



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

«ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΦΥΤΕΙΑΣ ΑΒΟΚΑΝΤΟ»

Διπλωματική Εργασία

της
Ότσα Αλεξάνδρα



ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ, 2023

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτη.



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

«ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΦΥΤΕΙΑΣ ΑΒΟΚΑΝΤΟ»

«IRRIGATION DATA ANALYSIS OF AN AVOCADO PLANTATION»

Διπλωματική Εργασία

της
Ότσκα Αλεξάνδρα

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Νικολαΐδης Νικόλαος (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Λιλλή Μαρία

Παρανυχιανάκης Νικόλαος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η άποψη που επικρατεί για την παραγωγή αβοκάντο, είναι ότι χρειάζεται μεγάλες ποσότητες νερού άρδευσης προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες της, θέτοντας θεωρητικούς και πρακτικούς περιορισμούς στις περιοχές που θα μπορούσαν, υπό άλλες συνθήκες, να υποστηρίξουν την ανάπτυξη μιας τέτοιας φυτείας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται εκτίμηση της απαιτούμενης ποσότητας νερού άρδευσης ενός αγρού αβοκάντο στα Χανιά, μια περιοχή με ημίξηρο προς ξηρό κλίμα. Στόχος της μελέτης είναι να εκτιμηθούν οι πραγματικές ανάγκες του φυτού σε άρδευση και να συγκριθούν με τις θεωρητικές ποσότητες που προτείνονται από διάφορους οργανισμούς.

Στον αγρό έχει εφαρμοστεί το σύστημα της «στάγδην άρδευσης», σε μια κυκλική διάταξη γύρω από τον κορμό κάθε δέντρου. Με την πρακτική αυτή θέλουμε να αποδείξουμε ότι μπορεί να καταναλωθεί σημαντικά μικρότερος όγκος νερού, συγκριτικά με την άρδευση όλης της έκτασης του αγρού. Για τη μελέτη αυτή, έγινε χρήση δυο μεθόδων και μετέπειτα, οι μέθοδοι αυτές συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε, αρχικά, το εδαφικό υδατικό ισοζύγιο κι έπειτα, το μοντέλο HYDRUS-1D.

Τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν από τις δυο μεθόδους, αποδεικνύουν ότι οι θεωρητικές ποσότητες ξεπερνούν τις ανάγκες νερού της καλλιέργειας. Ειδικότερα, ενώ η Περιφέρεια και το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης προτείνουν άρδευση με $17-28 \text{ m}^3 / \text{δέντρο/σεζόν νερού}$, τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής δείχνουν ότι το ποσό που απαιτείται είναι στην πραγματικότητα 5 m^3 .

Εν κατακλείδι, με την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, αποδεικνύεται ότι η λύση είναι η χρήση ενός ορθολογικού συστήματος άρδευσης, το οποίο -αν εφαρμοστεί ακόμα και σε μια ημίξηρη περιοχή- η καλλιέργεια αβοκάντο μπορεί να υποστηριχθεί χωρίς την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων νερού.

ABSTRACT

The common notion surrounding the production of avocados, is that they require a significant amount of irrigation water in order to have their needs met, which puts theoretical and practical constraints in the areas that could, otherwise, support the development of such crops. In the present dissertation thesis, the required quantity of irrigation water is being evaluated, in an avocado plantation in Chania, which is a region with semiarid to arid climate. The goal of this study is to assess the real needs of the plant for irrigation water and to compare them with the theoretical quantities suggested by various organizations.

The deficit irrigation method was used and water was supplied around the tree using drip irrigation system. Using this method, we wanted to show that it is possible to use noticeably less water, compared to watering the entirety of the field. The study was conducted with the use of two different methods, which were, later, compared. To be more exact, the soil water balance equation was applied, followed by the utilization of the model, HYDRUS-1D.

The outcomes resulting from the two methods illustrate that the advised theoretical volume is surpassing the crop's water needs. Particularly, while the municipality and the ministry of agriculture suggest the use of 17 to 28 m³ of water/tree/season, the results of this study, showed that the required amount is in reality 5 m³.

To conclude, irrigating the plant around the tree and monitoring the soil water moisture, the amount of irrigation of avocado can be reduced significantly because the water losses are minimized.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες της παρούσας διπλωματικής, καθηγητή κ. Νικόλαο Νικολαΐδη και μεταδιδακτορική κ. Λιλλή Μαρία, για την υπομονή και την καθοδήγηση τους και για τις χρήσιμες συμβουλές για τη συγγραφή της εργασίας.

Ευχαριστώ, επίσης, τον κ. Παρανυχιανάκη Νικόλαο, μέλος της τριμελούς επιτροπής, για το χρόνο του και τη συμμετοχή του στην παρουσίαση του θέματος.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα το υπόλοιπο εργαζόμενο προσωπικό, για την βοήθεια τους στη συλλογή των δεδομένων.

Ένα ακόμη ευχαριστώ στους φίλους μου και στην οικογένειά μου, για την ηθική και υλική στήριξη που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	12
2.1. ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ	12
2.1.1. ΟΓΚΟΣ ΔΙΗΘΗΣΗΣ - PERCOLATION VOLUME ($Q_{perc.}$)	13
2.1.2. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΓΚΟΥ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ - SOIL MOISTURE VOLUME CHANGE (ΔS)	14
2.1.3. ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ - ΕΝΑΡΟΤΡΑΝΣΠΙΡΑΤΙΟΝ (ET).....	14
2.1.3.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ PENMAN-MONTEITH	16
2.1.4. ΟΓΚΟΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ - IRRIGATION VOLUME ($Q_{irr.}$).....	19
2.2. ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ.....	19
2.2.1. ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ - NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (NDVI)	20
2.2.2. ΔΕΙΚΤΗΣ ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ - PHOTOCHEMICAL REFLECTANCE INDEX (PRI)	21
2.3. ΑΚΑΘΑΡΙΣΤΗ ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ - GROSS PRIMARY PRODUCTIVITY (GPP).....	22
2.3.1. ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΦΩΤΟΣ - LIGHT USE EFFICIENCY (LUE)	22
2.3.2. ΚΛΑΣΜΑ ΑΠΟΡΡΟΦΩΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ - FRACTION OF ABSORBED PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION (fAPAR)	23
2.3.3. ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΕΝΕΡΓΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ - PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION (PAR).....	24
2.4. ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ - WATER USE EFFICIENCY (WUE).....	25
2.5. ΜΟΝΤΕΛΟ HUDRUS-1D	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	26
3.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	26
3.2. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ET.....	27
3.3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔS	28
3.4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ $Q_{irr.}$	29
3.5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ $Q_{perc.}$	29
3.6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ GPP.....	29
3.6.1. ΕΚΤΙΜΗΣΗ LUE.....	29
3.6.2. ΕΚΤΙΜΗΣΗ fAPAR.....	31
3.6.3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ PAR	31
3.7. ΕΚΤΙΜΗΣΗ WUE.....	31
3.8. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΓΚΟΥ ΔΙΗΘΗΣΗΣ ΜΕ ΤΟ HUDRUS-1D.....	32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	32
4.1. ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ.....	32
4.1.1. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ NDVI	32
4.1.2. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ PRI.....	35
4.2. ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ GPP	36
4.2.1. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ fAPAR.....	36
4.2.2. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ LUE.....	38
4.3. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ GPP.....	39
4.4. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ET	41
4.5. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ WUE.....	43
4.6. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΔS	45
4.7. ΟΓΚΟΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ	47
4.8. ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ	49
4.9. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	52
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	53
ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΑ.....	58

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1. Απεικόνιση μεταβλητών υδατικού ισοζυγίου [FAO]	13
Εικόνα 2.2. Απεικόνιση μεταβλητών υδατικού ισοζυγίου [Howell, 2003]	13
Εικόνα 2.3. Σχέση PRI/LUE [Trotter et al., 2001]	23
Εικόνα 3.1. Πειραματική τοποθεσία [Google Earth]	27
Εικόνα 3.2. Γραφική και πραγματική αναπαράσταση των αισθητήρων φασματικής ανάκλασης [SRS manual]	30
Εικόνα 3.3. Bottom flux (υπογραμμισμένο) τη στιγμή 0,001, στους υπολογισμούς του 2020 [HYDRUS-1D]	32

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1. Τιμές για τα C_n και C_d [Pereira et al., 2015]	16
Πίνακας 2.2. Σχέσεις μεταξύ fAPAR και NDVI [Fensholt et al., 2004]	24

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 4.1. Δείκτης NDVI σε σχέση με το χρόνο (05/11/2019-31/12/2019)	33
Γράφημα 4.2. Δείκτης NDVI σε σχέση με το χρόνο (18/06/2020-05/11/2020)	34
Γράφημα 4.3. Δείκτης NDVI σε σχέση με το χρόνο (01/05/2021-31/12/2021)	34
Γράφημα 4.4. Δείκτης PRI σε σχέση με το χρόνο (05/11/2019-31/12/2019)	35
Γράφημα 4.5. Δείκτης PRI σε σχέση με το χρόνο (15/05/2020-29/10/2020)	35
Γράφημα 4.6. Δείκτης PRI σε σχέση με το χρόνο (14/05/2021-31/12/2021)	36
Γράφημα 4.7. fAPAR και NDVI σε σχέση με το χρόνο (05/11/2019-31/12/2019)	37
Γράφημα 4.8. fAPAR και NDVI σε σχέση με το χρόνο (29/06/2020-31/10/2020)	37
Γράφημα 4.9. fAPAR και NDVI σε σχέση με το χρόνο (14/05/2021-31/12/2021)	38
Γράφημα 4.10. LUE και PRI σε σχέση με το χρόνο (05/11/2019-31/12/2019)	38
Γράφημα 4.11. LUE και PRI σε σχέση με το χρόνο (16/05/2020-31/10/2020)	39
Γράφημα 4.12. LUE και PRI σε σχέση με το χρόνο (14/05/2021-31/12/2021)	39
Γράφημα 4.13. GPP σε σχέση με το χρόνο (05/11/2019-31/12/2019)	40
Γράφημα 4.14. GPP σε σχέση με το χρόνο (29/06/2020-31/10/2020)	41
Γράφημα 4.15. GPP σε σχέση με το χρόνο (14/05/2021-31/12/2021)	41
Γράφημα 4.16. ET σε σχέση με το χρόνο (06/07/2019-31/12/2019)	42
Γράφημα 4.17. ET σε σχέση με το χρόνο (14/05/2020-31/10/2020)	42
Γράφημα 4.18. ET σε σχέση με το χρόνο (01/01/2021-31/12/2021)	43
Γράφημα 4.19. ET σε σχέση με το χρόνο (01/01/2022-26/10/2022)	43
Γράφημα 4.20. WUE σε σχέση με το χρόνο (05/11/2019-31/12/2019)	44
Γράφημα 4.21. WUE σε σχέση με το χρόνο (29/06/2020-31/10/2020)	44
Γράφημα 4.22. WUE σε σχέση με το χρόνο (14/05/2021-31/12/2021)	45

Γράφημα 4.23. Ογκομετρική υγρασία του εδάφους ως προς τις ώρες της ημέρας, μεταποιημένες σε ιουλιανή ημέρα για τις ημερομηνίες 16/07/2019 (11 π.μ.) - 31/12/2019 (11 μ.μ.).....	46
Γράφημα 4.24. Ογκομετρική υγρασία του εδάφους ως προς τις ώρες της ημέρας, μεταποιημένες σε ιουλιανή ημέρα για τις ημερομηνίες 06/06/2020 (6 π.μ.) - 06/11/2020 (11 π.μ.)	46
Γράφημα 4.25. Ογκομετρική υγρασία του εδάφους ως προς τις ώρες της ημέρας, μεταποιημένες σε ιουλιανή ημέρα για τις ημερομηνίες 25/06/2021 (9 π.μ.) - 16/11/2021 (11 π.μ.)	47
Γράφημα 4.26. Όγκος νερού που χρησιμοποιήθηκε το 2020 για το πότισμα κάθε δέντρου της καλλιέργειας.....	47
Γράφημα 4.27. Όγκος νερού που χρησιμοποιήθηκε το 2021 για το πότισμα κάθε δέντρου της καλλιέργειας.....	48
Γράφημα 4.28. Όγκος νερού που χρησιμοποιήθηκε το 2022 για το πότισμα κάθε δέντρου της μικρής καλλιέργειας	48
Γράφημα 4.29. Ποσότητες των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου για το έτος 2020	49
Γράφημα 4.30. Ποσότητες των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου για το έτος 2021	50

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΔS - Soil moisture change - Μεταβολή εδαφικής υγρασίας

Q_{irr.} - Irrigation volume - Όγκος άρδευσης

ET - Evapotranspiration - Εξατμισοδιαπνοή

Q_{perc.} - Percolation volume - Όγκος διήθησης

GPP - Gross Primary Production - Ακαθάριστη πρωτογενής παραγωγικότητα

WUE - Water Use Efficiency - Αποδοτικότητα χρήσης νερού

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index - Δείκτης κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης

PRI - Photochemical Reflectance Index - Δείκτης φωτοχημικής ανάκλασης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό είναι αναπόσπαστο κομμάτι της ανάπτυξης μιας χώρας και αποτελεί έναν από τους καθοριστικούς περιοριστικούς της παράγοντες. Ιδιαίτερα όταν γίνεται αναφορά σε μια μεσογειακή χώρα όπως η Ελλάδα, της οποίας το κλίμα, εντείνει τις πιέσεις τις οποίες δέχεται ο πόρος. Η Ελλάδα έχει ημίξηρο προς ξηρό κλίμα και το πρόβλημα φαίνεται να γίνεται εντονότερο κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, όπου και ερχόμαστε αντιμέτωποι με περιορισμούς στην παροχή νερού. Μάλιστα, η περιοχή της Κρήτης βρίσκεται ανάμεσα στις περιοχές που διατρέχουν τους μεγαλύτερους κινδύνους για υδατική ανεπάρκεια [Chartzoulakis et al., 2001, Tsanis et al., 2011, Milano et al., 2013, Kourgialas, 2021]. Οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν, είναι ένα κομμάτι, το οποίο επηρεάζει έντονα την τρέχουσα και τη μελλοντική δυνατότητα εύρεσης επαρκών υδατικών πόρων, για την κάλυψη των αναγκών μας.

Το πρόβλημα προβλέπεται να μεγιστοποιηθεί με τις επιπτώσεις που φέρνει η κλιματική αλλαγή. Ειδικά στη μεσογειακή περιοχή, προγνωστικά μοντέλα, έχουν προβλέψει αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2-3 °C μέχρι το 2050 [IPCC, 2007 & 2014, Milano et al., 2013]. Αυτό συνεπάγεται μείωση της βροχόπτωσης και ταυτόχρονη αύξηση των ρυθμών της εξατμισοδιαπνοής. Ο συνδυασμός μεταφράζεται σε λιγότερη πρόσληψη νερού βροχής και γοργή απώλεια νερού από τις επιφάνειες.

Απόρροια της ελάττωσης των ρυθμών βροχόπτωσης και της παράλληλης αύξησης της εξατμισοδιαπνοής, είναι η αναζήτηση για εύρεση και άλλων πηγών άντλησης νερού. Συνεπώς, υπάρχει μια στροφή προς την εκμετάλλευση του υπόγειου νερού. Αυτή η πρακτική, όμως, όχι μόνο μειώνει τα αποθέματα του υδροφορέα, αλλά η ανεξέλεγκτη άντληση μπορεί να οδηγήσει στην εισαγωγή υφάλμυρου νερού. Την ίδια στιγμή, η ποσότητα του διαθέσιμου νερού του υπόγειου υδροφορέα εξαρτάται από τις μειώσεις του ρυθμού της βροχόπτωσης ή τις αυξήσεις στην εξατμισοδιαπνοή [Imeson, 2004]. Η άντληση νερού από τον υπόγειο υδροφορέα, λοιπόν, δεν φαίνεται να μπορεί να δώσει μια μακροπρόθεσμη λύση στην έλλειψη υδατικών πόρων. Όμως, η κλιματική αλλαγή είναι ένα φαινόμενο που θα συνεχίσει να πλήττει τον πλανήτη μας. Συμπερασματικά, μια καλή πρακτική θα ήταν, από τη μια, να προσδιοριστούν οι πηγές των απωλειών νερού και από την άλλη, να εφαρμοστούν τα απαραίτητα όρια στη χρήση νερού.

Ο γεωργικός τομέας στην Ελλάδα, αλλά και στην πλειοψηφία των χωρών, αποτελεί τον μεγαλύτερο καταναλωτή του διαθέσιμου νερού. Συγκεκριμένα, το 74-85% των διαθέσιμων πόρων προορίζεται για άρδευση [Papazafiriou et al., 2000, Kourgialas, 2021]. Αυτό συμβαίνει διότι πληθαίνουν οι αρδευόμενες εκτάσεις λόγω της αυξανόμενης ζήτησης τροφίμων και άλλων καλλιεργήσιμων αγαθών. Η εντατικοποίηση της γεωργίας επέρχεται λόγω της αύξησης του πληθυσμού, ειδικότερα των αστικών περιοχών αφενός και αφετέρου λόγω της εντατικοποίησης του τουρισμού. Η πίεση που ασκείται από τον τουρισμό γίνεται εμφανής, σε μεγάλη κλίμακα, στα νησιά, όπου οι υδάτινοι πόροι εκλείπουν και ταυτόχρονα, τους καλοκαιρινούς μήνες ιδίως, όπου ο εσωτερικός ή ο διεθνής τουρισμός βρίσκεται στην αποκορύφωσή του, η χώρα δέχεται υπέρμετρες πιέσεις και δυσκολεύεται να καλύψει τις υπάρχουσες ανάγκες της. Έτσι, καταλήγουμε στο ότι θα ήταν σωστό να επικεντρωθούμε στον τομέα της γεωργίας. Ειδικότερα, θα πρέπει να διερευνώνται πρακτικές, οι οποίες θα μπορούν να διατηρούν την απόδοση, την οποία επιθυμούμε από τις καλλιέργειες, χωρίς να σπαταλώνται υπέρογκες ποσότητες νερού. Η

απόδοση αυτή, αναφέρεται στη διατήρηση της παραγωγής της ίδιας ποσότητας σοδειάς, που θα είχαμε στις συνήθεις πρακτικές, ή της αύξησής της, μειώνοντας, όμως, στην δεύτερη περίπτωση, τα κυβικά νερού που καταναλώνονται [Kourgialas, 2021].

Η περίπτωση της άρδευσης χωρίζεται σε διάφορα πεδία μελέτης (παροχή, διανομή και διαχείριση των υδατικών πόρων). Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στο πεδίο της διαχείρισης. Αντικείμενο της έρευνάς μας είναι μια φυτεία αβοκάντο, φυτό το οποίο έχει υψηλές απαιτήσεις σε νερό [Beyá-Marshall et al., 2022] και αποτελεί μια φυτεία που εξαπλώνεται όλο και περισσότερο στην περιοχή της Κρήτης, καθώς οι επικρατούσες συνθήκες ευνοούν την ανάπτυξή του.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται παρακολούθηση ενός αγρού αβοκάντο με σκοπό την εύρεση βέλτιστων τρόπων διαχείρισης του νερού μέσω της άρδευσης, της αποδοτικότητας χρήσης νερού των δέντρων και τρόπων βελτίωσης της παραγωγικότητας των φυτών. Στο πλαίσιο αυτής, μελετάται η εφαρμογή ενός εναλλακτικού τρόπου ποτίσματος («στάγδην» άρδευση). Επιπλέον, τα αποτελέσματα αυτής συγκρίνονται με την υπάρχουσα νομοθεσία πάνω στο κομμάτι της άρδευσης στον ελλαδικό χώρο. Στην εργασία, μελετάμε τις απώλειες νερού που έχουμε μετά την άρδευση μιας φυτείας αβοκάντο και εξετάζουμε τον τρόπο με τον οποίο το φυτό χρησιμοποιεί το νερό, ώστε να μπορέσουμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την ποσότητα που απαιτεί η καλλιέργεια. Η μελέτη ολοκληρώνεται με τη χρήση υδατικού ισοζυγίου και, ταυτόχρονα, του μοντέλου HYDRUS-1D, τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίνονται. Η άρδευση επιτυγχάνεται παρέχοντας νερό μέσω μιας κυκλικής διάταξης, γύρω από τον κορμό κάθε δέντρου. Η πρακτική αυτή, προσφέρει έρευνα πάνω στο κομμάτι της αποδοτικής χρήσης των υδατινών πόρων, στο τομέα της γεωργίας, σε μια χώρα όπου οι ανάγκες για νερό είναι ολοένα αυξανόμενες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά το υδατικό ισοζύγιο και οι μεταβλητές του. Ακόμη, επεξηγούνται οι όροι της ακαθάριστης πρωτογενούς παραγωγής, της απόδοσης χρήσης νερού και των δεικτών βλάστησης. Τέλος, παρατίθεται ο τρόπος χρήσης του μοντέλου HYDRUS 1-D.

