, σύμφωνα με τον αγρότη, δεν πραγματοποιήθηκε κάποιο πότισμα, καθώς ο τύπος χώματος του αγροτεμαχίου δεν το απαιτούσε, σε αντίθεση με τα αγροτεμάχια P0 και P1. Στις 10-07 (Εικόνα 4.17a), ο συντελεστής K_s , έπειτα από προσθήκη 14 mm ύψος νερού από βροχοπτώσεις των προηγούμενων ημερών, άγγιξε το 0.48 ενώ στις 11-07 (Εικόνα 4.17b), το 0.78.

Στις 20-07 από τον αγρότη πραγματοποιήθηκε το μοναδικό πότισμα με ύψος νερού 22 mm. Ο συντελεστής K_s στις 19-07 (Εικόνα 4.17c), ήταν 0.46 και το αγροτεμάχιο βρισκόταν σε υδατικό στρες, ενώ στις 26-07 (Εικόνα 4.17d), άγγιξε το 0.98. Συνεπώς, τα φυτά μείωσαν τη θερμοκρασία τους, έπειτα από το πότισμα και αυτό ανιχνεύτηκε από την μεθοδολογία. Στη συνέχεια, ο δείκτης K_s , στις 30-07 (Εικόνα 4.17e), μειώθηκε στο 0.65 για να ξανα-ανέβει στο 0.90, στις 03-08 (Εικόνα 4.17f). Στην περίπτωση αυτή, είναι πολύ πιθανό η μεθοδολογία να έχει αποτύχει να αποδώσει σωστά την κατάσταση στο αγροτεμάχιο ή να υπήρξε κάποιο λάθος στη μοντελοποίηση του LST .

Στις 11-08 (4.17g), αμέσως μετά τις βροχοπτώσεις συνολικού ύψους 90 mm, ο συντελεστής K_s , άγγιξε το 0.33 και στο υπόλοιπο της διάρκειας κυμαίνονταν μεταξύ του 0.55 και του 0.8, παρουσιάζοντας αρκετά έντονες διακυμάνσεις (Εικόνες 4.17h, 4.17i, 4.17j).

4.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΣΤΡΕΣ K_s ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ



Εικόνα 4.16. Διάγραμμα με το ύψος νερού από εφαρμογές άρδευσης (πορτοκαλί στήλη), το ύψος των κατακρμνήσεων (μαύρη στήλη) και το συντελεστή K_s για το αγροτεμάχιο P2.

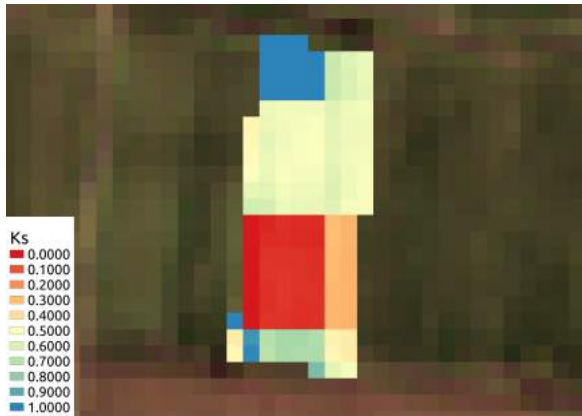


(a) Συντελεστής K_s στις 10-07 για το αγροτεμάχιο P2.



(b) Συντελεστής K_s στις 11-07 για το αγροτεμάχιο P2.

4.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΣΤΡΕΣ K_s ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ



(c) Συντελεστής K_s στις 19-07 για το αγροτεμάχιο P2.



(d) Συντελεστής K_s στις 26-07 για το αγροτεμάχιο P2.



(e) Συντελεστής K_s στις 30-07 για το αγροτεμάχιο P2.