2.1. ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

Τα υδατικά ισοζύγια εφαρμόζονται συχνά σε μελέτες στις οποίες εξετάζονται τρόποι για τη βελτίωση της αποδοτικότητας της άρδευσης [Kang et al., 2003, Valipour, 2012, Laode, 2021]. Στην εν λόγω μελέτη, και προκειμένου να εκτιμηθεί το αν ο τρόπος άρδευσης που εφαρμόστηκε είναι αποδοτικός, χρησιμοποιήθηκε το εδαφικό υδατικό ισοζύγιο. Το εδαφικό υδατικό ισοζύγιο χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του όγκου του νερού που καταλήγει σε βάθη κατώτερα της ζώνης των ριζών του φυτού ως εξής:

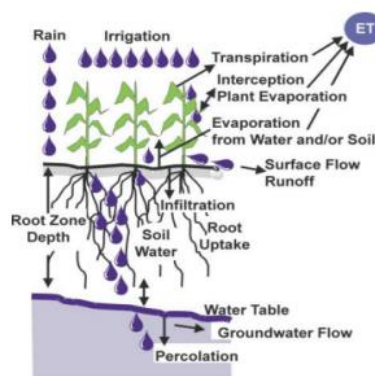
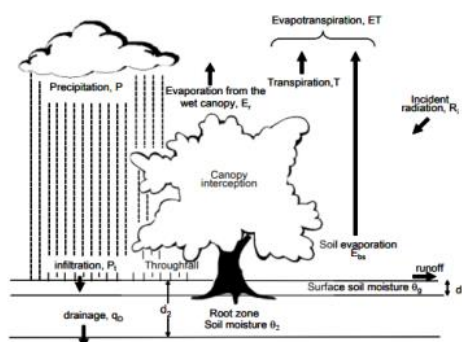
$$\Delta S/\Delta t = Q_{irr.} - ET - Q_{perc.}$$

- Ο άγνωστος όρος είναι το $Q_{perc.}$, δηλαδή το νερό που διηθείται πιο βαθιά από τη ζώνη των ριζών και ονομάζεται παροχή διήθησης.
- Ο όρος $\Delta S/\Delta t$ αντιπροσωπεύει την αλλαγή της εδαφικής υγρασίας γύρω από τον κορμό του δέντρου με το χρόνο και μετράται με υγρασιόμετρα εδάφους.

- Ο όρος $Q_{irr.}$ αντιπροσωπεύει την ποσότητα του νερού άρδευσης της καλλιέργειας και θα αναφέρεται ως παροχή άρδευσης.
- Τέλος, η μεταβλητή ET, αντιπροσωπεύει το συνδυασμό των διεργασιών της εξάτμισης και της διαπνοής και αναφέρεται ως εξατμισοδιαπνοή.

Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 2.1., Εικόνα 2.2.), απεικονίζονται οι προαναφερθέντες όροι, οι οποίοι αναλύονται λεπτομερώς στις υπο-ενότητες που ακολουθούν.

Εικόνα 2.1. Απεικόνιση μεταβλητών υδατικού ισοζυγίου [FAO]



Εικόνα 2.2. Απεικόνιση μεταβλητών υδατικού ισοζυγίου [Howell, 2003]

2.1.1. ΠΑΡΟΧΗ ΔΙΗΘΗΣΗΣ - PERCOLATION RATE ($Q_{perc.}$)

Η ποσότητα του νερού άρδευσης, η οποία διαπερνά τη ζώνη των ριζών και διηθείται σε μεγαλύτερα βάθη ονομάζεται όγκος διήθησης ($Q_{perc.}$). Σε αυτή τη μελέτη, υποθέτουμε ότι το μέγιστο βάθος από το οποίο οι ρίζες μπορούν να λαμβάνουν νερό, διαχωρίζεται σε πέντε στρώματα των 10cm. Αν κορεστούν όλα τα στρώματα της ριζικής ζώνης, τότε το επιπλέον νερό θα χαθεί και δεν θα απορροφηθεί από τον φυτικό ιστό.

Η διήθηση, αλλά και άλλες διεργασίες (διαρροή, εξάτμιση, απορροή), θεωρούνται μη-παραγωγικές απώλειες στην αγροτική χρήση νερού. Επηρεάζεται λοιπόν δυσμενώς η απόδοση του αγρού, ενώ σπαταλάται το διαθέσιμο νερό για άρδευση [Hatiye et al., 2018]. Συμπερασματικά, ακόμη και αν δεν μπορεί να γίνει λόγος για ακριβή προσδιορισμό του υπό συνθήκες πεδίου, είναι σημαντικό να προσεγγίζεται, ώστε να προγραμματίζεται καλύτερα η άρδευση του αγρού. Στην παρούσα εργασία, θέλουμε να υπολογίσουμε την ποσότητα που χάνεται χρησιμοποιώντας το εδαφικό υδατικό ισοζύγιο και το μοντέλο HYDRUS-1D.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, στόχος της μελέτης είναι η ελαχιστοποίηση της ποσότητας του νερού που χάνεται, με την χρήση διαφορετικού τρόπου άρδευσης και την παροχή μικρότερων ποσοτήτων νερού από τις συνιστώμενες. Το πείραμα παρουσιάζει ενδιαφέρον, καθώς εφαρμόζεται σε μια καλλιέργεια η οποία θεωρητικά απαιτεί μεγάλες ποσότητες νερού για την άρδευση της. Με αυτό το τρόπο, ερευνάται το κομμάτι της βαθιάς διήθησης, ένα θέμα το οποίο αναλύεται σπάνια σε μελέτες, και είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις υδροβόρες καλλιέργειες [Hatiye et al., 2018].

2.1.2. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΓΚΟΥ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ - SOIL MOISTURE VOLUME CHANGE (ΔS)

Ο όρος της εδαφικής υγρασίας είναι η μεταβλητή του υδατικού ισοζυγίου, η οποία αντιπροσωπεύει την ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται από το έδαφος και εξαρτάται από το είδος του εδάφους. Η ποσότητα αυτή, επηρεάζει άμεσα τις λειτουργίες του φυτού, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, όπου οι ρυθμοί της εξάτμισης αυξάνονται και επομένως, η εδαφική υγρασία μειώνεται ταχύτερα. Οι μειώσεις των ποσοστών υγρασίας στο έδαφος, συνήθως προκαλούν υδατικό στρες στα φυτά, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μεγάλος περιορισμός στις φυσιολογικές λειτουργίες τους, και μπορεί να οδηγήσει σε δυσμενείς επιπτώσεις στην αγροτική παραγωγή. Έτσι, οι φυτικοί οργανισμοί αντιδρούν στην πίεση αυτή, με μια σειρά από φυσιολογικές αντιδράσεις, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης της ενζυμικής δραστηριότητας και της στοματικής αγωγιμότητας, με σκοπό την όσο το δυνατό μικρότερη απώλεια νερού [Berg & Sheffield, 2018].

Αίτια στην πιθανή έλλειψη εδαφικής υγρασίας αποτελούν οι χαμηλές βροχοπτώσεις, οι απώλειες νερού από επιφάνειες, στη μορφή εξάτμισης και διαπνοής (εξατμισοδιαπνοή - ET), οι απορροές σε ποτάμια και λίμνες και οι υπόγειες αποστραγγίσεις [Berg & Sheffield, 2018].

Ο υπολογισμός της εδαφικής υγρασίας, πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τα δεδομένα για τα ποσοστά υγρασίας του εδάφους (θ_i), τα οποία έχουν συλλεχθεί με τη χρήση υγρασιόμετρου, μέχρι και το βάθος των 90cm από την επιφάνεια. Στη συνέχεια, πολλαπλασιάζονται με το ύψος των βαθών (z_i), το οποίο, όπως αναφέρθηκε είναι 10 cm και με την επιφάνεια επιρροής, η οποία είναι το κομμάτι της επιφάνειας που είναι νωπό λόγω της εξάπλωσης του νερού στο έδαφος (A) και εξαρτάται από την ακτίνα επιρροής ως εξής:

$$S(t) = \theta_i \cdot z_i \cdot A$$

Η εδαφική υγρασία, για μια ζητούμενη χρονική περίοδο, υπολογίζεται από την αφαίρεση των αρχικών τιμών της υγρασίας, από τις τελικές ως εξής:

$$\Delta S = S(t + dt) - S(t)$$

2.1.3. ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ - EVAPOTRANSPIRATION (ET)

Η εξατμισοδιαπνοή είναι η διεργασία με την οποία περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιείται το νερό από μια καλλιέργεια, κάνοντάς την βασικό στοιχείο των μελετών αποδοτικής άρδευσης. Επομένως, στην παρούσα μελέτη, είναι ο καθοριστικός όρος που υποδεικνύει την ποσότητα του νερού με την οποία χρειάζεται να αρδευτεί ο αγρός, ώστε να εξυπηρετούνται οι λειτουργίες των φυτών, αποφεύγοντας το υδατικό στρες και ελαχιστοποιώντας τη βαθιά διήθηση. Με την εκτίμηση της ET διευκολύνεται η οργάνωση των συστημάτων άρδευσης, αφού λαμβάνονται υπόψη οι μεμονωμένες υδατικές ανάγκες, κάθε υπό μελέτη καλλιέργειας. Με την κατανόηση των αναγκών αυτών, διευκολύνεται, και το έργο της διαχείρισης του νερού, αφού ο αγροτικός τομέας είναι ο κύριος καταναλωτής των υδάτινων πόρων παγκοσμίως [Al-Ghobari, 2000].

Ο όρος της ET, σε φυτοκαλυμμένες εκτάσεις, δημιουργείται με τη σύζευξη δύο διεργασιών, αυτές της εξάτμισης και της διαπνοής. Ο όρος αποτελεί το δεύτερο

σημαντικότερο κομμάτι του υδρολογικού κύκλου, μετά τη βροχόπτωση [Cleverly et al., 2013] και επιστρέφει το 60% του νερού της βροχόπτωσης στην ατμόσφαιρα. Μέσω της εξατμισοδιαπνοής, το νερό μετατρέπεται σε αέρια φάση και διατίθεται στην ατμόσφαιρα, υπό την μορφή υδρατμών. Η διαφυγή νερού μέσω υδρατμών συμβαίνει είτε, κατευθείαν, από την επιφάνεια του υγρού εδάφους, όπου γίνεται λόγος για τη διεργασία της εξάτμισης, είτε, περνώντας πρώτα από το φυτό, εξερχόμενο, έπειτα, από τα στόματα, δηλαδή τη διεργασία της διαπνοής [Wallace, 1995]. Οι διεργασίες της διαπνοής και της εξάτμισης λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα και είναι δύσκολο να διακριθούν, επομένως συγχωνεύονται και υπολογίζονται μαζί, σχηματίζοντας τον ενιαίο όρο της εξατμισοδιαπνοής, ET.

Παρά τη σημαντικότητα του όρου, ο υπολογισμός των τιμών του βρίσκεται ακόμη υπό μελέτη, αφού δεν υπάρχει κάποια καθορισμένη μέθοδος. Η τηλεπισκόπηση έχει αναγνωριστεί ως μια ικανοποιητική πρακτική για τον υπολογισμό αυτό, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμήσει τις επιφανειακές παραμέτρους που απαιτούνται για την εκτίμηση του ET, όπως ο δείκτης της φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Index-LAI), η λευκαύγεια και η θερμοκρασία επιφάνειας (T_s).

Οι μέθοδοι τηλεπισκόπησης μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις τύπους: (1) εμπειρικές στατιστικές μέθοδοι, (2) υπολειπόμενες μέθοδοι βασιζόμενες στο εναπομείναν της ισορροπίας της επιφανειακής ενέργειας διαμέσου δεδομένων θερμικού υπέρυθρου, (3) τριγωνικοί/τραπεζοειδείς μέθοδοι συνδεδεμένες με δείκτη βλάστησης και T_s και (4) οι μέθοδοι Penman-Monteith ή Priestley-Taylor. Η μέθοδος τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη ανήκει στην τέταρτη περίπτωση, και είναι η εξίσωση του Penman-Monteith [Sun et al., 2013]. Επίσης, φαίνεται πως η συγκεκριμένη εξίσωση είναι και η πιο ακριβής ανάμεσα σε μια πληθώρα από εξισώσεις που προτάσσουν τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής. Η μέθοδος συστήνεται από το FAO (Food and Agriculture Organization) ("Irrigation and Drainage Paper No.24 'Crop water requirements'") και είναι η εξίσωση, που χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση των τιμών της ET. Με τη συνδυασμένη εξίσωση των Penman-Monteith, ξεπερνιούνται οι ελλείψεις της εξίσωσης Penman, η οποία προτεινόταν προηγουμένως από τη FAO. Ο Monteith (1965) γενικοποίησε την εξίσωση του Penman με την εισαγωγή δυο αντιστάσεων για τη μεταφορά ατμών. Η μια αφορά τη μεταφορά αυτή από επιφάνειες στην ατμόσφαιρα, μέσω του φυλλώματος (r_s) και η άλλη, μέσω του αέρα (r_a) σε ένα ύψος αναφοράς [Russell, 1980]. Η Penman-Monteith απαιτεί λεπτομερειακή γνώση των μετεωρολογικών δεδομένων της περιοχής μελέτης και αυτός, είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο, μπορεί να είναι περιορισμένη η χρήση της [Rahimi Khoob, 2008, Lang et al., 2017]. Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ET η Penman-Monteith, επειδή διαθέτουμε μετεωρολογικούς σταθμούς και τα απαραίτητα δεδομένα, που απαιτούνται για τη χρήση της.

Ειδικότερα, η ET που υπολογίζεται, μέσω της εξίσωσης Penman-Monteith, είναι στην πραγματικότητα, η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o), η οποία ορίζεται ως: "ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής από μια υποθετική βλάστηση ύψους 12 cm, αντίσταση φυτού 70 sm^{-1} και λευκαύγεια 0,23, που θα μπορούσε να ομοιάζει με την εξατμισοδιαπνοή από μια εκτεταμένη επιφάνεια που είναι καλυμμένη με πράσινο γρασίδι που έχει ομοιόμορφο ύψος, αυξάνεται ενεργά, σκεπάζει εξ ολοκλήρου το έδαφος και έχει επάρκεια νερού" [Lang et al., 2017]. Η πραγματική ET και η ET_o εξισώνονται και επομένως, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη συνδυασμένη μέθοδο, απευθείας, για τους υπολογισμούς που μας ενδιαφέρουν. Αυτό είναι δυνατό, διότι στην εξίσωση έχουν εισαχθεί οι ειδικοί παράγοντες αντίστασης (r_s και r_a).

Η εξίσωση που έχουμε από τη FAO για την ET αναφοράς είναι:

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{C_n}{T + 273}\right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + C_d \cdot u_2)}$$

Οι τιμές των σταθερών C_n και C_d είναι 900 και 0,34, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές για κομμένο γρασίδι ως καλλιέργεια αναφοράς και για ημερήσιες ανάγκες, σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1. [Pereira et al., 2015].

Πίνακας 2.1. Τιμές για τα C_n και C_d [Pereira et al., 2015]

Χρονικό Βήμα Υπολογισμού	Χαμηλή βλάστηση- αναφορά (κομμένο γρασίδι)		Υψηλή βλάστηση- αναφορά (άλφα-άλφα)		Μονάδες για ET_o , ET_r	Μονάδες για R_n , G
	C_n	C_d	C_n	C_d		
Ημερήσια	900	0.34	1600	0.38	mmd ⁻¹	MJm ⁻² d ⁻¹
Ωριαία κατά τη διάρκεια της ημέρας	37	0.24	66	0.25	mmh ⁻¹	MJm ⁻² h ⁻¹
Ωριαία κατά τη διάρκεια της νύχτας	37	0.96	66	1.7	mmh ⁻¹	MJm ⁻² h ⁻¹

2.1.3.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΗΣ PENMAN-MONTEITH

Η Penman-Monteith, όπως προαναφέρθηκε, είναι μια μέθοδος που βασίζεται στην ύπαρξη των απαραίτητων μετεωρολογικών δεδομένων, τα οποία και επεξεργάζονται αναλόγως. Συγκεκριμένα, τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρειάζονται για την κατασκευή της εξίσωσης είναι η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση ημερήσια θερμοκρασία, η υγρασία, η ακτινοβολία και η ταχύτητα ανέμου. Προηγουμένως, είχε παρατεθεί η εξίσωση που είχαμε για την ET αναφοράς. Τώρα, εισάγοντας τους παράγοντες αντίστασης, η εξίσωση μετατρέπεται στην παρακάτω μορφή, η οποία και χρησιμοποιείται στην μελέτη:

$$\lambda ET = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_a \cdot C_p \cdot \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

όπου:

- **λ (MJ/m.d)**, είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης
- **Δ (kPa/°C)**, είναι η κλίση της καμπύλης της τάσης κεκορεσμένων ατμών (e_s) συναρτήσει της θερμοκρασίας στο T
- **R_n (MJ/m²d)**, είναι η καθαρή ακτινοβολία και μετράται από τον σταθμό που βρίσκεται εγκατεστημένος στο χωράφι
- **G (MJ/m²d)**, είναι η ροή θερμότητας στο έδαφος και την έχουμε θεωρήσει μηδενική ($G=0$)
- **ρ_a (kg/m³)**, είναι η μέση πυκνότητα του αέρα σε σταθερή πίεση και ισούται με 1,2 kg/m³

- C_p (MJ/kg°C), είναι η ειδική θερμότητα του αέρα και ίση με 1,013 KJ/kg°C
- $(e_s - e_a)$ (kPa), αντιπροσωπεύει το έλλειμμα πίεσης υδρατμών του αέρα
- r_a (s/m), η αεροδυναμική αντίσταση
- r_s (s/m), αποτελεί την επιφανειακή αντίσταση της καλλιέργειας
- γ (kPa/°C), είναι η ψυχομετρική σταθερά και είναι ίση με 0,66 mbar/K

Πιο συγκεκριμένα, ο κάθε παράγοντας υπολογίζεται ξεχωριστά με τις παρακάτω σχέσεις:

Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (λ): $\lambda = 2501 - 2,361 \times T_{mean}$, όπου: T_{mean} (°C): είναι η μέση θερμοκρασία του αέρα

Η λανθάνουσα ενέργεια είναι η ενέργεια που απαιτείται προκειμένου να μετατραπεί το νερό από την υγρή κατάσταση στην αέρια. Η αλλαγή κατάστασης επιτυγχάνεται, καθώς, μέσω της λανθάνουσας ενέργειας, αυξάνεται ο διαχωρισμός μεταξύ των μορίων του νερού [Wallace, 1995].