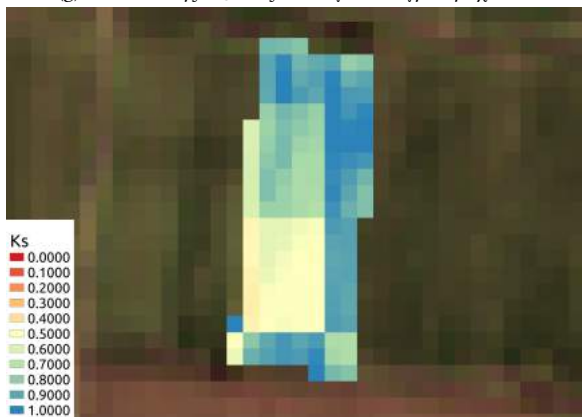
(f) Συντελεστής K_s στις 03-08 για το αγροτεμάχιο P2.



(g) Συντελεστής K_s στις 11-08 για το αγροτεμάχιο P2.



(h) Συντελεστής K_s στις 27-08 για το αγροτεμάχιο P2.



(i) Συντελεστής K_s στις 03-08 για το αγροτεμάχιο P2.

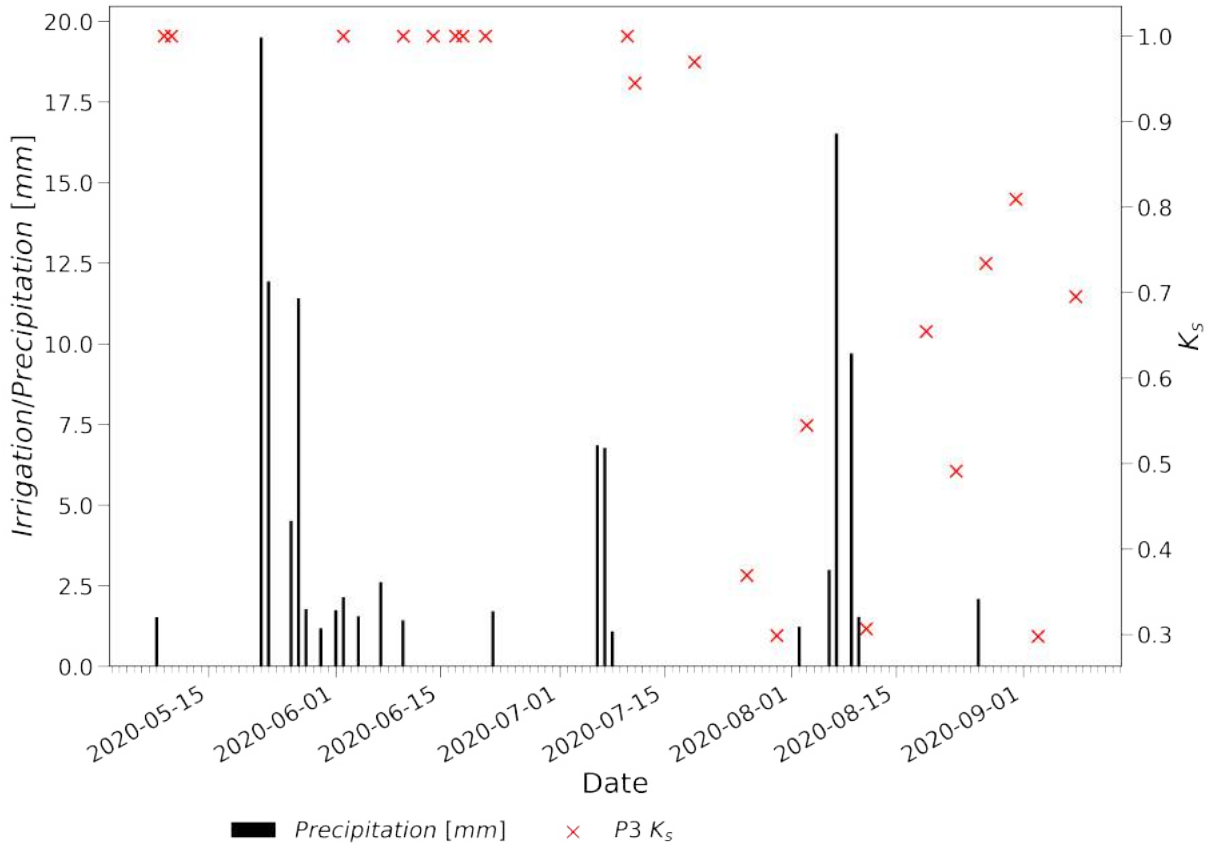


(j) Συντελεστής K_s στις 08-09 για το αγροτεμάχιο P2.

Εικόνα 4.17. Συντελεστής K_s σε διάφορες ημερομηνίες για το αγροτεμάχιο P2.

4.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΣΤΡΕΣ K_s ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Στο διάγραμμα 4.18, παρουσιάζεται ο συντελεστής K_s (κόκκινα σημεία) στις ημερομηνίες ECOSTRESS, ενώ επίσης παρουσιάζεται το ύψος βροχής των κατακρμνήσεων στην περιοχή (μαύρη στήλη) για το αγροτεμάχιο P3. Στο αγροτεμάχιο P3, δεν πραγματοποιήθηκε κανένα πότισμα κατά την καλλιεργητική περίοδο.



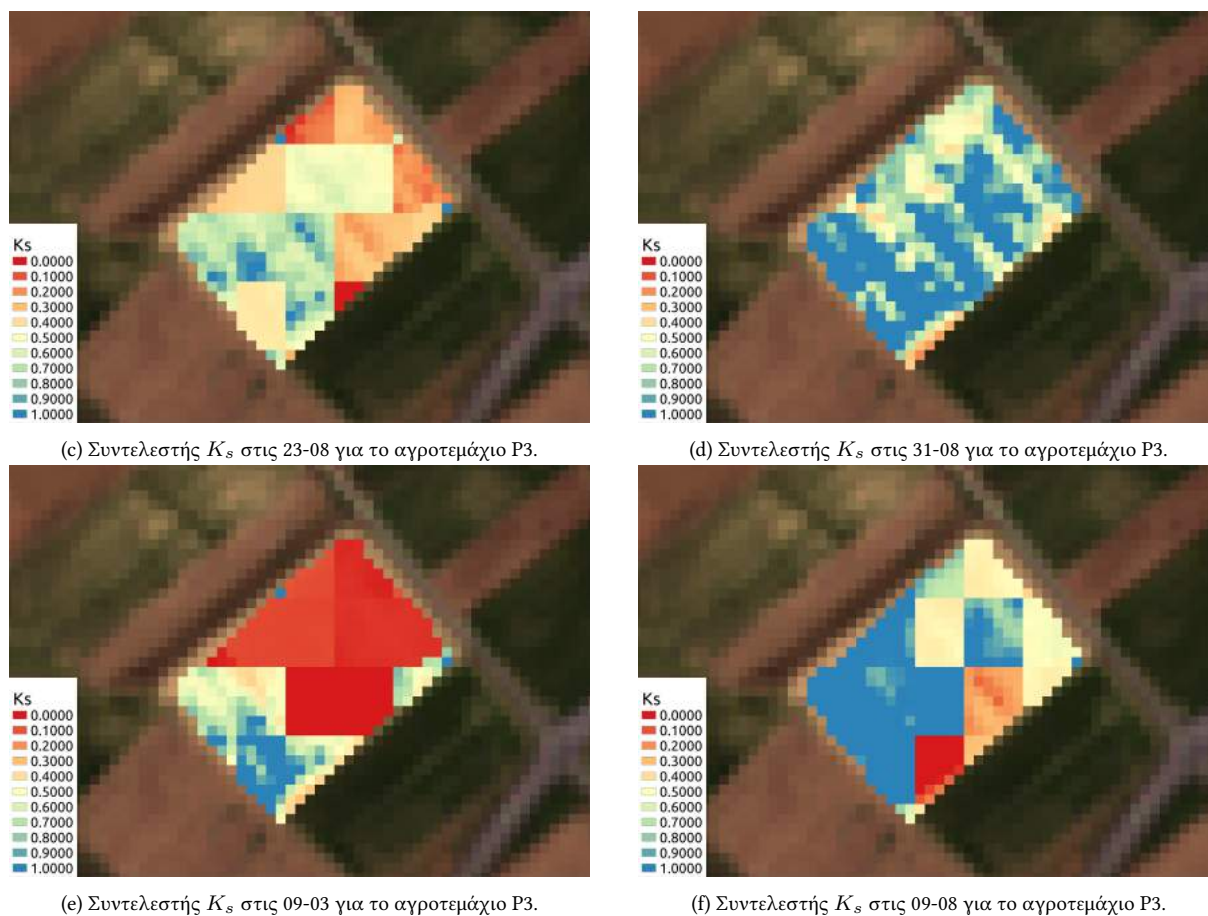
Εικόνα 4.18. Διάγραμμα με το ύψος νερού από εφαρμογές άρδευσης (κόκκινη στήλη), το ύψος των κατακρμνήσεων (μαύρη στήλη) και το συντελεστή K_s για το αγροτεμάχιο P3.