Κλίση της καμπύλης (Δ): $\Delta = \frac{4098 \cdot 0,618 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T_{mean}}{237,3 + T_{mean}}}}{(T_{mean} + 273,3)^2}$

Η κλίση της καμπύλης (Δ), εισήχθη από τον Monteith (1965). Ο παράγοντας αυτός είναι μια προσέγγιση του ρυθμού με τον οποίο, αλλάζει η κορεσμένη πίεση συναρτήσει της θερμοκρασίας [Wallace, 1995].

Έλλειμμα της πίεσης των ατμών ($e_s - e_a$) δίνεται από τα:

- e_s (kPa), η πίεση των ατμών κορεσμού, $e_s = \frac{e_{Tmax} + e_{Tmin}}{2}$, με e_{Tmax} (kPa), να είναι η πίεση ατμών κορεσμού στη μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία και υπολογίζεται από την $e_{Tmax} = 0,608 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T_{max}}{237,3 + T_{max}}}$ και e_{Tmin} (kPa) είναι η πίεση ατμών κορεσμού στην ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία και υπολογίζεται από την $e_{Tmin} = 0,608 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T_{min}}{237,3 + T_{min}}}$
- e_a (kPa), η πραγματική πίεση ατμών, $e_a = \frac{e_{Tmin} \frac{RH_{max}}{100} + e_{Tmax} \frac{RH_{min}}{100}}{2}$, με e_{Tmax} (kPa) και e_{Tmin} (kPa) να είναι η πίεση ατμών κορεσμού στη μέγιστη και ελάχιστη, ημερήσια, θερμοκρασία και RH_{min} (%) και RH_{max} (%), η ελάχιστη και μέγιστη υγρασία, αντίστοιχα.

Η πίεση των ατμών κορεσμού, στη μέγιστη και στην ελάχιστη θερμοκρασία (e_{Tmax} , e_{Tmin}), υπολογίζεται από το τύπο του Teten (όπως παρατίθενται παραπάνω). Η πίεση των ατμών κορεσμού είναι ένας περίπλοκος παράγοντας, καθώς μεταβάλλεται

αναλογικά της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, αλλά και του τρόπου, με τον οποίο αυτή λαμβάνεται από το φύλλο [Hatfield and Dold, 2019].

Αεροδυναμική αντίσταση(r_a): Για τον υπολογισμό της αεροδυναμικής αντίστασης, χρησιμοποιείται ο τύπος του Perrier (1975a, b) όπως δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$r_a = \frac{\ln(\frac{z_m-d}{z_{om}}) \cdot \ln(\frac{z_h-d}{z_{oh}})}{k^2 \cdot U_z} \quad [\text{Viney, 1991, Cleverly et al., 2013}], \text{ όπου:}$$

z_m (m): ύψος των μετρήσεων ταχύτητας ανέμου, όπου εδώ είναι 3,15 m

z_h (m): ύψος μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα, όπου εδώ είναι 3,15 m

d (m): ύψος μετατόπισης μηδενικού επιπέδου, με $d = \frac{2}{3} \times h$, όπου h είναι το ύψος του φυτού 2.1 m

z_{om} (m): μήκος τραχύτητας που διέπει τη μεταφορά ορμής, με $z_{om} = 0.123 \times h$

z_{oh} (m): μήκος τραχύτητας που διέπει τη μεταφορά θερμότητας και υδρατμών, με

$$z_{oh} = 0.1 \times z_{om}$$

k (-): σταθερά von Karman, 0.41

u_z (m/s): ταχύτητα του ανέμου στο ύψος z

Η εξίσωση αυτή εφαρμόζεται για ουδέτερες συνθήκες, οι οποίες επικρατούν όταν έχουμε συνδυασμένη ανταλλαγή θερμότητας. Πιο αναλυτικά, ανάλογα με την κίνηση και την πυκνότητα του αέρα, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας, η μετάδοση θερμότητας είτε θα κυριαρχείται από εξαναγκαζόμενη ανταλλαγή θερμότητας, λόγω της επίδρασης της κίνησης του αέρα πάνω από τα φύλλα, είτε θα κυριαρχείται από ελεύθερη ανταλλαγή θερμότητας, λόγω της επίδρασης της διαφοράς θερμοκρασίας. Η συνδυασμένη ανταλλαγή θερμότητας συμβαίνει όταν και οι δυο επιδράσεις έχουν την ίδια επιρροή. [Zhang and Lemeur, 1991, Viney, 1991].

Τέλος, η **επιφανειακή αντίσταση της καλλιέργειας (r_s)** ορίζεται ως η αντίσταση της επιφάνειας στην ροή των ατμών και βασίζεται σε ατμοσφαιρικούς παράγοντες και στην υγρασία του εδάφους [Anadranistakis et al., 2000]. Εξαρτάται από την ολική φυλλική επιφάνεια και την επιφάνεια του εδάφους [Gong et al., 2017] και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{active}},$$

όπου:

r_l (s/m): αντίσταση στομάτων φύλλου

LAI_{active} [m^2 (επιφάνεια φύλλου)/ m^2 (επιφάνεια εδάφους)]: δείκτης φυλλικής επιφάνειας

Η παραπάνω σχέση είναι εμπειρική και χρησιμοποιείται με φειδώ, μόνο εφόσον διατίθενται τα απαραίτητα στοιχεία για την αντίσταση των στομάτων και την φυλλική

επιφάνεια [Szeicz and Long, 1969]. Όσον αφορά την αντίσταση των στομάτων, αυτή παρέχεται είτε κάνοντας χρήση της σχέσης του φυλλώματος με την ηλιακή ακτινοβολία, είτε με πορομετρία ή με χρήση ειδικού οργάνου (leaf chamber) και είναι εξαρτώμενη των καιρικών συνθηκών και διαφορετική για κάθε είδος φυτού. Μέσω της αντίστασης των στομάτων ελέγχονται οι ρυθμοί της διαπνοής, οι οποίοι υποδεικνύουν την ποσότητα του νερού που κινείται, μέσω του φυτού, από το υπέδαφος προς την ατμόσφαιρα [Vilalta and Forner, 2016, Jefferson et al., 2017]. Όσον αφορά τη φυλλική επιφάνεια (LAI), ο υπολογισμός της γίνεται με τη χρήση του one-sided LAI. Συγκεκριμένα αυτή υπολογίζεται παίρνοντας το ήμισυ του ολικού (ή μέγιστου) LAI, ακόμη και αν οι δύο πλευρές των φύλλων δεν είναι συμμετρικές [Asner et al., 2003, Fang et al., 2019], όπως παρατίθεται παρακάτω:

$$LAI_{active} = 0,5 \cdot LAI$$

Η φυλλική επιφάνεια είναι ο πρωτεύον μηχανισμός ελέγχου της πρωτογενούς παραγωγικότητας (φωτοσύνθεση), της διαπνοής και της ανταλλαγής ενέργειας ενός οικοσυστήματος. Μετράει την ποσότητα του φυλλώματος και ορίζεται ως η ποσότητα της φυλλικής επιφάνειας (m²) σε ένα φύλλωμα ως προς τη μονάδα επιφάνειας του εδάφους (m²). Το LAI είναι αδιάστατο και μπορεί να μετρηθεί, να αναλυθεί και να μοντελοποιηθεί σε ποικιλία χωρικών κλιμάκων. Ως αποτέλεσμα, έχει πραγματοποιηθεί ένα κεντρικό κομμάτι της περιγραφής της κατάστασης της βλάστησης σε αφειδία φυσιολογικών, κλιματολογικών και βιοχημικών μελετών, καθώς αποτελεί χαρακτηριστικό βλάστησης, “κλειδί” στο κομμάτι της κλιματικής αλλαγής [Asner et al., 2003].

2.1.4. ΠΑΡΟΧΗ ΑΡΔΕΥΣΗΣ - IRRIGATION RATE (Q_{irr.})

Ο τελευταίος όρος που θα αναλύσουμε αφορά τον όγκο άρδευσης, Q_{irr.}, ο οποίος αντιπροσωπεύει την ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται για την άρδευση της καλλιέργειας. Ακόμη, στον όγκο άρδευσης συμπεριλαμβάνεται και η ποσότητα νερού που δέχεται η καλλιέργεια λόγω βροχόπτωσης. Η ποσότητα αυτή καταγράφεται και μεταφέρεται σε υπολογιστικά φύλλα excel.

Στο πείραμα, ο όγκος άρδευσης είναι διαφορετικός για κάθε χρονιά που μελετάται, καθώς σκοπός είναι η εκτίμηση της απαραίτητης αυτής ποσότητας που θα δώσει το λιγότερο όγκο διήθησης, ενώ την ίδια στιγμή θα καλύπτονται οι απαραίτητες ανάγκες των φυτών. Η κατανόηση των αναγκών της καλλιέργειας σε νερό, θα επιτρέψει το σωστό προγραμματισμό των αρδεύσεων και θα βελτιώσει την απόδοση της χρήσης νερού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η Ελλάδα είναι μια χώρα με ημίξηρο κλίμα και διαθέτει μια περιορισμένη ποσότητα υδάτινων πόρων, η οποία λόγω του τουρισμού και της αλλαγής του κλίματος θα συνεχίσει μόνο να επιδεινώνεται. Επομένως, η ορθή χρήση νερού είναι ιδιάζουσας σημασίας, ειδικά στον αγροτικό τομέα, ο οποίος συνιστά και τον πρωτεύοντα καταναλωτή νερού.

2.2. ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ

Στην καλλιέργεια, εκτός από τα μετεωρολογικά δεδομένα, συλλέχθηκαν και τα δεδομένα φασματικής ανάκλασης. Με αυτά τα δεδομένα, κατασκευάζονται δείκτες βλάστησης προκειμένου να ελέγχεται η υγεία της βλάστησης.

Οι δείκτες βλάστησης δημιουργήθηκαν για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1970 και χρησιμοποιούνται έκτοτε σε διάφορες εφαρμογές αξιολόγησης της βλάστησης ή του φυλλώματος ή ακόμα και στην εκτίμηση διαδικασιών, όπως η εξατμισοδιαπνοή [Glenn et al., 2008]. Ενώ έχουν εκπονηθεί πειράματα για την διεύρυνση των χρήσεων των δεικτών, τα αποτελέσματα δεν ήταν αρκετά αξιόπιστα. Επομένως, η κύρια χρήση τους συνίσταται στη μέτρηση απορρόφησης φωτός από το φύλλωμα [Glenn et al., 2008, Chen, 2018]. Οι δείκτες χρησιμοποιούν δεδομένα από δύο ή περισσότερες φασματικές ζώνες και ο υπολογισμός τους αφορά είτε γραμμικούς, είτε μη-γραμμικούς συνδυασμούς δεδομένων τηλεπισκόπησης, στο κόκκινο χρώμα του ορατού φάσματος και στο εγγύς-υπέρυθρο [Liang and Wang, 2020]. Δεδομένου ότι η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι σταθερή και ποικίλει αναλογικά με το χρόνο και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, μια απλή μέτρηση του ανακλώμενου φωτός από την επιφάνεια, δεν επαρκεί για τον χαρακτηρισμό της, έτσι η εισαγωγή δεικτών βλάστησης βοηθά την εξαγωγή συμπερασμάτων [Jackson and Huete, 1991].

Οι δείκτες με τους οποίους θα ασχοληθούμε, οι NDVI και PRI, κάνουν χρήση δύο ζωνών. Με τους δείκτες αυτού του τύπου, συνήθως μετράται η αναλογία της ανάκλασης του φωτός στο κόκκινο και εγγύς-υπέρυθρο κομμάτι του φάσματος, ώστε να διαχωρίζονται τα στοιχεία του νερού, του χώματος και της βλάστησης. Στις επιφάνειες με βλάστηση, παρατηρείται πως το μεγαλύτερο ποσοστό του φωτός στο εγγύς-υπέρυθρο μήκος κύματος εκπέμπεται και ανακλάται, με μικρή ποσότητα να απορροφάται. Αντιθέτως, στα μήκη κύματος του ορατού φάσματος, η απορρόφηση είναι προεξέχουσα, με κάποιο ποσοστό να ανακλάται και ελάχιστο να εκπέμπεται [Jackson and Huete, 1991, Glenn et al., 2008, Chen, 2018, Liang and Wang, 2020].

Ο NDVI θεωρείται ένας παγιωμένος δείκτης και έχει μια μακρά ιστορία χρήσης στο ερευνητικό πεδίο της τηλεπισκόπησης. Ο δείκτης PRI είναι πολύ πιο πειραματικός, με νέες χρήσεις και νέους περιορισμούς να ανακαλύπτονται διαρκώς. Ενώ οι δείκτες NDVI και PRI δύναται να αποτελέσουν ισχυρά εργαλεία για την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη δομή και τις λειτουργίες του φυλλώματος, χρειάζεται να λαμβάνονται υπόψη και οι περιορισμοί που εμφανίζουν. Πιο συγκεκριμένα, αναμένονται παρεκκλίσεις στα αποτελέσματα, καθώς οι δείκτες επηρεάζονται από το περιβάλλον της υπό μελέτη βλάστησης (χρώμα, υγρασία, ζενίθεια γωνία ηλίου, ατμόσφαιρα κ.ο.κ.) [Jackson and Huete, 1991]. Παρόλο που είναι κατασκευασμένοι ώστε να ανιχνεύουν μόνο τα σήματα από το φυτό, αγνοώντας τις πιθανές οχλήσεις, αυτό δεν είναι εφικτό στο μέγιστο.

2.2.1. ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ - NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (NDVI)

Με το δείκτη κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης, NDVI, μετράται η επιφανειακή ανακλαστικότητα και εκτιμάται η ποσότητα και η ποιότητα της βλάστησης σε μια περιοχή μελέτης [Bhandari et al., 2012]. Ο δείκτης έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς ανά τα χρόνια και είναι μια μη-καταστρεπτική μέθοδος τηλεπισκόπησης και ποσοτικοποίησης συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του φυλλώματος (φυλλική βιοχημεία, περιεχόμενο χρωστικής, δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI), φαινολογία, φωτοσύνθεση του φυλλώματος κ.ο.κ.).

Ο υπολογισμός του γίνεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$NDVI = \frac{NIR(800) - VIS(630)}{NIR(800) + VIS(630)} \quad \text{ή} \quad NDVI = \frac{Nr_{800}/Ni_{800} - Nr_{630}/Ni_{630}}{Nr_{800}/Ni_{800} + Nr_{630}/Ni_{630}},$$

όπου το NIR (Nr) στα 800 nm είναι το εγγύς υπέρυθρο και το VIS (Ni) στα 630 nm, αποτελεί το μήκος φάσματος του ορατού φωτός. Ο υπολογισμός βασίζεται στον κανόνα ότι η βλάστηση αντανακλά το φως διαφορετικά στο ορατό φάσμα (400 με 700 nm), από ότι στο εγγύς υπέρυθρο (> 700 nm). Τα πράσινα φύλλα απορροφούν το φως πιο έντονα στο ορατό φάσμα, ειδικότερα στα κόκκινα μήκη κύματος, αλλά ανακλούν το φως στην εγγύς περιοχή.

Ο δείκτης αποδίδει τιμές μεταξύ των -1 και 1 [USDA]. Οι θετικές και αυξανόμενες τιμές του NDVI υποδεικνύουν υγιή και έντονη, πράσινη βλάστηση. Ενώ, οι τιμές που είναι κοντά στο μηδέν και/ή είναι αρνητικές, υποδεικνύουν την έλλειψη βλάστησης (βράχοι, χώμα, νερό, χιόνι, πάγος και σύννεφα).

2.2.2. ΔΕΙΚΤΗΣ ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ - PHOTOCHEMICAL REFLECTANCE INDEX (PRI)

Ο δείκτης PRI προτάθηκε το 1992 από τους Gamon, Penueles και Field [Gamon et al., 1992], ως μέθοδος αποκόμισης πληροφοριών για το επίπεδο του στρες του φυτού ως προς το φως, χρησιμοποιώντας ανάκλαση στενής ζώνης [Garbulsky et al., 2010]. Τα φυτά συχνά εκτίθενται σε περισσότερη ακτινοβολία από αυτή που τους είναι απαραίτητη για φωτοσύνθεση, έτσι διαθέτουν διάφορους μηχανισμούς με σκοπό να απαλλαχτούν από αυτή την περίσσεια με μη-καταστροφικό τρόπο. Ένας εξ αυτών είναι η διάλυση της περίσσειας ακτινοβολίας μέσω του ξανθοφυλλικού κύκλου, όπου η χρωστική βιολαξανθίνη απο-εποξειδώνεται, μέσω της χρωστικής ανθεραξανθίνης, στη χρωστική ζεαξανθίνη. Η εναλλαγή αυτή μεταξύ των χρωστικών και συνεπώς και των μηκών φάσματος, καταλήγει να αποδίδει ένα ανιχνεύσιμο “σήμα” κοντά στα 531 nm. Για τον υπολογισμό του δείκτη χρησιμοποιείται αυτό το μήκος κύματος σε συνδυασμό με ένα μήκος κύματος αναφοράς, στα 570 nm, το οποίο δεν επηρεάζεται από το σήμα ανάκλασης του κύκλου της ξανθοφύλλης.

Ο PRI συμπληρώνει τον NDVI, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στο μεμονωμένο φύλλο και χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε καλλιέργειες. Αποτελεί εργαλείο στην πρόβλεψη της φωτοσυνθετικής απόδοσης [Garbulsky et al., 2010] και παρέχει πληροφορίες για τις φυσικές ιδιότητες του φύλλου, χωρίς παρεμβατικό τρόπο [Thenot et al., 2002].

Ο δείκτης δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$PRI = \frac{R_{531} - R_{570}}{R_{531} + R_{570}},$$

όπου ο όρος R υποδεικνύει την ανακλαστικότητα και οι αριθμοί τα νανόμετρα του μήκος κύματος στο κέντρο των ζωνών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για τον δείκτη εντοπίζονται αμφιβολίες όσον αφορά τις εφαρμογές του, αφού η ερμηνεία του επηρεάζεται από πολλαπλές περιβαλλοντικές μεταβλητές. Ταυτόχρονα, τα μήκη κύματος που αναφέρονται δεν είναι εκτενώς μελετημένα για κλίμακες μεγαλύτερες από αυτές του ενός μεμονωμένου φύλλου, επομένως δεν μπορούμε να γνωρίζουμε με βεβαιότητα εάν τα 531 και 570 nm είναι αντιπροσωπευτικά και για μεγαλύτερες κλίμακες.

2.3. ΑΚΑΘΑΡΙΣΤΗ ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ - GROSS PRIMARY PRODUCTIVITY (GPP)

Η Ακαθάριστη Πρωτογενής Παραγωγή (Gross Primary Productivity - GPP) ορίζεται ως το σύνολο των ανθρακικών ενώσεων και του νέου φυτικού ιστού που παράγονται εντός ενός χρονικού διαστήματος, μέσω της φωτοσύνθεσης. Οι κύριοι παραγωγοί είναι τα πράσινα φυτά, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια, το διοξείδιο του άνθρακα, το νερό και τα θρεπτικά συστατικά, σε γλυκόζη και μετέπειτα σε φυτικό ιστό. Απλούστερα, το GPP αποτελεί το ρυθμό φωτοσύνθεσης και το ρυθμό, με τον οποίο η ενέργεια μετατρέπεται σε βιομάζα [Roy and Saugier, 2001].

Ο υπολογισμός του GPP είναι βασικό εργαλείο μελέτης των οικοσυστημάτων και του τρόπου με τον οποίο αυτά θα μεταβληθούν στο μέλλον. Το GPP παρέχει μια εικόνα για την οικολογία, τον κύκλο του άνθρακα και το πως η κλιματική αλλαγή επηρεάζει την μελλοντική φωτοσύνθεση [Alton, 2016].

Η εύρεση του GPP στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται με την εφαρμογή δεδομένων τηλεπισκόπησης σε μοντέλο αποδοτικότητας της χρήσης φωτός (LUE - light use efficiency). Σε αυτό το μοντέλο το GPP θεωρείται προϊόν της φωτοσυνθετικά απορροφώμενης ενεργής ακτινοβολίας (APAR - absorbed photosynthetically active radiation) και του LUE.