(α) Συντελεστής K_s στις 19-07 για το αγροτεμάχιο P3.



(β) Συντελεστής K_s στις 30-07 για το αγροτεμάχιο P3.



Εικόνα 4.19. Συντελεστής K_s σε διάφορες ημερομηνίες για το αγροτεμάχιο P3.

Και σε αυτή την περίπτωση, στο διάστημα από τη σπορά μέχρι τις αρχές Ιουλίου, ο συντελεστής K_s , βρισκόταν κοντά στο 1, και διατηρήθηκε σε υψηλότερα επίπεδα μέχρι τα μέσα Ιουλίου. Αυτό ήταν αναμενόμενο και ανιχνεύτηκε από την μεθοδολογία, παρόλο που δεν πραγματοποιήθηκε κάποιο πότισμα, καθώς το αγροτεμάχιο σπάρθηκε αρκετές ημέρες αργότερα σε σχέση με τα προηγούμενα 3 και οι απαιτήσεις για νερό στα πρώτα στάδια της καλλιέργειας (ανάπτυξη φύλλων, βλαστού και πλευρικών κλαδίσκων) είναι μικρότερες.

Η πτώση του συντελεστή K_s , ξεκίνησε στις 19-07 (Εικόνα 4.19a), με τιμή 0.96 και κατέληξε στις 30-07 (Εικόνα 4.19b) στο 0.20, σε πολύ έντονο υδατικό στρες. Στη συνέχεια, μετά τις βροχοπτώσεις που ακολούθησαν στην περιοχή μελέτης στο διάστημα 05 έως 10 Αυγούστου, ο συντελεστής K_s είχε αυξητική τάση και άγγιξε το 0.8 στις 31-08 (Εικόνα 4.19d). Και σε αυτό το αγροτεμάχιο, όπως και στο προηγούμενο (P2), παρουσιάστηκαν έντονες διακυμάνσεις στο συντελεστή K_s κατά το τέλος της περιόδου, λόγω λάθους στην μοντελοποίηση του LST και συνεπώς και του μοντέλου στην απόδοση τιμών θερμοκρασίας.

Πραγματοποιώντας ανασκόπηση των αποτελεσμάτων στο σύνολο τους, παρατηρήθηκε ότι η μεθοδολογία μετά από την προσθήκη νερού στο έδαφος, είτε από βροχοπτώση, είτε από πότισμα, ανιχνεύει τη μεταβολή στη θερμοκρασία του φυτού και αποδίδει τις περισσότερες φορές κατάλληλα την τιμή του συντελεστή K_s .

Τα αγροτεμάχια P0 και P1 είχαν την πιο ομαλή συμπεριφορά του συντελεστή K_s στο χρόνο, ενώ το αγροτεμάχιο P2 παρουσίαζε διακυμάνσεις στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, που δεν ξεπερνούσαν το 0.2, είτε λόγω λάθους της μοντελοποίησης του LST, είτε του μοντέλου διαμερισμού των θερμοκρασιών. Το αγροτεμάχιο P4, παρουσίαζε

4.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΣΤΡΕΣ K_s ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

τελείως διαφορετική εικόνα σε σχέση με τα προηγούμενα αγροτεμάχια. Η σπορά του αγροτεμαχίου ήταν πολύ αργότερα από όλα τα προηγούμενα αγροτεμάχια και δεν κατάφερε να αναπτυχθεί κατάλληλα, κάτι που απεικονίζεται και στην εξέλιξη του f_v (μέγιστο 0.3). Το συγκεκριμένο αγροτεμάχιο, παρουσίασε τα μεγαλύτερα επίπεδα υδατικού στρες και είχε έντονες διακυμάνσεις στον υπολογισμό του K_s για τους ίδιους λόγους που προαναφέρθηκαν.

Κεφάλαιο 5

Συζήτηση

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων και το σύνολο της εργασίας καθώς και οι πιθανές επεκτάσεις της μεθοδολογίας.

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν αρχικά από την χρήση των δορυφορικών δεδομένων Sentinel 2 και ECOSTRESS LST (5.1.1), τον υπολογισμό των ακραίων τιμών θερμοκρασίας (T_{vmax} , T_{smax} , T_{vmin} , T_{smin}) και το διαμερισμό του LST σε επιμέρους συνιστώσες θερμοκρασίας T_v και T_s . Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την ποσοτικοποίηση του υδατικού στρες μέσω του συντελεστή K_s .

5.1.1 Δορυφορικά Δεδομένα

Αρχικά, σχετικά με τα δεδομένα των δορυφόρων Sentinel, παρατηρήθηκε ότι τα δεδομένα ήταν αξιόπιστα και δεν παρουσίασαν κανένα πρόβλημα κατά την επεξεργασία τους, τον υπολογισμό του κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης $NDVI$ ή τον υπολογισμό του f_v . Οι διακυμάνσεις των γειτονικών εικονοστοιχείων, ήταν μικρές και δεν παρουσιάστηκαν σφάλματα στη γεωαναφορά των δεδομένων.

Στη συνέχεια, τα δεδομένα της αποστολής ECOSTRESS (LST), που δημιουργήθηκαν για την εκτίμηση του υδατικού στρες αποτελούν μια πολύ σημαντική πηγή δεδομένων. Τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της βλάστησης σε επίπεδο αγροτεμαχίου λόγω της πολύ υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσής τους. Με βάση τα αποτελέσματα της εργασίας, είναι αρκετά αξιόπιστα. Βέβαια, λόγω του ότι η αποστολή βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό επίπεδο υπήρχαν προβλήματα, που αφορούσαν τη γεωαναφορά τους, αλλά και τις τιμές εικονοστοιχείων, που σε πολλές περιπτώσεις είχαν αρκετά μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τα γειτονικά εικονοστοιχεία.

5.1.2 Διαμερισμός LST

Ο υπολογισμός των ακραίων τιμών θερμοκρασίας πραγματοποιήθηκε με χρήση της ευρέως διαδεδομένης τεχνικής $LST - f_v$ από τηλεπισκοπικά δεδομένα. Η μέθοδος έδειξε συνέπεια, αλλά επειδή οι ακραίες τιμές εξήχθησαν από γραμμικές παλινδρομήσεις των ακραίων τιμών

θερμοκρασίας στο χώρο $LST - f_v$ και όχι από κάποιο μοντέλο φυσικής ήταν λογικό να υπάρξει αβεβαιότητα στη μετέπειτα απόδοση των τιμών θερμοκρασίας στη βλάστηση και το έδαφος, ειδικά σε περιπτώσεις όπου το LST είναι στα άκρα του πολυγώνου θερμοκρασιών.

Το μοντέλο που πρότειναν οι Olivera-Guerra, Merlin, and Er-Raki 2020, με βάση τις αρχές του TSEB (J.M. Norman, Kustas, and Humes 1995), για την απόδοση τιμών θερμοκρασίας T_v και T_s , απέδωσε ικανοποιητικά στις περισσότερες περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, όταν στα αγροτεμάχια είχε πραγματοποιηθεί κάποιο πότισμα ή βροχόπτωση, τοποθετούσε τις θερμοκρασίες βλάστησης στις πλησιέστερες ημερομηνίες, κοντά στην ελάχιστη θερμοκρασία T_{vmin} , ενώ συνέβαινε το αντίθετο σε περιπτώσεις ξηρασίας.