Υπάρχουν διάφορα μοντέλα, τα οποία διαφέρουν ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζουν τους δυο αυτούς παράγοντες και κυρίως το APAR [Mingzhu et al., 2013]. Το μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε είναι αυτό που έχει προταθεί από τον Monteith [Monteith, 1977, Qingyuan et al., 2014] και το οποίο εκτιμά το GPP ως εξής:

$$GPP = LUE \times fAPAR_{PNS} \times PAR$$

όπου:

PAR, είναι η φωτοσυνθετικά ενεργός ακτινοβολία και $fAPAR_{PNS}$, είναι το μέρος της PAR που μπορεί να απορροφηθεί από το πράσινο φύλλωμα. Το γινόμενο των δυο παραγόντων αποτελεί το APAR.

2.3.1. ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΦΩΤΟΣ - LIGHT USE EFFICIENCY (LUE)

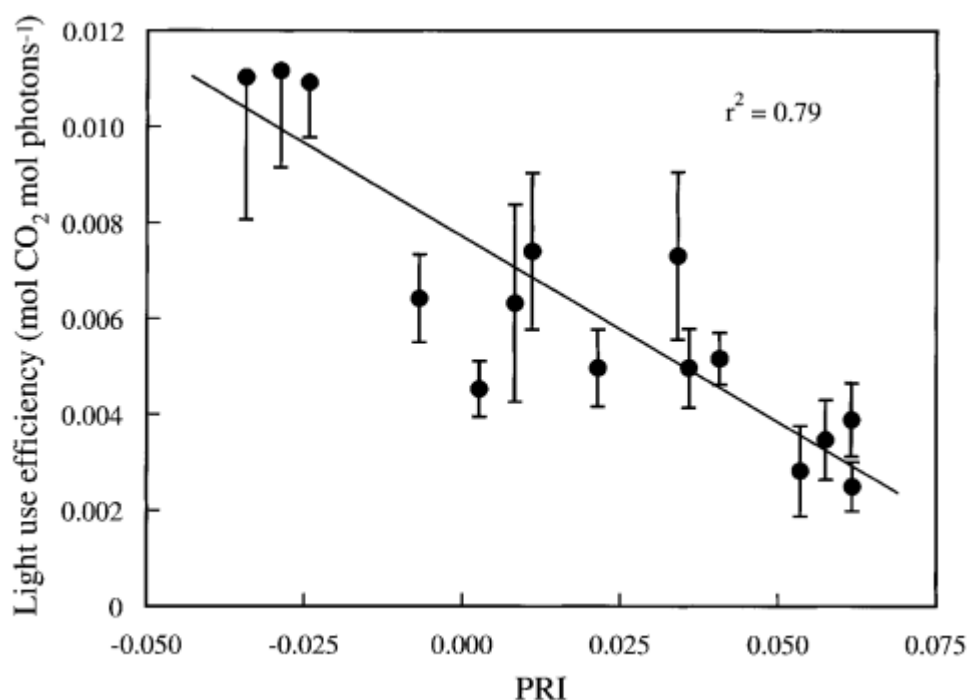
Όσον αφορά τον υπολογισμό της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (LUE) χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης PRI, ο οποίος όπως προαναφέρθηκε, κάνει χρήση των ζωνών 531 και 570 nm [Trotter et al., 2001]. Μελέτες ανά τα χρόνια συσχετίζουν το δείκτη PRI με το LUE [Peñuelas et al. 1995, Peñuelas et al. 1997, Garbulsky et al., 2008, Nakaji T., 2014], ιδιαίτερα όταν γίνεται λόγος για μικρές κλίμακες πειραματικών δειγμάτων (μεμονωμένα φύλλα, μικρά φυλλώματα) [Peñuelas et al. 1997, Trotter et al., 2001], χωρίς να έχει εδραιωθεί μια εξίσωση με καθολική ισχύ [Zhang et al., 2015]. Παρόλα αυτά, καθώς η σχέση μεταξύ τους είναι δυνατή σε τόπους με μεγάλη ηλιοφάνεια, χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή, καθώς τα Χανιά είναι μια περιοχή η οποία δεν υπολείπεται μεγάλων ποσοτήτων ηλιακής ακτινοβολίας, με την επιφύλαξη βέβαια της ύπαρξης σφαλμάτων.

Η εξίσωση που μας δίνει τη σχέση μεταξύ του LUE και του PRI είναι:

$$LUE = -0.08 \times PRI + 0.008$$

στην οποία καταλήγουμε με τη βοήθεια του παρακάτω διαγράμματος (Εικόνα 2.3.) από τη μελέτη των Trotter et al., 2001. Όπως παρατηρούμε έχουν αρνητική

συσχέτιση η οποία συμφωνεί και με τη μελέτη των Soudani et al., 2014, οι οποίοι μελέτησαν για οχτώ χρόνια την σχέση μεταξύ των LUE/PRI σε δυο δάση και κατέληξαν στο συμπέρασμα πως παράγονται καλύτερα αποτελέσματα σε μικρότερα χρονικά δείγματα. Στη συγκεκριμένη μελέτη έχουμε χρησιμοποιήσει κυρίως τα δεδομένα των μηνών του καλοκαιριού, ώστε να υπολογίσουμε το LUE, επομένως γίνεται λόγος για μικρό χρονικό παράθυρο, το οποίο δίνει χώρο για μικρότερα σφάλματα. Τέλος, το γεγονός ότι αυτοί οι μήνες συνοδεύονται με ελάχιστη νέφωση ενισχύει τη σχέση μεταξύ PRI-LUE [Coops et al., 2010, Soudani et al., 2014, Zhang et al., 2015].



Εικόνα 2.3. Σχέση PRI/LUE [Trotter et al., 2001]

2.3.2. ΚΛΑΣΜΑ ΑΠΟΡΡΟΦΩΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ - FRACTION OF ABSORBED PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION (fAPAR)

Συνεχίζοντας, σημαντικό κομμάτι της αξιολόγησης της ακαθάριστης πρωτογενούς παραγωγής αποτελεί και το κλάσμα της απορροφώμενης ενεργής ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται για φωτοσύνθεση (fAPAR). Το fAPAR, μπορεί να είναι δείκτης της κατάστασης του φυλλώματος του φυτού [Gobron et al., 2006], αφού εκφράζει τη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία, η οποία απορροφάται από το πράσινο φύλλωμα, για φωτοσύνθεση [Zhang et al., 2015]. Η fAPAR εξετάζει την απορροφούμενη ακτινοβολία εντός του φάσματος των 400-700 nm και στο ίδιο φάσμα λειτουργεί και ο δείκτης βλάστησης NDVI, για την εκτίμηση του οποίου, όπως έχει ήδη αναφερθεί, χρησιμοποιούνται δυο ζώνες (κόκκινη περιοχή φάσματος και εγγύς-υπέρυθρο). Είναι επόμενο, λοιπόν, να έχει στραφεί μεγάλο κομμάτι του ενδιαφέροντος στην εύρεση της σύνδεσης μεταξύ των fAPAR και NDVI, ώστε το πρότερο να μπορεί να υπολογιστεί μέσω του δείκτη βλάστησης [Rahman et al., 2019].

Τα ερωτήματα που τίθενται, επομένως, είναι το εάν υπάρχει σύνδεση μεταξύ τους και αν ναι, ποια είναι αυτή. Έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες ανά τα χρόνια, που προσπαθούν να απαντήσουν αυτά τα ερωτήματα [Asrar et al., 1984, Goward and Huemmrich, 1992, Carlson and Ripley, 1997, Fensholt et al., 2004, Gobron et al.,

2006, Rahman et al., 2014, Zhang et al., 2015, Rahman et al., 2019 κ.ο.κ.] και ως αποτέλεσμα έχουν προκύψει διάφορες εξισώσεις, όπως παρουσιάζονται και στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.1.).

Πίνακας 2.2. Σχέσεις μεταξύ fAPAR και NDVI [Fensholt et al., 2004]

Reference	Relationship	Vegetation	
		type	Experimental condition
Bégué (1991)	fAPAR=1.39×NDVI-0.13	Millet	In situ
Lind and Fensholt (1999)	fAPAR=1.42×NDVI-0.39	Millet, grass, sorghum	In situ
Asrar et al. (1984)	fAPAR=1.25×NDVI-0.11	Spring wheat	In situ
Hatfield et al. (1984)	fAPAR=1.20×NDVI-0.18	Spring wheat	In situ
Le Roux et al. (1997)	fAPAR=0.393-2.361×NDVI+3.782×NDVI ²	Savanna grass	In situ
Myneni and Williams (1994)	fAPAR=1.16×NDVI-0.14	Various input	Radiative transfer model (SAIL)
Prince and Goward (1995)	fAPAR=1.62×NDVI-0.036	Mixed	AVHRR satellite data (not atmospheric-corrected)
Ruimy et al. (1994)	fAPAR=1.25×NDVI-0.025	Mixed	AVHRR satellite data (atmospheric-corrected)

Η γενική άποψη τείνει στην γραμμικότητα αυτής της σχέσης (ή σχεδόν γραμμική), εφόσον γίνεται αναφορά για πράσινη βλάστηση [Daughtry et al., 1992, Myneni et al., 1994, Fensholt et al., 2004, Rahman et al., 2019]. Επομένως, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση [Asrar et al., 1984, Ruimy et al., 1994]:

$$fPAR = 1,25 \times NDVI - 0,1$$

2.3.3. ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΕΝΕΡΓΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ - PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION (PAR)

Τέλος, ακόμη μια μεταβλητή, απαραίτητη για τον υπολογισμό της πρωτογενούς παραγωγικότητας, είναι η φωτοσυνθετικά ενεργός ακτινοβολία, PAR. Ορίζεται ως η ηλιακή ακτινοβολία, που βρίσκεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στη φασματική περιοχή των 400-700 nm και εκφράζεται είτε ως πυκνότητα ροής των φωτοσυνθετικών φωτονίων (μmol photons/m²s), αφού η φωτοσύνθεση είναι μια κβαντική διεργασία, είτε ως πυκνότητα ροής της φωτοσυνθετικής ακτινοβολίας (W/m²) [Alados et al., 1996, Möttus et al., 2013]. Ο άμεσος και ακριβής υπολογισμός της PAR καθίσταται ζωτικής σημασίας στην μελέτη των οικοσυστημάτων, αλλά και στο πεδίο της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας, αφού είναι κομμάτι των εφαρμογών ηλιακής ενέργειας [Wang et al., 2013, Wang et al., 2016]. Ακόμη όμως δεν έχει καθιερωθεί, κάποια μέθοδος ή κάποιο όργανο, για την άμεση εύρεση της τιμής της PAR για ένα δεδομένο στοιχείο υπό μελέτη, επομένως χρησιμοποιούνται, κατά κόρον, εμπειρικές εξισώσεις [Alados et al., 1996, Wang et al., 2016]. Συμπερασματικά, στην παρούσα μελέτη, προσεγγίζεται

μέσω της σχέσης της με την παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία [Wang et al., 2016], η οποία συγκεντρώνεται από τη συλλογή των δεδομένων που έχουν ληφθεί από το πυρανόμετρο.

Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό είναι η παρακάτω [Zempila et al., 2016]:

$$PAR = 0.457 \times GHI - 7,424$$

2.4. ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ - WATER USE EFFICIENCY (WUE)

Ο τελευταίος όρος που αναλύουμε είναι η αποδοτικότητα χρήσης νερού (Water Use Efficiency - WUE) και υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$WUE = \frac{GPP}{ET}$$

Η WUE αποτελεί συνδυαστικό κρίκο του κύκλου του νερού και του κύκλου του άνθρακα. Τη σχέση εισήγαγαν οι Briggs και Shantz το 1913, συνδέοντας την ακαθάριστη πρωτογενή παραγωγικότητα (GPP) και την εξατμισοδιαπνοή (ET), με την αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE). Η σχέση χρησιμοποιείται σε επίπεδο φυλλώματος της καλλιέργειας, καθώς, αναλόγως την κλίμακα εξέτασης της WUE (εξέταση μεμονωμένου φύλλου, φυτού ή το φυλλώματος), θα υπάρξει δυσανάλογη ανταπόκριση και επομένως, απαιτούνται διαφορετικές προσεγγίσεις. Σύμφωνα με τους Drewry et al. (2014), ανάλογα με τη δομή του εκάστοτε φυλλώματος, επηρεάζονται και οι τιμές της ολικής παραγωγικότητας των καλλιεργειών και επομένως είναι σημαντικό να μην παραβλέπεται ως παράγοντας στη μελλοντική διαχείριση των καλλιεργειών [Hatfield and Dold, 2019].

Η μελέτη της WUE, γίνεται ολοένα και πιο σημαντική, επιδιώκοντας την αύξηση των τιμών της. Η επικρατούσα θεωρία για την αύξηση της WUE, είναι ότι απαιτείται αύξηση της ποσότητας νερού που παρέχεται για άρδευση. Μια πρόσφατη μελέτη του 2018, από τους Basso και Ritchie, δείχνει ότι η αύξηση του WUE επιτεύχθηκε για μια καλλιέργεια καλαμποκιού, χωρίς να αυξηθεί ο ρυθμός παροχής νερού. Δεδομένης της κλιματικής αλλαγής, και υπολογίζοντας ως επιπρόσθετο παράγοντα τη ταυτόχρονη αύξηση του πληθυσμού, οι μελέτες αυτές είναι κρίσιμες για την εύρεση μεθόδων για την διατήρηση ή τη βελτίωση της παραγωγής της καλλιέργειας [Hatfield and Dold, 2019].

Οι μελέτες διευκολύνονται όταν έχουμε, ως βασικό θέμα, την παρατήρηση του τρόπου, με τον οποίο τα φυτά κάνουν χρήση του νερού που λαμβάνουν. Χρειάζεται, αρχικά, να γίνει κατανοητό ότι κάθε φυτό έχει ξεχωριστές ανάγκες και λειτουργίες, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές του συνθήκες. Ακόμη, είναι αναγκαίο να ληφθεί υπόψη η αντίδραση του εκάστοτε φυτού στην αλλαγή του κλίματος, δηλαδή να παρατηρείται η αλληλεπίδραση του με τις αλλαγές στις τιμές του διοξειδίου του άνθρακα και της θερμοκρασίας, και η διακύμανση του υδατικού καθεστώτος. Οι αλλαγές στο κλίμα συνεπάγονται αύξηση της ζήτησης ατμοσφαιρικού νερού από τις καλλιέργειες και πιθανότατα, περιορισμό στη διαθεσιμότητα νερού στο χώμα, αφού θα υπάρχει μεγάλη εναλλαγή των φαινομένων βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάπτυξης, η οποία θα συνδυάζεται με περιορισμένη ικανότητα κατακράτησης νερού [Hatfield and Dold, 2019].

2.5. ΜΟΝΤΕΛΟ HYDRUS-1D

Η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε, παράλληλα με το υδατικό ισοζύγιο είναι το μοντέλο HYDRUS-1D. Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε είναι η 4.15.0110. Το μοντέλο προσομοιώνει τη μονοδιάστατη κίνηση του νερού, της θερμότητας και των διαφόρων διαλυμένων ουσιών. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την εξίσωση Richards για την κορεσμένη και μη-κορεσμένη ροή του νερού και εξισώσεις διασποράς και συναγωγής βασισμένες σε αυτές του Fickian, για τη μεταφορά θερμότητας και διαλυμένων ουσιών. Με τη χρήση του HYDRUS-1D εισάγεται μια δεύτερη προσέγγιση στην εύρεση του όγκου διήθησης, χρησιμοποιώντας διαφορετικές εξισώσεις, ενώ επεξεργάζονται μικρότερα χρονικά διαστήματα.

Η διαδικασία ξεκινά με το στήσιμο του μοντέλου. Ως πρώτο βήμα, εισάγονται οι πιο γενικές πληροφορίες, όπως είναι οι γεωμετρικές πληροφορίες (αριθμός των υλικών εδάφους, το βάθος του εδαφικού προφίλ), τα χρονικά βήματα, οι πληροφορίες εκτύπωσης και οι επαναλήψεις που θέλουμε να έχουμε. Όσον αφορά το χρονικό βήμα, ως χρόνος μηδέν τίθενται οι δύο ώρες πριν την άρδευση του αγρού και ως τελικό χρονικό σημείο η περίοδος μεταξύ των αρδεύσεων, όπου ήταν 4 ημέρες (96 ώρες). Οι πληροφορίες εκτύπωσης και οι επαναλήψεις αφορούν τη μορφή με την οποία θέλουμε να λάβουμε τα αποτελέσματα. Εδώ, έχοντας μέσο διάστημα μεταξύ δυο αρδεύσεων τις 96 ώρες και θέλοντας να υπάρχει μια εικόνα για κάθε μια από αυτές, οι φορές που θα εκτυπωθούν τα αποτελέσματα είναι 96.

Στη συνέχεια, επιλέγεται το μοντέλο με το οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την περίπτωση είναι αυτό του van Genuchten-Mualem. Έτσι, απαιτούνται δεδομένα για τις υδραυλικές παραμέτρους, τις οποίες και εισάγονται οριακές συνθήκες.

Τώρα, ζητούνται τα ωριαία δεδομένα του όγκου άρδευσης και της εξατμισοδιαπνοής και δεν εισάγονται τα δεδομένα της εδαφικής υγρασίας, όπως γίνεται στο υδατικό ισοζύγιο. Τα δεδομένα άρδευσης παρατίθενται στη στήλη της βροχόπτωσης και εισάγονται ως m/h. Τις ώρες που δεν αρδεύεται ο αγρός η τιμή που εισάγεται στο μοντέλο είναι το μηδέν. Για την εξατμισοδιαπνοή, έχουν διαιρεθεί τα αντίστοιχα δεδομένα με το 12 (12 ώρες της ημέρας), αφού κατά τη διάρκεια της νύχτας, όπου και εισάγεται η τιμή μηδέν, δεν έχουμε έντονα φαινόμενα εξατμισοδιαπνοής.

Επιπρόσθετα, στο μοντέλο συνυπολογίζεται η μεταφορά θερμότητας και χρησιμοποιείται η εξίσωση Chung & Horton. Εισάγονται οι οριακές συνθήκες για τη μεταφορά θερμότητας και οι ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας αέρα.

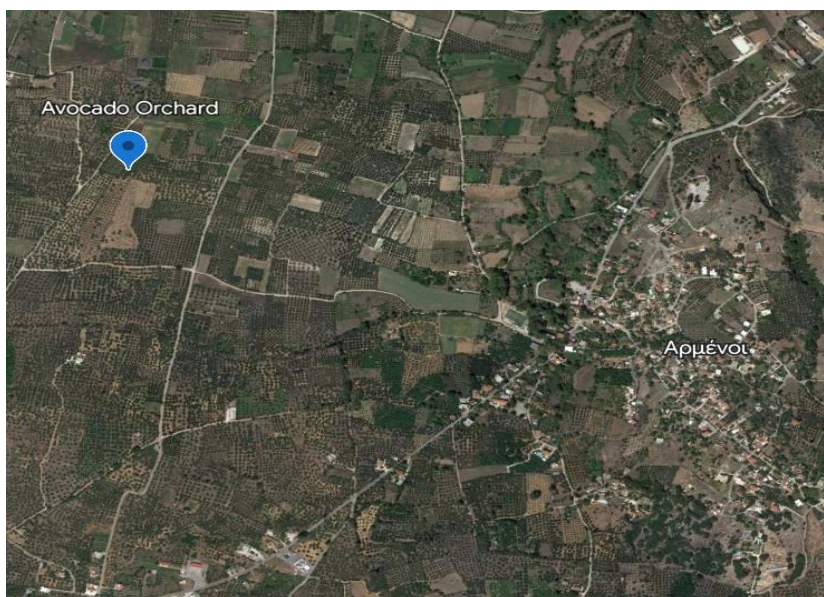
Τέλος, όσον αφορά τη μεταφορά διαλυμένων ουσιών, δεν γίνεται κάποια αλλαγή στις ήδη καταχωρημένες τιμές, αλλά βεβαιωνόμαστε ότι το μέγεθος μέτρησης της μάζας είναι mol. Εισάγεται η πυκνότητα του εδάφους και τρέχουμε το μοντέλο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ

Ο τόπος διεξαγωγής της μελέτης βρίσκεται στο Νέο Χωριό του δήμου Αποκορώνου της περιφερειακής ενότητας των Χανίων. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες του είναι 35°43'71"N, 24°14'27" E (Εικόνα 3.1.). Οι συνθήκες που επικρατούν είναι ημίξηρες

και πρόκειται για μια περιοχή μεσογειακού κλίματος. Κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, έχουμε υψηλές βροχοπτώσεις και την περίοδο του καλοκαιριού, έχουμε άνυδρες συνθήκες. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στην περιοχή είναι 1.363 mm και η μέση ετήσια θερμοκρασία 18,5°C.