5.1.3 Συντελεστής Υδατικού Στρες K_s

Ο υπολογισμός του συντελεστή K_s αποτέλεσε το τελικό αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας. Η συμπεριφορά του K_s διέφερε στα αγροτεμάχια. Η γενική εικόνα μετά την ανάλυση των αποτελεσμάτων, ήταν ότι τα αγροτεμάχια P0 και P1 βρέθηκαν σε λιγότερο υδατικό στρες σε σχέση με τα P3 και P4. Αυτό συμβαδίζει με τις πρακτικές του αγρότη, καθώς στα αγροτεμάχια P0 και P1 είχαν πραγματοποιηθεί 7 και 6 εφαρμογές άρδευσης αντίστοιχα.

Επίσης η συμπεριφορά των αγροτεμαχίων P0 και P1 ήταν πιο ομαλή στο χρόνο, ενώ το αγροτεμάχιο P2 παρουσίασε διακυμάνσεις στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου. Οι διακυμάνσεις αυτές δεν ξεπερνούσαν το 0.2 και οφείλονταν είτε σε λάθος της μοντελοποίησης του LST , είτε του μοντέλου διαμερισμού των θερμοκρασιών. Το αγροτεμάχιο P4, είχε τελείως διαφορετική εικόνα σε σχέση με τα προηγούμενα αγροτεμάχια. Η σπορά του αγροτεμαχίου πραγματοποιήθηκε πολύ αργότερα από όλα τα προηγούμενα αγροτεμάχια και δεν κατάφερε να αναπτυχθεί κατάλληλα, κάτι που απεικονίζεται και στην εξέλιξη του f_v (μέγιστο 0.3). Το συγκεκριμένο αγροτεμάχιο παρουσίασε τα μεγαλύτερα επίπεδα υδατικού στρες και είχε έντονες διακυμάνσεις στον υπολογισμό του K_s για τους ίδιους λόγους.

5.2 Μελλοντική έρευνα

Οι προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη της παρούσας μεθοδολογίας περιλαμβάνουν:

1. Εφαρμογή της μεθοδολογίας με περισσότερα δεδομένα και επιπλέον πηγές τηλεπισκοπικών δεδομένων όπως της αποστολής TRISHNA, για τον υπολογισμό του συντελεστή υδατικού στρες K_s .
2. Εξαγωγή των ακραίων τιμών θερμοκρασίας T_{vmax} , T_{smax} , T_{vmin} , T_{smin} από το SEB-4S (Merlin et al. 2014), και απόδοση τιμών θερμοκρασίας σε επιμέρους 4 συνιστώσες.
3. Επέκταση της μεθοδολογίας στην ανίχνευση εφαρμογών άρδευσης και στην εκτίμηση του ύψους νερού των εφαρμογών. Πιο συγκεκριμένα, μέσω του υπολογισμού K_s είναι εφικτό με μεγαλύτερη ακρίβεια να υπολογιστεί η εξατμισοδιαπνοή των αγροτεμαχίων και μέσω μοντέλων υδατικού ισοζυγίου όπως προτάθηκαν από τους Allen, Pereira, et al. 1998 και εφαρμόστηκαν από τους Olivera-Guerra, Merlin, Er-Raki, et al. 2018 και Olivera-Guerra, Merlin, and Er-Raki 2020.

Βιβλιογραφία

- Rouse, J.W et al. (1974). "Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS". In: *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium 1*, pp. 48–62.
- Norman, J.M., W.P. Kustas, and K.S. Humes (1995). "Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature". In: *Agricultural and Forest Meteorology* 77.3. Thermal Remote Sensing of the Energy and Water Balance over Vegetation, pp. 263–293. ISSN: 0168-1923. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02265-Y](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02265-Y). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016819239502265Y>.
- Anderson, Martha et al. (May 1997). "A Two-Source Time-Integrated Model for Estimating Surface Fluxes Using Thermal Infrared Remote Sensing". In: *Remote Sensing of Environment* 60, pp. 195–216. DOI: [10.1016/S0034-4257\(96\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00215-5).
- Allen, Richard, L. Pereira, et al. (Jan. 1998). "FAO Irrigation and drainage paper No. 56". In: *Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations* 56, pp. 26–40.
- Bastiaanssen, W.G.M. et al. (1998). "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation". In: *Journal of Hydrology* 212-213, pp. 198–212. ISSN: 0022-1694. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169498002534>.
- Gillespie, A. et al. (1998). "A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images". In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36.4, pp. 1113–1126. DOI: [10.1109/36.700995](https://doi.org/10.1109/36.700995).
- Gutman, G. and A. Ignatov (1998). "The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models". In: *International Journal of Remote Sensing* 19.8, pp. 1533–1543. DOI: [10.1080/014311698215333](https://doi.org/10.1080/014311698215333). eprint: <https://doi.org/10.1080/014311698215333>. URL: <https://doi.org/10.1080/014311698215333>.
- Norman, John et al. (Aug. 2000). "Surface flux estimation using radiometric temperature: A dual-temperature-difference method to minimize measurement errors". In: *Water Resources Research - WATER RESOUR RES* 36, pp. 2263–2274. DOI: [10.1029/2000WR900033](https://doi.org/10.1029/2000WR900033).
- Roerink, G.J, Z Su, and M Menenti (2000). "S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance". In: *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* 25.2, pp. 147–157. ISSN: 1464-1909. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(99\)00128-8](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(99)00128-8). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464190999001288>.
- Sandholt, Inge, Kjeld Rasmussen, and Jens Andersen (2002). "A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status". In: *Remote Sensing of Environment* 79.2. Recent Advances in Remote Sensing of Biophysical Variables, pp. 213–224. ISSN: 0034-4257. DOI: [53](https://doi.org/10.1016/S0034-</p></div><div data-bbox=)

- 4257(01)00274-7. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425701002747>.
- Su, Z. (2002). "The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes". In: *Hydrology and Earth System Sciences* 6.1, pp. 85–100. DOI: [10.5194/hess-6-85-2002](https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002). URL: <https://hess.copernicus.org/articles/6/85/2002/>.
- Jiang, L. and S. Islam (2003). "An intercomparison of regional latent heat flux estimation using remote sensing data". In: *International Journal of Remote Sensing* 24.11, pp. 2221–2236. DOI: [10.1080/01431160210154821](https://doi.org/10.1080/01431160210154821). eprint: <https://doi.org/10.1080/01431160210154821>. URL: <https://doi.org/10.1080/01431160210154821>.
- Duchemin, B. et al. (2006). "Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices". In: *Agricultural Water Management* 79.1, pp. 1–27. ISSN: 0378-3774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.02.013>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377405001046>.
- Allen, Richard, Masahiro Tasumi, and Ricardo Trezza (Aug. 2007). "Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration With Internalized Calibration (METRIC) – Model". In: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)).
- Glenn, Edward P. et al. (2007). "Integrating Remote Sensing and Ground Methods to Estimate Evapotranspiration". In: *Critical Reviews in Plant Sciences* 26.3, pp. 139–168. DOI: [10.1080/07352680701402503](https://doi.org/10.1080/07352680701402503). eprint: <https://doi.org/10.1080/07352680701402503>. URL: <https://doi.org/10.1080/07352680701402503>.
- Gowda, P. H. et al. (2008). "ET mapping for agricultural water management: Present status and challenges". In: *Irrigation Science* 26.3, pp. 223–237.
- Φυτιλής, Β. (2008). *Επίδραση δόσης άρδευσης σε καλλιέργεια βαμβακιού*.
- Foley, Jonathan A et al. (2011). "Solutions for a cultivated planet". In: *Nature* 478.7369, pp. 337–342. ISSN: 0028-0836. DOI: [10.1038/nature10452](https://doi.org/10.1038/nature10452). URL: <https://doi.org/10.1038/nature10452>.
- Long, Di and Vijay P. Singh (2012). "A Two-source Trapezoid Model for Evapotranspiration (TTME) from satellite imagery". In: *Remote Sensing of Environment* 121, pp. 370–388. ISSN: 0034-4257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.015>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712001083>.
- Senay, Gabriel B. et al. (2013). "Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach". In: *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 49.3, pp. 577–591. DOI: <https://doi.org/10.1111/jawr.12057>.
- Merlin, Olivier et al. (2014). "An image-based four-source surface energy balance model to estimate crop evapotranspiration from solar reflectance/thermal emission data (SEB-4S)". In: *Agricultural and Forest Meteorology* 184, pp. 188–203. ISSN: 0168-1923. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.10.002>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192313002700>.
- Biggs, Trent et al. (Nov. 2015). *Remote Sensing of Evapotranspiration from Croplands*.
- DeJonge, Kendall C. et al. (2015). "Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize". In: *Agricultural Water Management* 156, pp. 51–62. ISSN: 0378-3774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.023>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377415001067>.