Εικόνα 3.1. Πειραματική τοποθεσία [Google Earth]

Ο αγρός είναι φυτεμένος με δέντρα αβοκάντο και αρδεύεται με τη μέθοδο της «στάγδην» άρδευσης, με νερό προερχόμενο από υπόγειο υδροφορέα.

3.2. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΤ

Η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την εξίσωση Penman-Monteith, η οποία αναλύθηκε περαιτέρω και στο κεφάλαιο 2. Η εξίσωση παρουσιάζεται, εκ νέου, παρακάτω:

$$\lambda ET = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_a \cdot C_p \cdot \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

Οι υπολογισμοί περατώθηκαν σε υπολογιστικά φύλλα excel, για τα έτη 2019-2022. Συγκεκριμένα, για τις ημερομηνίες 06/07/2019-26/10/2022. Χρειάζεται να αναφερθεί ότι ο όρος της ροής θερμότητας στο έδαφος (G), θεωρείται ίσος με το μηδέν. Ακόμη, οι επιθυμητές μονάδες μέτρησης της εξατμισοδιαπνοής είναι mm/d και διαιρούνται με την λανθάνουσα θερμότητα (λ), ώστε να καταλήξουμε να έχουμε μόνο το ET.

Τα αρχικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για να βρεθούν οι παράμετροι της εξίσωσης είναι μετεωρολογικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από τον αυτοματοποιημένο μετεωρολογικό σταθμό ATMOS 41 All-in-One. Ο σταθμός είναι εγκατεστημένος σε υψόμετρο 15 m με γεωγραφικές συντεταγμένες 35°43'71"N, 24°14'27" E. Οι μετρήσεις γίνονται ανά δέκα λεπτά και τα στοιχεία που συλλέγονται είναι η βροχόπτωση, η θερμοκρασία αέρα, η βαρομετρική πίεση, η πίεση υδρατμών, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα ανέμου, η κατεύθυνση ανέμου, η μέγιστη ριπή ανέμου, το πλήθος κεραυνών, η απόσταση κεραυνών καθώς και η κλίση.

Η ηλιακή ακτινοβολία μετρήθηκε με τη χρήση πυρανόμετρου που είναι ενσωματωμένο στο χείλος του βροχογράφου στην κορυφή του ATMOS 41. Ο σταθμός ξεκίνησε να λειτουργεί από τις 9 Ιουλίου 2019, ωστόσο, λόγω τεχνικών ζητημάτων, τα αρχεία παρουσιάζουν ελλείψεις σε κάποιες ώρες ή ημερομηνίες. Όλα τα στοιχεία του καταγραφέα δεδομένων μεταφέρονται σε μια βάση δεδομένων, από την οποία μπορούν να αποσπαστούν και να αντιγραφούν σε αρχεία, όπως σε υπολογιστικά φύλλα excel. Όλα τα δεδομένα μετρούνται ανά δεκάλεπτα διαστήματα για μια σειρά 24 ωρών.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν από τον σταθμό είναι η θερμοκρασία του αέρα (T_{air}), η σχετική υγρασία (RH), η ταχύτητα αέρα (U_{air}) και η ηλιακή ακτινοβολία (R_n). Αυτά τα μετεωρολογικά δεδομένα συγκεντρώθηκαν, μεμονωμένα, σε φύλλα excel και επεξεργάστηκαν κατάλληλα. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι μέσες, οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές κάθε μεταβλητής σε ημερήσια κλίμακα. Συγκεκριμένα, για την εύρεση της μέσης τιμής, χρησιμοποιήθηκε η εντολή AVERAGE, η οποία εκτελεί την παρακάτω λειτουργία:

$$X_{avg} = \frac{\sum X_i}{\sum i}$$

Όπου, X: T_{air} , U_{air} , RH, R_n και i: ο αριθμός των δεδομένων για κάθε μεταβλητή. Το μέγιστο και το ελάχιστο κάθε μεταβλητής βρέθηκαν με την εντολή MAX και MIN, αντίστοιχα.

Επιπρόσθετα, οι μονάδες του όρου R_n , μετατράπηκαν από W/m^2 σε MJ/m^2d , με $1W/m^2 = 0,0864 MJ/m^2d$.

3.3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΣ

Η υγρασία του εδάφους μετρήθηκε με χρήση υγρασιόμετρων SM1 (SM1 ADCON TELEMETRY). Η καταγραφή έγινε από τα 10 cm έως και τα 90 cm κάτω από το έδαφος, με βήμα 10 λεπτών. Τα υγρασιόμετρα αυτά, αποτελούν αισθητήρες χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, με μεγάλο πεδίο επιρροής σε σχέση με άλλους αισθητήρες, καθώς εκτείνονται πέρα από μια ακτίνα 10 cm γύρω από το σωλήνα πρόσβασης. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του κατασκευαστή, η ανάλυση ενός τέτοιου αισθητήρα είναι 0.1% και έχει ακρίβεια μέτρησης $\pm 2\%$.

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, τα αβοκάντο αρδεύονται με τη μέθοδο της «στάγδην άρδευσης». Ειδικότερα, η διανομή νερού έρχεται με κυκλική διάταξη, γύρω από τον κορμό κάθε δέντρου. Η κυκλική επιφάνεια που καλύπτει η διάταξη έχει ακτίνα 2 m, αλλά τα αποτελέσματα των μετρήσεων του υγρασιόμετρου, μας υποδεικνύουν μια περιοχή επιρροής άρδευσης ακτίνας 1,3 m. Επομένως, συμπεριλαμβάνοντας την ακτίνα του κορμού του δέντρου, χρησιμοποιήθηκε διάμετρος ίση με 3 m για τους υπολογισμούς μας.

Τα δεδομένα εδαφικής υγρασίας, που αναλύονται, είναι σε μορφή ποσοστού και επεξεργάζονται σε συγκεντρωτικό πίνακα (pivot table), ώστε να έχουμε τις μέσες τιμές για κάθε ώρα της ημέρας. Οι τιμές αυτές συγκεντρώνονται σε διαφορετικό φύλλο excel, όπου επεξεργάζονται περαιτέρω και μετατρέπονται σε m^3 με την παρακάτω σχέση:

$$S_t = \theta_i \cdot z_i \cdot A$$

Όπου:

- ♦ θ_i , ποσοστιαίες τιμές εδαφικής υγρασίας
- ♦ $z_i = 0,15 \text{ m}$, βάθος (m)
- ♦ A , επιφάνεια επιρροής άρδευσης (m^2)

Αυτές οι τιμές αθροίζονται και υπολογίζεται το σύνολο της υγρασίας του εδάφους για κάθε ώρα. Τέλος, υπολογίζεται η μεταβολή του όγκου αποθήκευσης του νερού (ΔS), από τη διαφορά των αρχικών και τελικών μετρήσεων υγρασίας πριν ξεκινήσουν δύο διαδοχικές αρδεύσεις. Η παρακάτω σχέση εκφράζει αυτή την εργασία:

$$\Delta S = S(t + dt) - S(t)$$

3.4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ Q_{irr} .

Ο όγκος νερού που χρησιμοποιείται για την άρδευση της καλλιέργειας, μετρήθηκε με τη χρήση υδρόμετρου. Κάθε φορά ποτίσματος, καταγραφόταν η αρχική ένδειξη του οργάνου, πριν το πότισμα και έπειτα, η τελική ένδειξη, μετά το πότισμα. Στη συνέχεια, για να βρεθεί ο όγκος άρδευσης, λαμβάνεται η διαφορά της τελικής με την αρχική ένδειξη. Τέλος, αφού εξεταστεί κάθε δέντρο ξεχωριστά και όχι όλη η καλλιέργεια στο σύνολό της, διαιρέθηκε η τιμή που προέκυψε από τη διαφορά, με τον αριθμό των δέντρων της καλλιέργειας (25 δέντρα).

3.5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ Q_{perc} .

Προκειμένου να εκτιμηθεί το όγκος διήθησης χρησιμοποιήθηκαν δύο τακτικές. Ο ένας τρόπος ήταν η χρήση της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου:

$$\Delta S = Q_{irr} - ET - Q_{perc}.$$

Ο δεύτερος είναι η χρήση του μοντέλου HYDRUS-1D και μέσω αυτού την εξίσωση Richards για την κορεσμένη και μη-κορεσμένη ροή του νερού.

Έχοντας ήδη υπολογίσει όλους τους υπόλοιπους όρους, ο μόνος άγνωστος είναι ο αυτός του όγκου διήθησης.

3.6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ GPP

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, η ακαθάριστη πρωτογενής παραγωγή (GPP) υπολογίστηκε με βάση το μοντέλο που προτάθηκε από τον Monteith. Μοντέλο, δηλαδή, αποδοτικότητας χρήσης φωτός. Παρακάτω παρουσιάζεται ξανά η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε:

$$GPP = LUE \times fAPAR_{PNS} \times PAR$$

Οι μονάδες μέτρησης του GPP είναι $\text{g CO}_2/\text{m}^2\text{d}$.

3.6.1. ΕΚΤΙΜΗΣΗ LUE

Ο όρος της αποδοτικότητας χρήσης φωτός, LUE, βρέθηκε χρησιμοποιώντας τον δείκτη PRI με την παρακάτω εξίσωση [Trotter et al., 2001]:

$$LUE = -0.08 \times PRI + 0.008$$

Τα δεδομένα για τον δείκτη PRI συγκεντρώθηκαν από τους αισθητήρες φασματικής ανάκλασης SRS-PRI και SRS-NDVI (SRS Spectral Reflectance Sensor, METER Group) που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της δραστηριότητας της βλάστησης. Οι αισθητήρες έχουν ακρίβεια 10%.

Κάθε τύπος αισθητήρα διατίθεται σε δυο διαφορετικές διαμορφώσεις. Οι ημισφαιρικοί αισθητήρες διαθέτουν μια PTFE (polytetrafluoroethylene) μεμβράνη οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί για να είναι στραμμένοι προς τον ουρανό ώστε να μετρούν την εισερχόμενη ακτινοβολία σε κάθε εύρος μήκος κύματος για τη συγκεκριμένο δείκτη. Οι αισθητήρες που βλέπουν προς τα κάτω έχουν περιορισμένο οπτικό πεδίο 36° ώστε να εστιάζουν πάνω στο δέντρο. Η εικονική και η πραγματική αναπαράσταση του εξοπλισμού παρουσιάζεται στην εικόνα 3.2..

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση αυτή αφορούν τα έτη 2019 έως και 2022 (5/11/2019 έως και 26/10/2022).



Εικόνα 3.2. Γραφική και πραγματική αναπαράσταση των αισθητήρων φασματικής ανάκλασης [SRS manual]

Τα δεδομένα από τους αισθητήρες καταγράφονται στον τηλεμετρικό σταθμό, με βήμα 10 λεπτών και αποστέλλονται σε μια βάση δεδομένων για αποθήκευση. Έπειτα, επεξεργάζονται σε υπολογιστικά φύλλα του excel, με σκοπό να συγκεντρωθούν οι ημερήσιες μέσες τιμές του δείκτη. Συγκεκριμένα, οι τιμές για κάθε δέκα λεπτά επεξεργάζονται με τη χρήση των συναρτήσεων σύνοψης του συγκεντρωτικού πίνακα (pivot table), όπου και μεταποιούνται σε ημερήσιες τιμές. Τα μήκη κύματος που μας ενδιαφέρουν είναι το 531 (μήκος κύματος όπου λαμβάνουμε το σήμα της χρωστικής ζεαξανθίνη) και το 570 nm (μήκος κύματος-αναφορά). Στην παρακάτω εξίσωση, η αντικατάσταση γίνεται τοποθετώντας τα ημερήσια δεδομένα για κάθε μήκος φάσματος που συγκεντρώθηκαν από τον συγκεντρωτικό πίνακα, ώστε να υπολογιστεί η τελική ημερήσια τιμή του PRI:

$$PRI = \frac{Pr_{532}/Pi_{532} - Pr_{570}/Pi_{570}}{Pr_{532}/Pi_{532} + Pr_{570}/Pi_{570}}$$

Η μονάδα μέτρησης του LUE είναι mol CO₂/ mol φωτονίων.

3.6.2. ΕΚΤΙΜΗΣΗ fAPAR

Ο όρος του κλάσματος της απορροφώμενης ενεργής ακτινοβολίας (fAPAR), υπολογίστηκε συναρτήσει του δείκτη NDVI, μέσω της παρακάτω εξίσωσης [Ruimy et al., 1994]:

$$fPAR = 1,25 \times NDVI - 0,1$$

Η διαδικασία συλλογής δεδομένων για τον υπολογισμό του δείκτη είναι ίδια με αυτή για τον PRI. Χρησιμοποιούμε τους ίδιους αισθητήρες και τα δεδομένα αποθηκεύονται και επεξεργάζονται, αντίστοιχα. Σε αυτή την περίπτωση, τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται είναι τα 630 nm και 800 nm. Χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση, προκύπτουν οι ημερήσιες τιμές που χρησιμοποιούμε για το NDVI.

$$NDVI = \frac{Nr_{800}/Ni_{800} - Nr_{630}/Ni_{630}}{Nr_{800}/Ni_{800} + Nr_{630}/Ni_{630}}$$

Ο όρος είναι αδιάστατος.

3.6.3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ PAR

Ο όρος της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας, PAR, υπολογίστηκε μέσω της παρακάτω εμπειρικής σχέσης [Zempila et al., 2016]:

$$PAR = 0.457 \times GHI - 7,424$$

η οποία την συνδέει με την παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία, GHI, της οποίας τα δεδομένα συγκεντρώνονται από πυρανόμετρο, ενσωματωμένο στο μετεωρολογικό σταθμό, ATMOS 41, METER Group, κάθε 5 λεπτά. Στη συνέχεια, τα δεδομένα επεξεργάζονται σε συγκεντρωτικό πίνακα, προκειμένου να ληφθούν οι μέσες ημερήσιες τιμές.

Η μονάδα μέτρησης του PAR, από την παραπάνω σχέση, ήταν W/m²s και μετατράπηκε σε mmol/m²s, για να αντικατασταθεί στη σχέση (1 W/m²s αντιστοιχεί σε 4,57 mmol/m²s).

3.7. ΕΚΤΙΜΗΣΗ WUE

Ο υπολογισμός της αποτελεσματικότητας χρήσης νερού έγινε με τη χρήση της σχέσης των Briggs και Shantz (1913):

$$WUE = \frac{GPP}{ET}$$

Στις παραπάνω ενότητες αναλύθηκαν οι όροι GPP και ET και εδώ χρησιμοποιήθηκαν οι ημερήσιες τιμές τους, οι οποίες είχαν προϋπολογιστεί.

3.8. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΓΚΟΥ ΔΙΗΘΗΣΗΣ ΜΕ ΤΟ HYDRUS-1D

Τα αποτελέσματα που μας δίνει το μοντέλο προκειμένου να υπολογίσουμε τον όγκο διήθησης ονομάζονται bottom fluxes (υπόγειες ροές). Καθώς η χρονική περίοδος που αναλύουμε για κάθε χρονιά είναι τέσσερις μέρες, το μοντέλο εξάγει bottom fluxes για 96 βήματα ($t=4d=96h$), με την παρακάτω μορφή:

```
Welcome to HYDRUS-1D
Date:  7. 2.      Time:  15:15:49
Units: L = m      , T = hours, M = mol
```

Time	[T]	0.0010			
Sub-region num.		1	2	3	
10					
Length	[L]	0.90000E+00	0.90000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
W-volume	[L]	0.18000E+00	0.18000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
In-flow	[L/T]	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
h Mean	[L]	-0.17804E+03	-0.17804E+03	0.00000E+00	0.00000E+00
HeatVol	[M/T2]	0.66006E+16	0.66006E+16	0.00000E+00	0.00000E+00
tMean	[K]	20.000	20.000	0.000	0.000
ConcVol	[M/L2] 1	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
cMean	[M/L3] 1	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
Top Flux	[L/T]	-0.27237E-04			
Bot Flux	[L/T]	-0.27237E-04			

Εικόνα 3.3.: Bottom flux (υπογραμμισμένο) τη στιγμή 0,001, στους υπολογισμούς του 2020 [HYDRUS-1D].

Γίνεται πρόσθεση όλων των bottom fluxes, το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με την επιφάνεια και έπειτα, διαιρείται με το σύνολο των ημερών που εξετάζονται (4 ημέρες) με σκοπό να δημιουργηθεί μια εικόνα για την κάθε μια μέρα ξεχωριστά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα του πειράματος αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο και συμπεριλαμβάνουν διαγράμματα των δεικτών βλάστησης, των όρων του υδατικού ισοζυγίου και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με αυτών του ισοζυγίου.

4.1. ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ

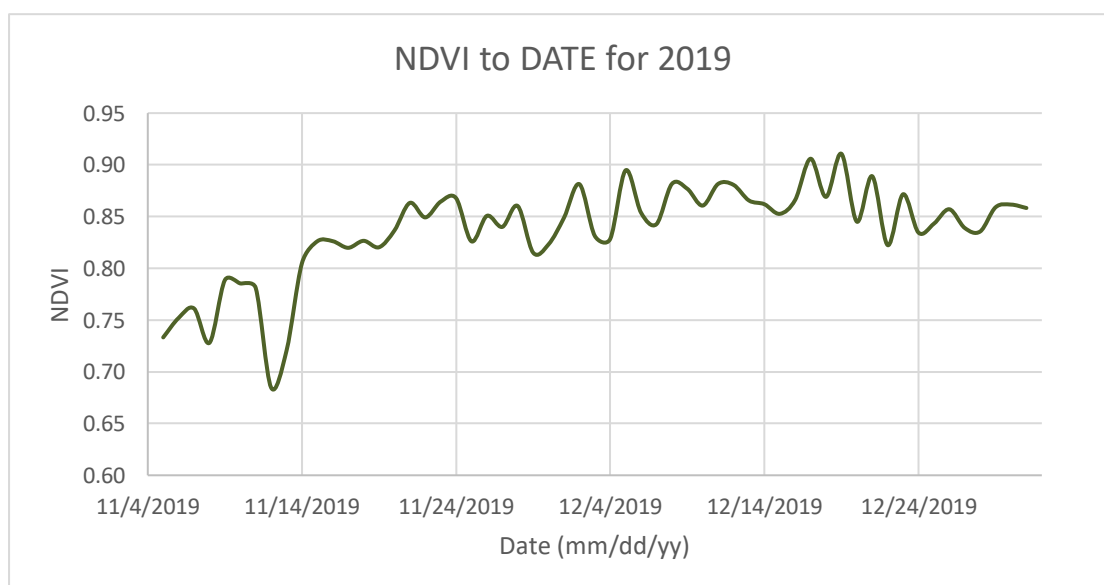
4.1.1. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ NDVI

Όπως ήδη έχει αναλυθεί, με τη βοήθεια του δείκτη NDVI μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την κατάσταση μιας καλλιέργειας. Μπορούμε να αποφανθούμε για την ποιότητα αλλά και την ποσότητα της φυτοκάλυψης και να ταυτοποιήσουμε

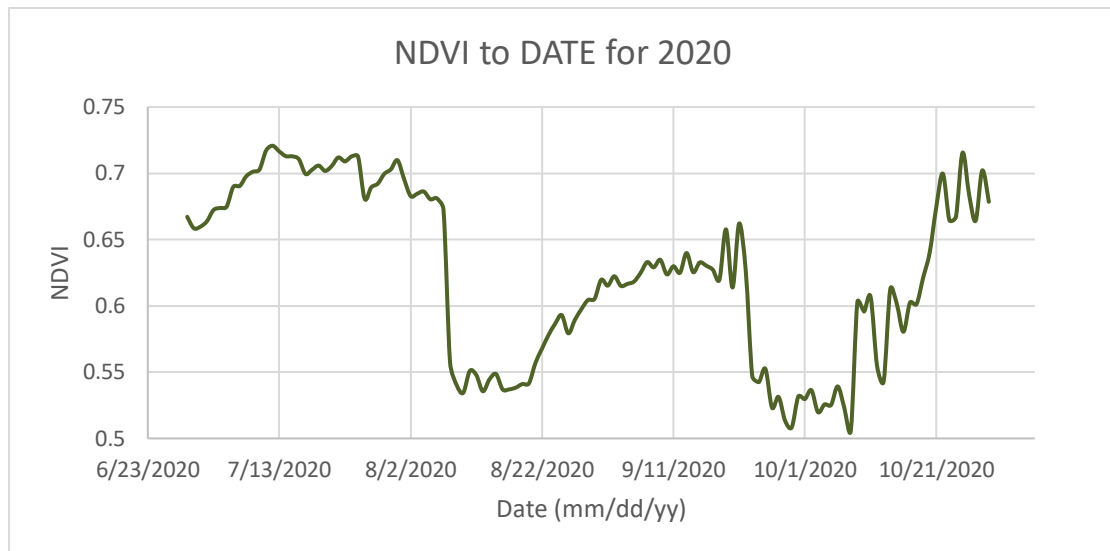
περιοχές που έχουν υποστεί στρες ή ζημιά. Σύμφωνα με το USDA (United States Department of Agriculture), οι τιμές του NDVI κυμαίνονται από -1 έως 1. Όταν συναντάμε τιμές θετικές και κοντά στο μηδέν, κάνουμε λόγο για περιοχή η οποία δεν έχει βλάστηση, αντιθέτως όταν οι τιμές βρίσκονται στα 0,1 με 0,5 αναφερόμαστε σε αραιά βλάστηση και τέλος, όταν έχουμε τιμές άνω των 0,6, η βλάστηση είναι πυκνή και πράσινη.

Τα παρακάτω γραφήματα απεικονίζουν τη διακύμανση των τιμών του δείκτη ανά τις ημέρες για τρεις συνεχόμενες χρονιές, 2019 (Γράφημα 4.1.), 2020 (Γράφημα 4.2.) και 2021 (Γράφημα 4.3.). Αυτού του είδους τα γραφήματα μας βοηθούν να εκτιμήσουμε το στάδιο στο οποίο βρίσκεται η καλλιέργεια ή την περίοδο ανάπτυξης της, αλλά και να επισημάνουμε την περίοδο ξηρασίας ή αυτήν κατά την οποία η καλλιέργεια υπέστη πίεση από έλλειψη νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάπτυξης. Γενικότερα, για τις περισσότερες κλιματικές περιοχές, αυξανόμενες τιμές του δείκτη υποδεικνύουν περίοδο ανάπτυξης της καλλιέργειας, ενώ οι μέγιστες τιμές του δείκτη αντιπροσωπεύουν είτε το τέλος της ανάπτυξης ή την αρχή του σταδίου της άνθισης.

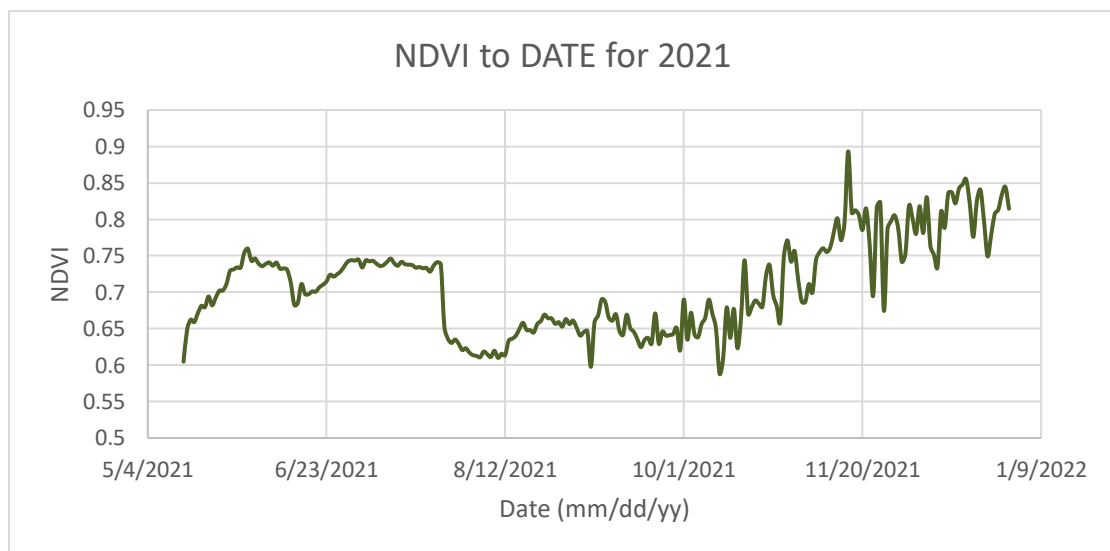
Απουσιάζουν τα απαραίτητα δεδομένα για το 2022, γι' αυτό και δεν έχει συμπεριληφθεί το διάγραμμα της χρονιάς αυτής. Ακόμα, το 2019 διαθέτουμε δεδομένα μονάχα για δυο μήνες, επομένως τα αποτελέσματα για αυτή τη χρονιά δεν είναι τόσο αντιπροσωπευτικά, όσο για τις υπόλοιπες χρονιές.



Γράφημα 4.1. Δείκτης NDVI σε σχέση με το χρόνο (05/11/2019-31/12/2019).



Γράφημα 4.2. Δείκτης NDVI σε σχέση με το χρόνο (18/06/2020 - 05/11/2020).



Γράφημα 4.3. Δείκτης NDVI σε σχέση με το χρόνο (01/05/2021 - 31/12/2021).

Οι τιμές του δείκτη για το 2019 κυμαίνονται από 0,68 έως και 0,91 με μέσο όρο 0,84.

Για το 2020 το NDVI βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές 0,51 έως 0,72, με μέσο όρο 0,62.

Τέλος, το 2021, ανάμεσα στις 0,59 έως και 0,89, με μέσο όρο 0,71.

Οι τιμές αυτές υποδεικνύουν έντονη και υγιή βλάστηση και πλήρη ανάπτυξη της καλλιέργειας, καθώς ο μέσος όρος, για κάθε χρονιά, βρίσκεται πάνω από το 0,6. Ωστόσο το 2020 παρατηρούμε πως κυρίως τον Αύγουστο και το Σεπτέμβριο έχουμε μια πτώση κάτω του ορίου των 0,6, χωρίς αυτό να μεταφράζεται απαραίτητα σε κακή συνθήκη της βλάστησης, αφού ούτως ή άλλως οι τιμές παραμένουν σε ένα καλό επίπεδο, άνω του 0,5. Αυτή η μικρή πτώση, είναι πολύ πιθανό να μας υποδεικνύει μια σύντομη περίοδο στρες, η οποία μάλλον οφείλεται στα συμβάντα υπερ-άρδευσης που συνέβησαν εκείνες τις περιόδους.

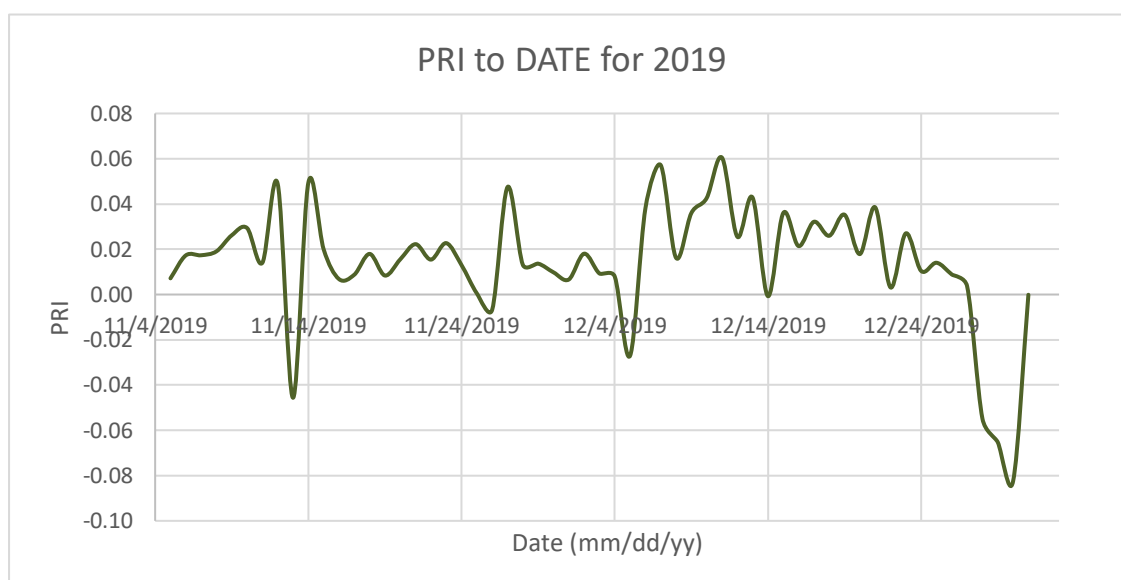
Τέλος, είναι σημαντικό να ελέγχουμε πόσο καιρό οι τιμές του δείκτη βρίσκονται κάτω από τον μέσο όρο κατά την περίοδο ανάπτυξης, καθώς και αν οι ξηρές αυτές περιόδους συνέβησαν κατά τη διάρκεια κριτικών σταδίων της καλλιέργειας, όπως τα στάδια

άνθισης ή αρχικής ωρίμανσης, για τα οποία επανειλημμένες περίοδοι ξηρασίας, μπορούν να επιβραδύνουν την απόδοση της καλλιέργειας.

4.1.2. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ PRI

Ο δείκτης χρησιμοποιείται συμπληρωματικά με τον NDVI, μόνο που τώρα βλέπουμε την κατάσταση της καλλιέργειας σε μικρότερη κλίμακα, καθώς εξετάζεται το μεμονωμένο φύλλο. Μετράει κυρίως την αποδοτικότητα χρήσης φωτός από το φύλλωμα, επομένως μας παρέχονται πληροφορίες για την πρόσληψη διοξειδίου του άνθρακα από τη βλάστηση αλλά και για την ύπαρξη υδατικού στρες, όπως και στην περίπτωση του NDVI.

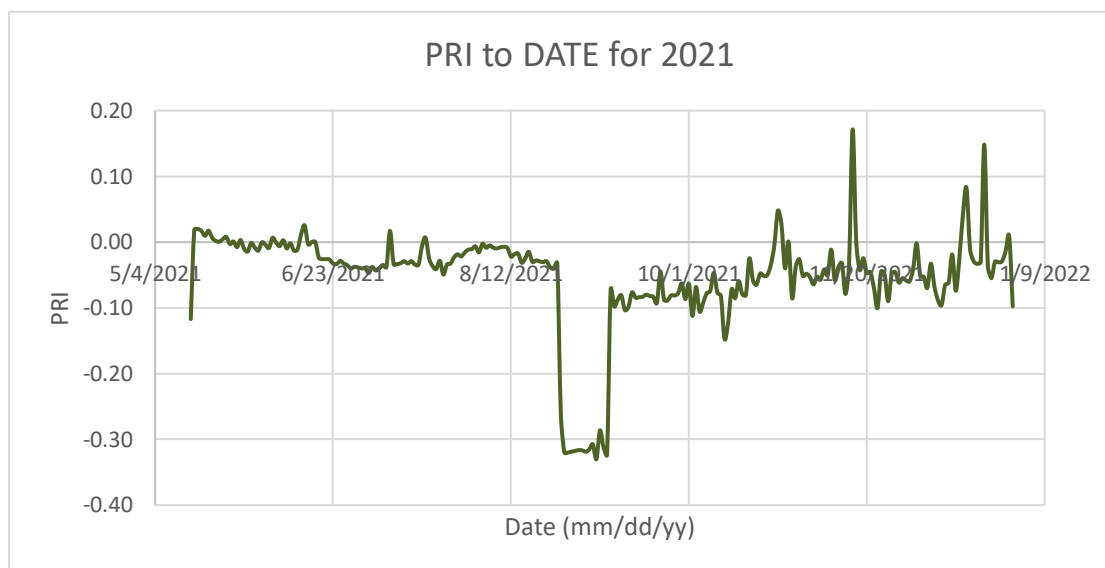
Το εύρος τιμών για το PRI βρίσκεται, όπως και για το NDVI, στα -1 έως και 1. Συνήθως για πράσινη βλάστηση οι τιμές κυμαίνονται στα -0,2 έως 0,2. Τα παρακάτω γραφήματα αναφέρονται στις χρονιές 2019 (Γράφημα 4.4.), 2020 (Γράφημα 4.5.) και 2021 (Γράφημα 4.6.), ενώ η χρονιά 2022 παραλείπεται λόγω έλλειψης δεδομένων.



Γράφημα 4.4. Δείκτης PRI σε σχέση με το χρόνο (05/11/2019 - 31/12/2019).



Γράφημα 4.5. Δείκτης PRI σε σχέση με το χρόνο (15/05/2020 - 29/10/2020).



Γράφημα 4.6. Δείκτης PRI σε σχέση με το χρόνο (14/05/2021 - 31/12/2021).

Βλέπουμε πως οι τιμές κυμαίνονται από -0,08 έως και 0,06 για το 2019. Πάλι σε αυτήν την περίπτωση τα δεδομένα που έχουμε για το 2019 δεν είναι αρκετά και επομένως όχι ιδιαίτερα αντιπροσωπευτικά, πάραυτα οι τιμές βρίσκονται μέσα στο εύρος των -0,2 έως 0,2.

Το 2020 η χαμηλότερη τιμή καταγράφεται στα -0,07 και η μεγαλύτερη στα 0,19, τιμές που παραμένουν εντός του συνήθους εύρους.

Τέλος, το 2021 η υψηλότερη τιμή δεν ξεπερνά το συνήθες όριο με 0,17, αλλά βλέπουμε πως ξεπερνά το -0,2 με τη τιμή -0,33, η οποία ενώ είναι στα γενικότερα επιθυμητά όρια, είναι αρκετά παράταιρη σε σχέση με τις υπόλοιπες. Από τη γενικότερη εικόνα όμως, διακρίνουμε μια ομαλή διακύμανση.

4.2. ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ GPP

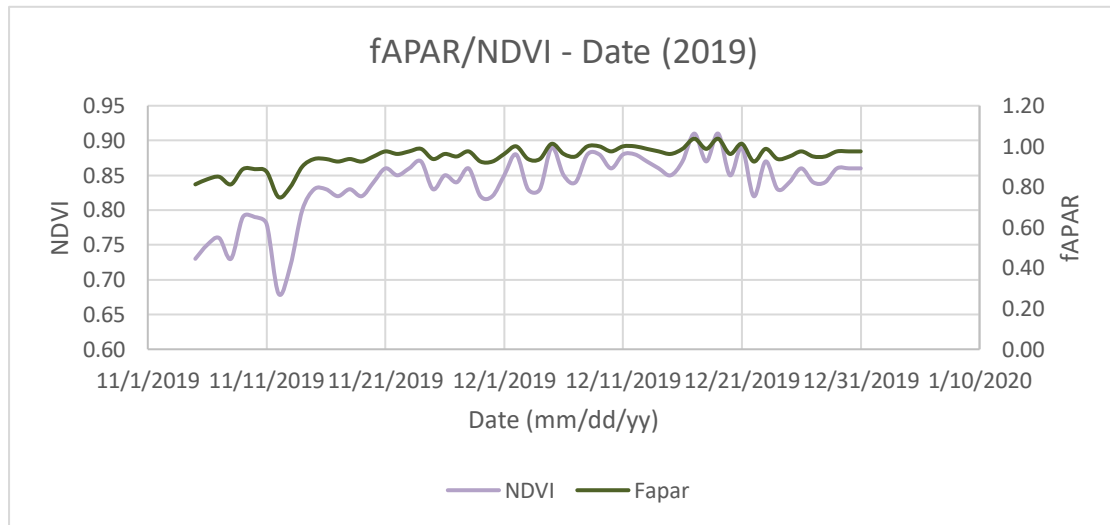
Σε αυτή την ενότητα, παρατίθενται τα διαγράμματα διακύμανσης των μεταβλητών της εξίσωσης, που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό της ακαθάριστης πρωτογενούς παραγωγικότητας, fAPAR και LUE. Καθώς οι δυο αυτές μεταβλητές υπολογίζονται μέσω των δεικτών βλάστησης, στα γραφήματα απεικονίζεται παράλληλα η διακύμανση τους.

4.2.1. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ fAPAR

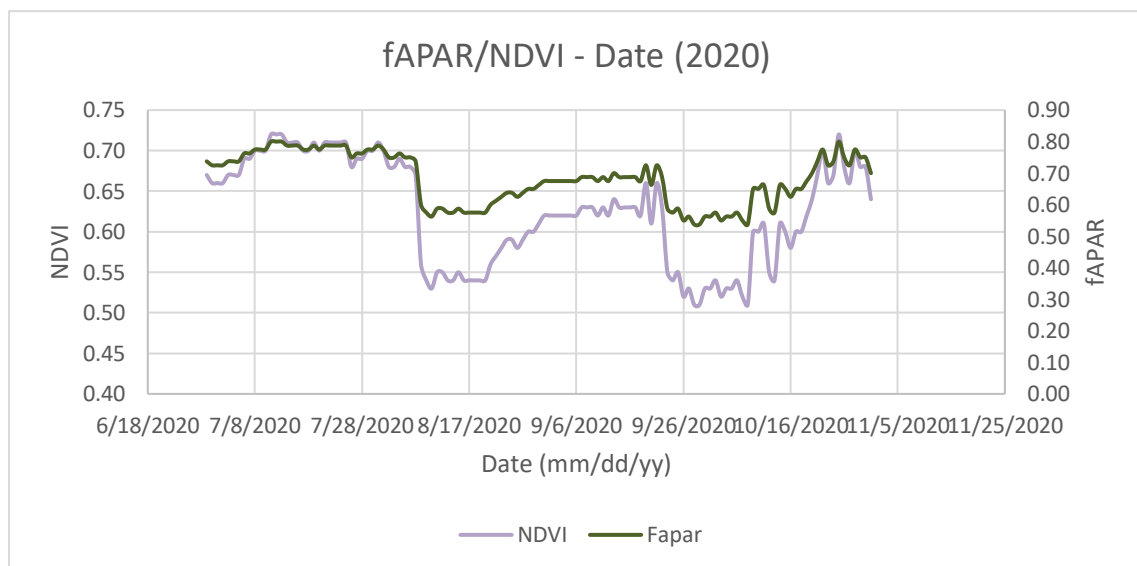
Το κλάσμα της απορροφώμενης ενεργής ακτινοβολίας fAPAR συνιστά έναν από τους δείκτες της κατάστασης του φυλλώματος του φυτού. Η fAPAR ενός δεδομένου φυλλώματος συνδέεται με την ανάπτυξη αυτού και συγκεκριμένα, την αρχιτεκτονική του φυλλώματος αλλά και το LAI. Μάλιστα, το LAI είναι ένας παράγοντας στη σχέση μεταξύ του NDVI και της fAPAR. Όταν οι τιμές του είναι μεγαλύτερες του 3, επηρεάζει τη γραμμικότητα της σχέσης τους.