- Stefan, Vivien Georgiana et al. (2015). “Consistency between In Situ, Model-Derived and High-Resolution-Image-Based Soil Temperature Endmembers: Towards a Robust Data-Based Model for Multi-Resolution Monitoring of Crop Evapotranspiration”. In: *Remote Sensing* 7.8, pp. 10444–10479. ISSN: 2072-4292. DOI: [10.3390/rs70810444](https://doi.org/10.3390/rs70810444). URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/7/8/10444>.
- Yang, Yongmin et al. (2015). “An enhanced two-source evapotranspiration model for land (ETEML): Algorithm and evaluation”. In: *Remote Sensing of Environment* 168, pp. 54–65. ISSN: 0034-4257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.06.020>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003442571530050X>.
- Ihuoma, Samuel O. and Chandra A. Madramootoo (2017). “Recent advances in crop water stress detection”. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 141, pp. 267–275. ISSN: 0168-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.026>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169916310766>.
- Kullberg, Emily G., Kendall C. DeJonge, and José L. Chávez (2017). “Evaluation of thermal remote sensing indices to estimate crop evapotranspiration coefficients”. In: *Agricultural Water Management* 179. Special Issue on Improving Agricultural Water Productivity to Ensure Food Security under Changing Environments Overseen by: Brent Clothier, pp. 64–73. ISSN: 0378-3774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.007>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377416302530>.
- Wagle, Pradeep, Nishan Bhattarai, et al. (2017). “Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum”. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 128, pp. 192–203. ISSN: 0924-2716. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.022>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271616304774>.
- Wagle, Pradeep, Xiangming Xiao, et al. (2017). “Analysis and estimation of tallgrass prairie evapotranspiration in the central United States”. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 232, pp. 35–47. ISSN: 0168-1923. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.005>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192316303604>.
- Olivera-Guerra, Luis, Olivier Merlin, Salah Er-Raki, et al. (2018). “Estimating the water budget components of irrigated crops: Combining the FAO-56 dual crop coefficient with surface temperature and vegetation index data”. In: *Agricultural Water Management* 208, pp. 120–131. ISSN: 0378-3774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.014>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377418308023>.
- Jovanovic, N. et al. (2020). “A review of strategies, methods and technologies to reduce non-beneficial consumptive water use on farms considering the FAO56 methods”. In: *Agricultural Water Management* 239, p. 106267. ISSN: 0378-3774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106267>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377419321262>.
- Kandylakis, Zacharias et al. (2020). “Water Stress Estimation in Vineyards from Aerial SWIR and Multispectral UAV Data”. In: *Remote Sensing* 12.15. ISSN: 2072-4292. DOI: [10.3390/rs12152499](https://doi.org/10.3390/rs12152499). URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/15/2499>.
- Olivera-Guerra, Luis, Olivier Merlin, and Salah Er-Raki (2020). “Irrigation retrieval from Landsat optical/thermal data integrated into a crop water balance model: A case study over winter wheat fields in a semi-arid region”. In: *Remote Sensing of Environment* 239, p. 111627. ISSN: 0034-4257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111627>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425719306479>.

Mecikalski, John R. et al. (1Sep. 1999). “Estimating Fluxes on Continental Scales Using Remotely Sensed Data in an Atmospheric–Land Exchange Model”. In: *Journal of Applied Meteorology* 38.9, pp. 1352–1369. doi: [10.1175/1520-0450\(1999\)038<1352:EFOCSU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1352:EFOCSU>2.0.CO;2).