Από τα παρακάτω γραφήματα (4.7., 4.8., 4.9.) βλέπουμε πως η διακύμανση του fAPAR είναι παρόμοια αυτής του NDVI, με το γράφημα για το 2021 (Γράφημα 4.9.) να δείχνει εντονότερα τη γραμμικότητα της σχέσης των δύο μεταβλητών. Οι τιμές στις οποίες κυμαίνεται η μεταβλητή είναι 0,75-1,04 για το 2019, 0,54-0,80 για το 2020 και

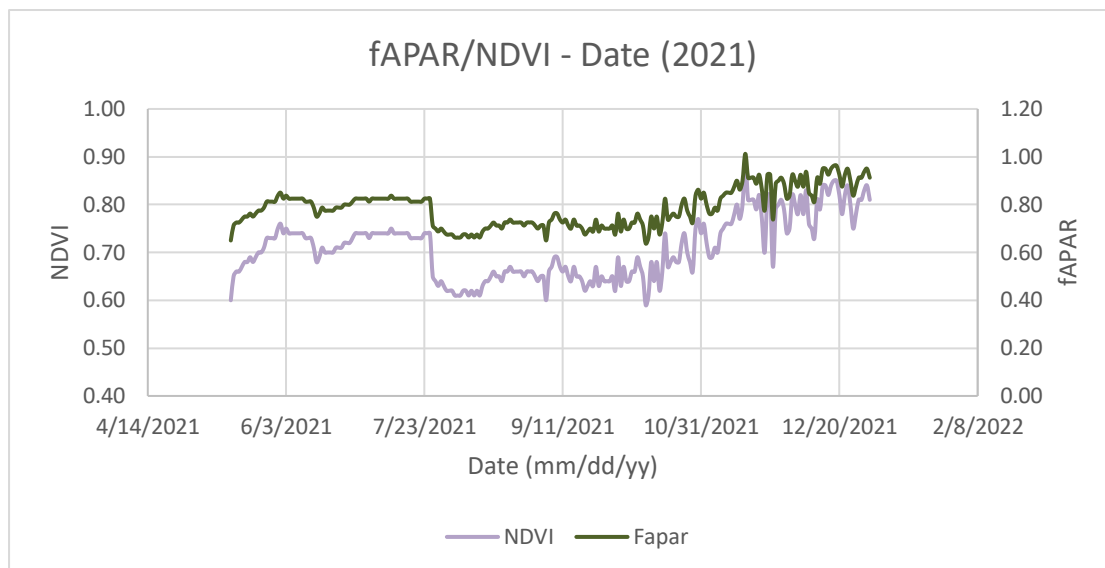
0,65-1,01 για το 2021. Γενικά είναι καλό να κυμαίνεται σε τιμές μεγαλύτερες ή ίσες του 0,8, ώστε το φυτό να θεωρείται ότι βρίσκεται σε καλή κατάσταση και βλέπουμε ότι φτάνουμε σε αυτό το εύρος, πριν και μετά την περίοδο του καλοκαιριού.



Γράφημα 4.7. fAPAR και NDVI σε σχέση με το χρόνο (05/11/2019 - 31/12/2019).



Γράφημα 4.8. fAPAR και NDVI σε σχέση με το χρόνο (29/06/2020 - 31/10/2020).

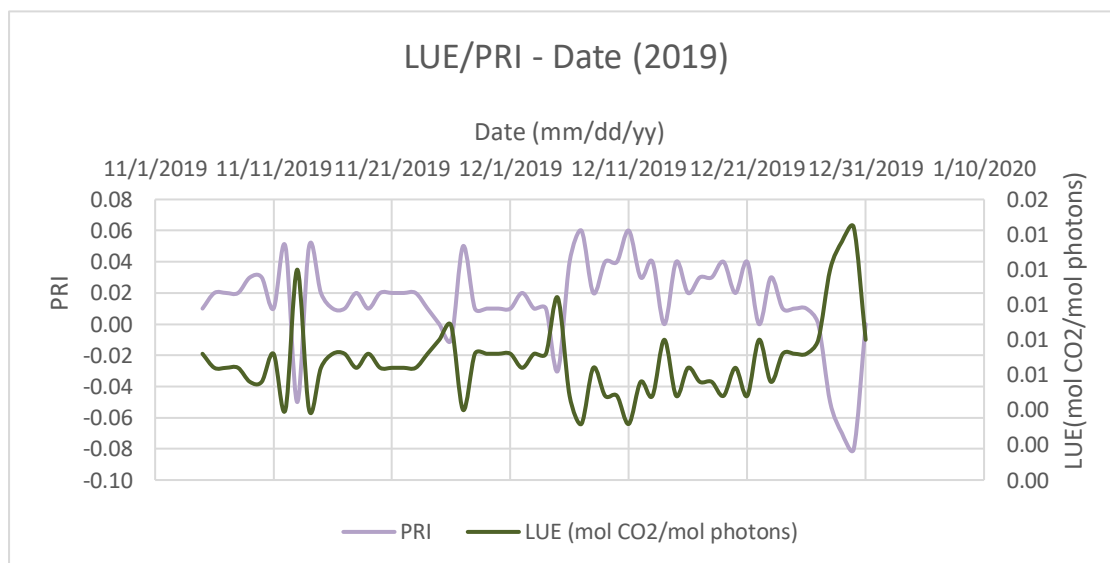


Γράφημα 4.9. fAPAR και NDVI σε σχέση με το χρόνο 14/05/2021 - 31/12/2021.

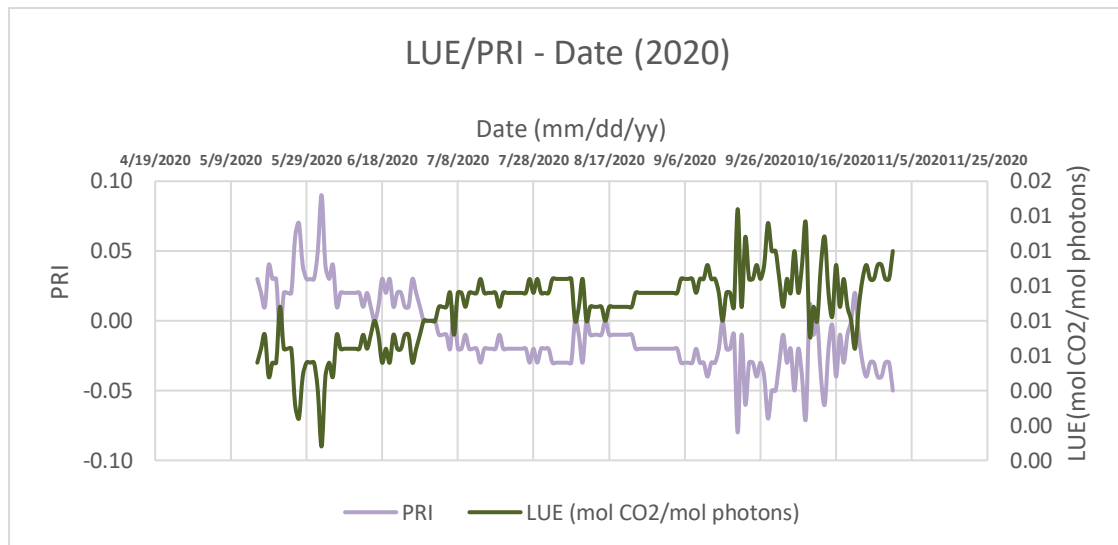
4.2.2. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ LUE

Στα παρακάτω γραφήματα (4.10., 4.11., 4.12.) καταγράφουμε τις διακυμάνσεις της LUE για τις χρονιές 2019, 2020, 2021 αντίστοιχα.

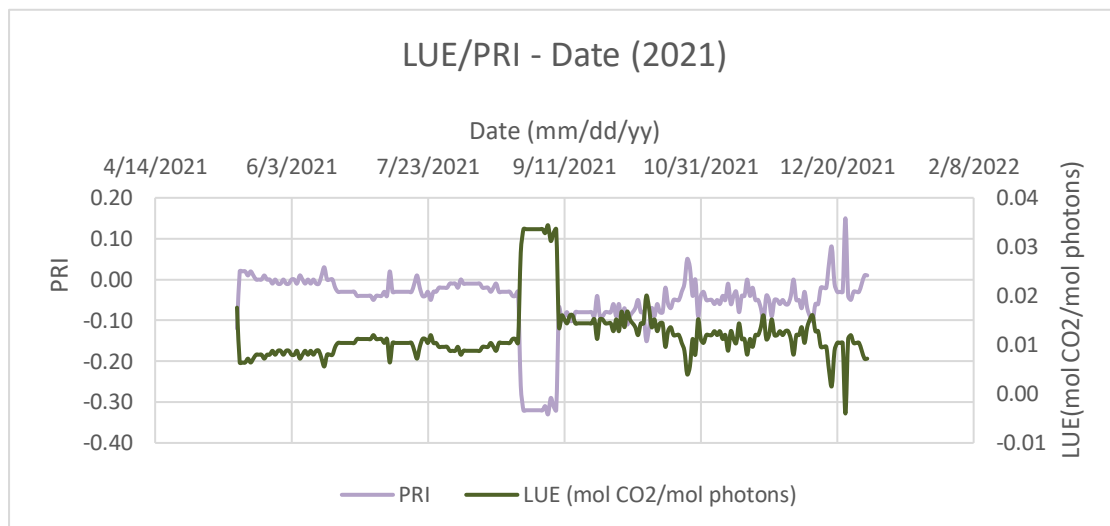
Οι τιμές του LUE κυμαίνονται μεταξύ 0,0 και 0,01 mol CO₂/mol photons για το 2019 και το 2020 και 0,0 έως 0,03 mol CO₂/mol photons για το 2021.



Γράφημα 4.10. LUE και PRI σε σχέση με το χρόνο (05/11/2019 - 31/12/2019).



Γράφημα 4.11. LUE και PRI σε σχέση με το χρόνο (16/05/2020 - 31/10/2020).



Γράφημα 4.12. LUE και PRI σε σχέση με το χρόνο (14/05/2021 - 31/12/2021).

4.3. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ GPP

Έχοντας παρατηρήσει τις μεταβολές των τιμών των δεικτών βλάστησης και των μεταβλητών fAPAR και LUE, προχωράμε στα σχήματα του GPP.

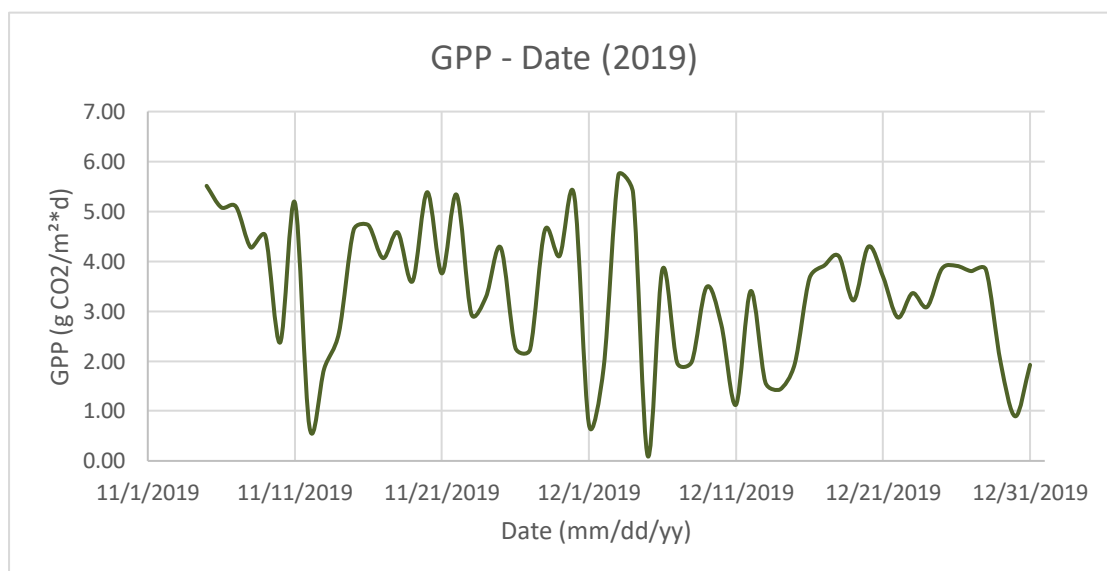
Η διακύμανση της ροής άνθρακα της καλλιέργειας παρουσιάζεται στα παρακάτω γραφήματα και αφορά τις χρονιές 2019, 2020 και 2021. Για το 2019 (Γράφημα 4.13.) έχουμε δεδομένα για 2 μήνες, αυτούς του Νοέμβρη και του Δεκέμβρη. Το 2020 (Γράφημα 4.14.) έχουμε δεδομένα για μια περίοδο 4 μηνών, δίνοντάς μας μια καλύτερη οπτική. Τέλος, για το 2021 (Γράφημα 4.15.) έχουμε τις περισσότερες πληροφορίες για το GPP, αφού διαθέτουμε δεδομένα για 7 μήνες.

Βλέπουμε πως οι τιμές του GPP είναι μεγαλύτερες κατά τους μήνες του καλοκαιριού σε σχέση με τους υπόλοιπους. Μάλιστα το 2020 η ροή του άνθρακα είχε μέγιστη τιμή 18,83 g CO₂/m²/d στα μέσα του Ιουλίου (14/07/20) και από τις αρχές του Αυγούστου μειώθηκε, παραμένοντας σχετικά σταθερή για το μήνα, έως ότου να φτάσει στο χαμηλότερο σημείο της, 1,03 g CO₂/m²/d, στα τέλη του Σεπτεμβρίου και στην πορεία να κρατήσει πάλι μια σταθερότητα, αλλά σε χαμηλότερες τιμές.

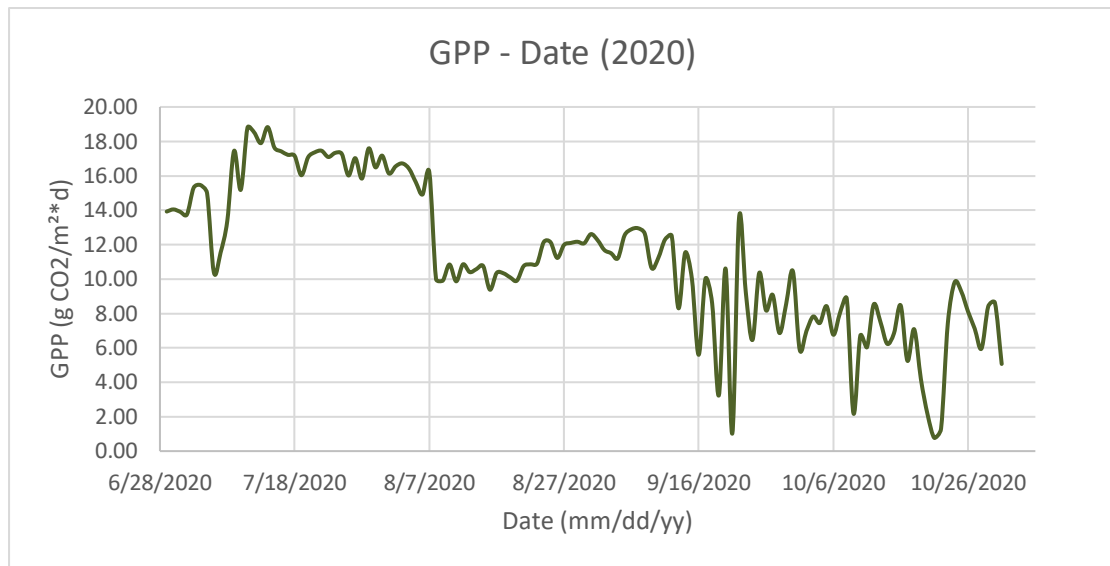
Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρούμε και για το 2021, βλέποντας όμως κάποιες μη ομαλές διακυμάνσεις. Στις αρχές του Ιουλίου παρατηρούμε την υψηλή τιμή των 28,83 g CO₂/m²/d στις 04/07/21, ενώ τον ίδιο μόλις μήνα, βλέπουμε δυο χαμηλές τιμές: συγκεκριμένα 11,00 g CO₂/m²/d και 11,02 g CO₂/m²/d στις 09/07/21 και 19/07/21, αντίστοιχα. Έπειτα, βλέπουμε ότι στα τέλη του Αυγούστου και στις αρχές του Σεπτεμβρίου έχουμε πάλι μια ανώμαλη διακύμανση, μεγαλύτερη των 40,00 g CO₂/m²/d, η οποία επιστρέφει ξανά σε πιο ομαλούς ρυθμούς. Αυτή η απότομη αύξηση καθρεφτίζει ταυτόχρονα και τα αποτελέσματα των LUE και PRI (Γράφημα 4.6. και 4.12.).

Παρατηρούμε σε κάθε περίπτωση μια εποχιακή αύξηση των τιμών της GPP, με τις μεγαλύτερες τιμές να παρουσιάζονται τον μήνα Ιούλιο. Η ροή του άνθρακα φαίνεται πως είναι μεγαλύτερη τους θερμούς μήνες του καλοκαιριού και στη συνέχεια πέφτει σε χαμηλότερες τιμές.

Οι συνολικές ποσότητες για όλο το δίμηνο του 2019 υπολογίστηκαν στα 191,91 g CO₂/m²/d. Για το τετράμηνο του 2020 υπολογίστηκαν 1406,42 g CO₂/m²/d. Τέλος, για τους επτά μήνες του 2021, υπολογίστηκαν 3046,37 g CO₂/m²/d.



Γράφημα 4.13. GPP σε σχέση με το χρόνο (05/11/2019 - 31/12/2019).



Γράφημα 4.14. GPP σε σχέση με το χρόνο (29/06/2020 - 31/10/2020).



Γράφημα 4.15. GPP σε σχέση με το χρόνο (14/05/21 - 31/12/21).

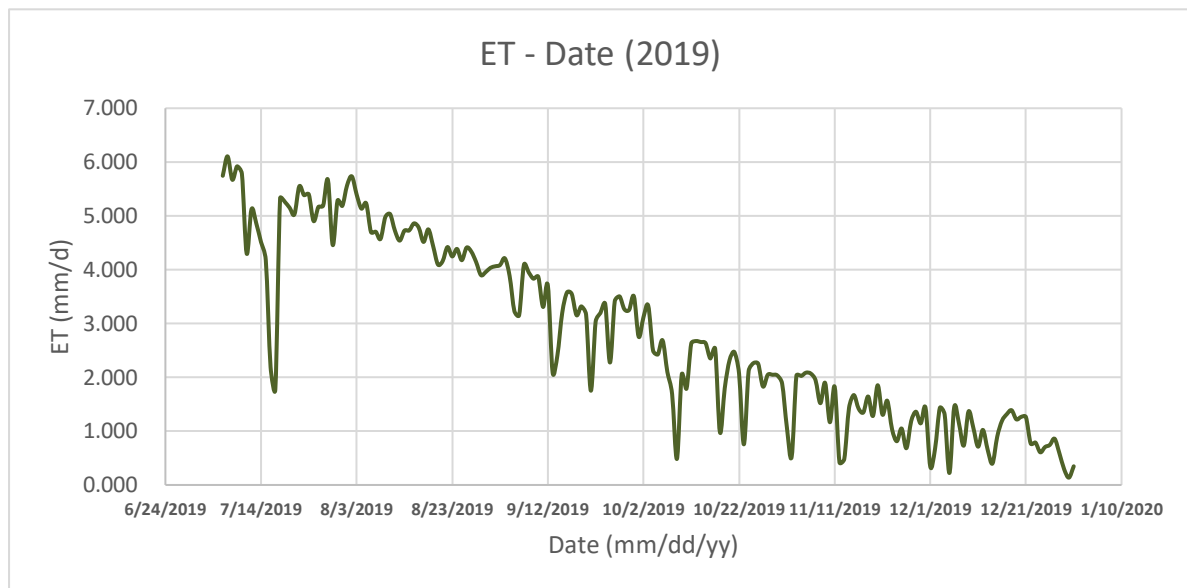
4.4. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΕΤ

Μετά τις διακυμάνσεις της ακαθάριστης πρωτογενούς παραγωγής, περνάμε σε αυτές της εξατμισοδιαπνοής. Οι δυο αυτοί όροι θα μας δώσουν την αποτελεσματικότητα χρήσης νερού, τα αποτελέσματα της οποίας απεικονίζονται στην επόμενη ενότητα.

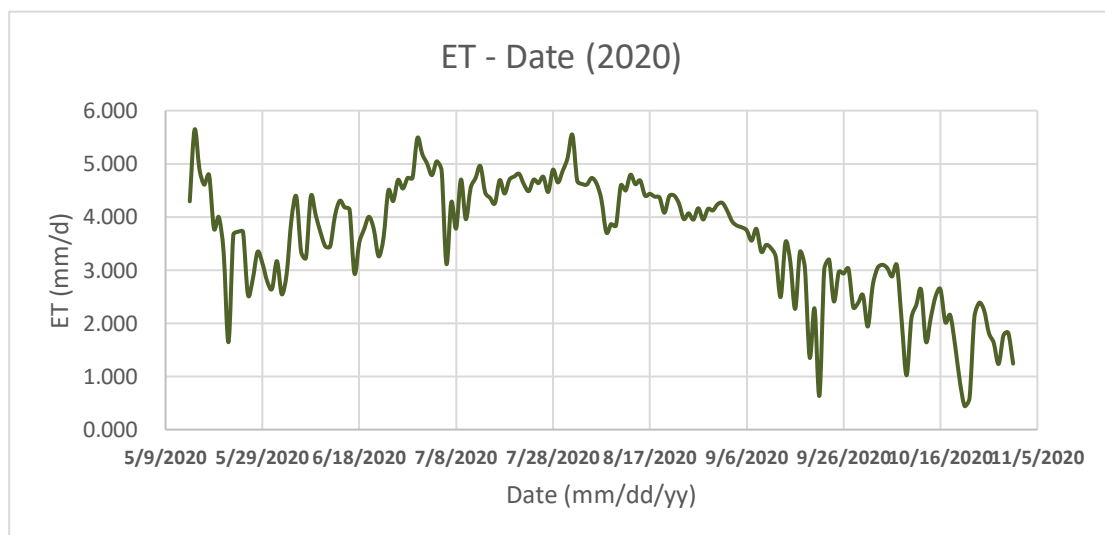
Τα παρακάτω γραφήματα μας παρέχουν πληροφορίες για την εξατμισοδιαπνοή του φυτού, όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση των Penman-Monteith. Έχουμε μια προσθήκη στις χρονιές, αφού εδώ έχουμε συμπεριλάβει και το 2022, μιας και είχαμε τις απαραίτητες πληροφορίες από τους μετεωρολογικούς σταθμούς για αυτή τη χρονιά. Η εξατμισοδιαπνοή του 2022 παρατίθεται μόνο πληροφοριακά και για σκοπούς σύγκρισης των αποτελεσμάτων των υπόλοιπων χρόνων. Δυστυχώς, δεν χρησιμοποιείται για την επόμενη ενότητα, αφού δεν διαθέτουμε το αντίστοιχο GPP.

Σε κάθε περίπτωση παρατηρούμε το ίδιο μοτίβο, αυτό των αυξανόμενων τιμών κατά τους θερινούς μήνες και την πτώση τους, τους υπόλοιπους. Οι υψηλότερες τιμές

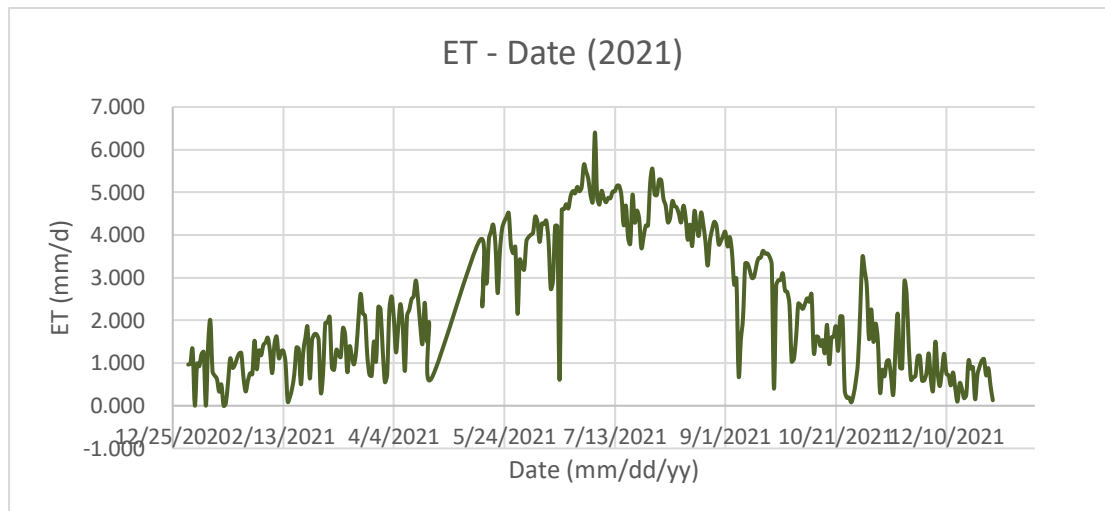
φαίνεται να σημειώνονται στα μέσα του καλοκαιριού, κατά κόρον, ενώ με την έναρξη του φθινοπώρου διακρίνεται μια πτωτική τάση.



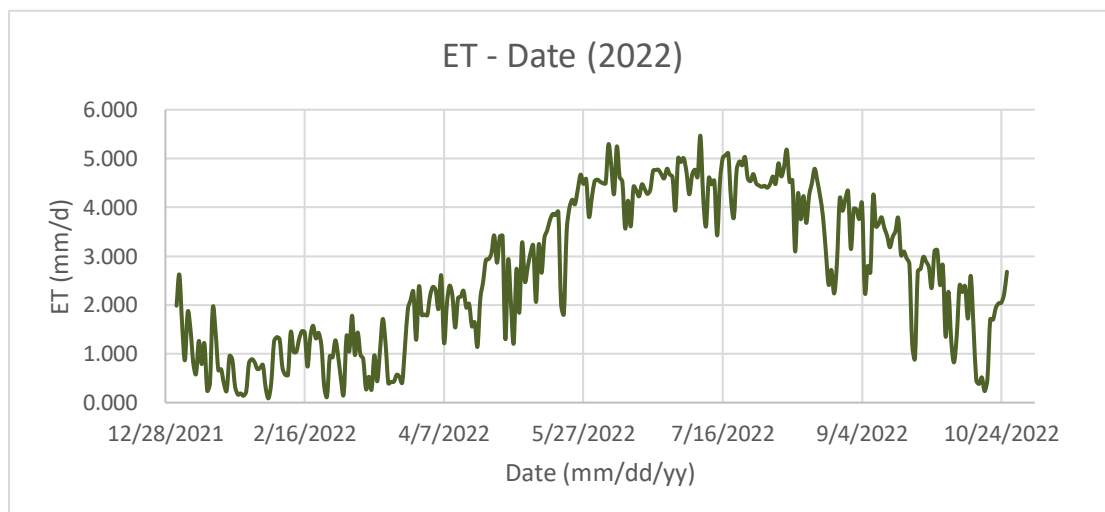
Γράφημα 4.16. ET σε σχέση με το χρόνο (06/07/2019 - 31/12/2019).



Γράφημα 4.17. ET σε σχέση με το χρόνο (14/05/2020 - 31/10/2020).



Γράφημα 4.18. ET σε σχέση με το χρόνο (01/01/2021 - 31/12/2021).



Γράφημα 4.19. ET σε σχέση με το χρόνο (01/01/2022 - 26/10/2022).

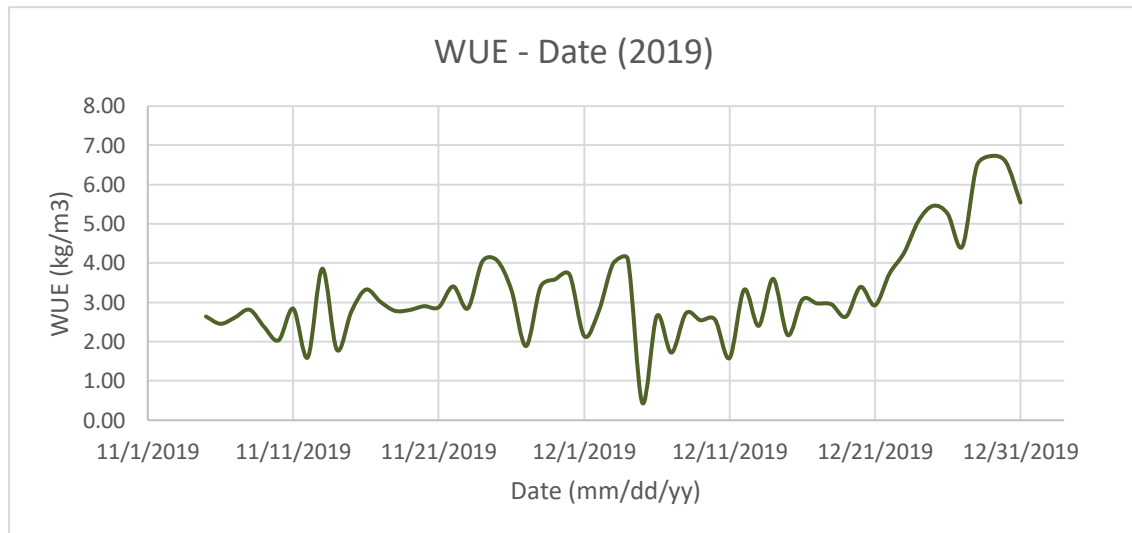
Είναι αδιαμφισβήτητο ότι τα αποτελέσματα της εξίσωσης έρχονται με αυξημένη αμφιβολία, διότι αυτή συντελείται από πολλαπλές μεταβλητές (Berg & Sheffield, 2018). Οι μετεωρολογικές μεταβλητές που συμπεριλαμβάνονται στην εξίσωση Penman-Monteith, πιθανότατα, εισάγουν συγκεκριμένες ποσότητες σφαλμάτων μέτρησης και/ή υπολογιστικών σφαλμάτων, τα οποία καταλήγουν ύστερα, σε αθροιστικά σφάλματα στην υπολογισμένη ET. Συστηματικά και/ή τυχαία σφάλματα στις μετεωρολογικές μεταβλητές, μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικά σφάλματα στο υπολογιζόμενο ET (Khoob, 2008). Για το δικό μας πείραμα, όμως, οι μικρές και αποδεκτές αποκλίσεις δεν επηρεάζουν έντονα τα τελικά αποτελέσματα, επομένως, η ποσότητα εξατμισοδιαπνοής μπορεί να υπολογιστεί επαρκώς από τις εξισώσεις του Penman-Monteith και να χρησιμοποιηθεί σε συνεργασία με την εδαφική υγρασία για να προσδιοριστούν οι απαιτήσεις άρδευσης του φυτού.

4.5. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ WUE

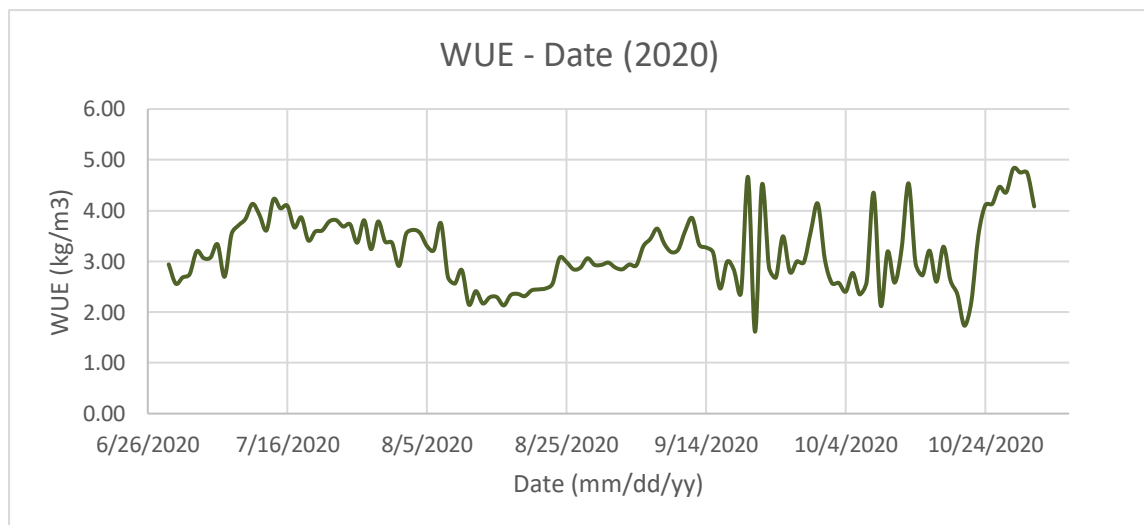
Όπως έχουμε δείξει και στο θεωρητικό υπόβαθρο, το WUE προκύπτει από το πηλίκο του GPP ως προς την ET. Επομένως, τα γραφήματα που διαθέτουμε περιλαμβάνουν μόνο τις χρονιές 2019 (Γράφημα 4.20.), 2020 (Γράφημα 4.21.) και 2021 (Γράφημα 4.22.). Στα γραφήματα βλέπουμε τις διακυμάνσεις του WUE και περιμένουμε να

δούμε μεγαλύτερες τιμές τους μήνες όπου η ET είναι χαμηλότερη αλλά και μικρότερη της GPP.

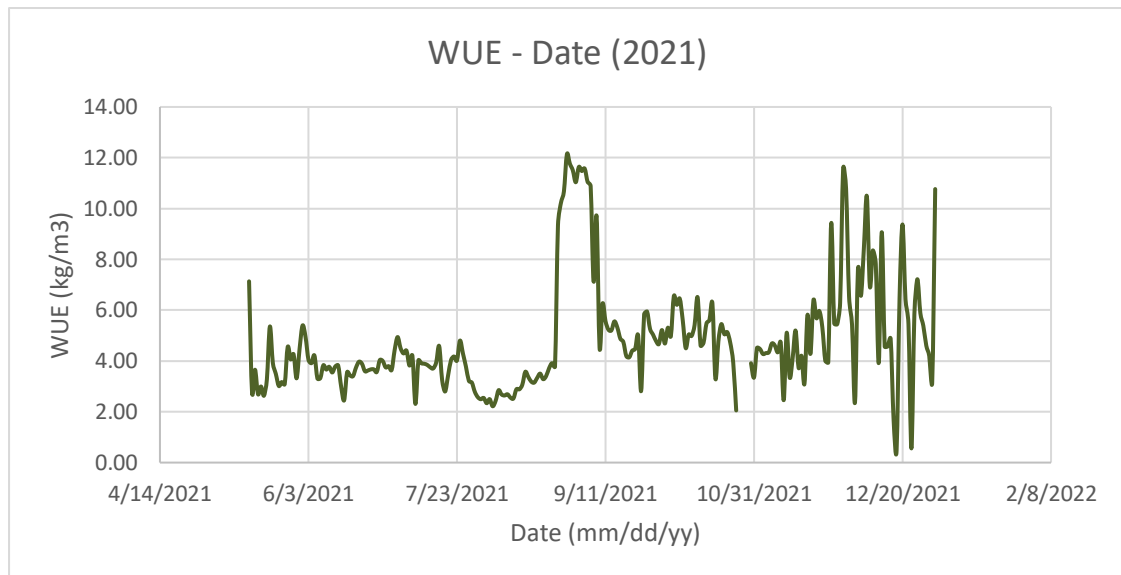
Όπως είναι επόμενο, παρατηρούμε υψηλότερες τιμές για τη WUE από τους μήνες του φθινοπώρου και έπειτα. Οι τιμές κυμαίνονται από 0,44 έως 6,73 kg/m³ για το 2019. Για το 2020, 1,61 έως 4,75 kg/m³ και για το 2021, 0,47 έως 12,13 kg/m³.



Γράφημα 4.20. WUE σε σχέση με το χρόνο (05/11/2019 - 31/12/2019).



Γράφημα 4.21. WUE σε σχέση με το χρόνο (29/06/2020 - 31/10/2020).



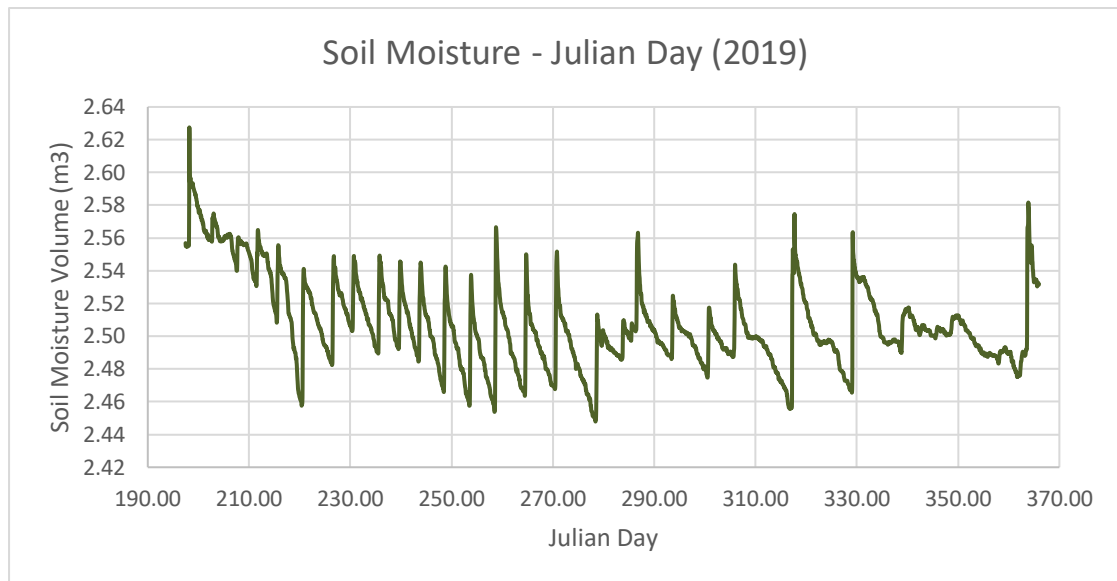
Γράφημα 4.22. WUE σε σχέση με το χρόνο (14/05/2021 - 31/12/2021).

Σε ημίξηρες περιοχές, η WUE έχει θεωρηθεί το πιο βασικό μέτρο με το οποίο συγκρίνουμε τα συστήματα και τις πρακτικές που χρησιμοποιούμε (Hatfield et al., 2001). Με τους περιορισμούς που επιτάσσει η κλιματική αλλαγή, η αύξηση του WUE χρειάζεται να εξεταστεί από δυο μέτωπα. Πρώτον, από το να είμαστε ικανοί να αναγνωρίζουμε γονότυπους φυτών, οι οποίοι έχουν μεγάλα ποσοστά αφομοίωσης, υπό καταστάσεις θερμοκρασιακού και υδατικού στρες. Δεύτερον, χρειάζεται να συνειδητοποιήσουμε, ότι υπάρχει μια πληθώρα πρακτικών διαχείρισης που μπορούμε να υιοθετήσουμε και οι οποίες θα μειώσουν την εξάτμιση του νερού από το έδαφος και θα μετατοπίσουν τη χρήση νερού της καλλιέργεια σε περισσότερη διαπνοή, για να περιοριστεί η έκθεση του φυτού σε υδατικό στρες και να διατηρηθεί η παραγωγικότητα στο υψηλότερο πιθανό επίπεδο [Hatfield and Dold, 2019].

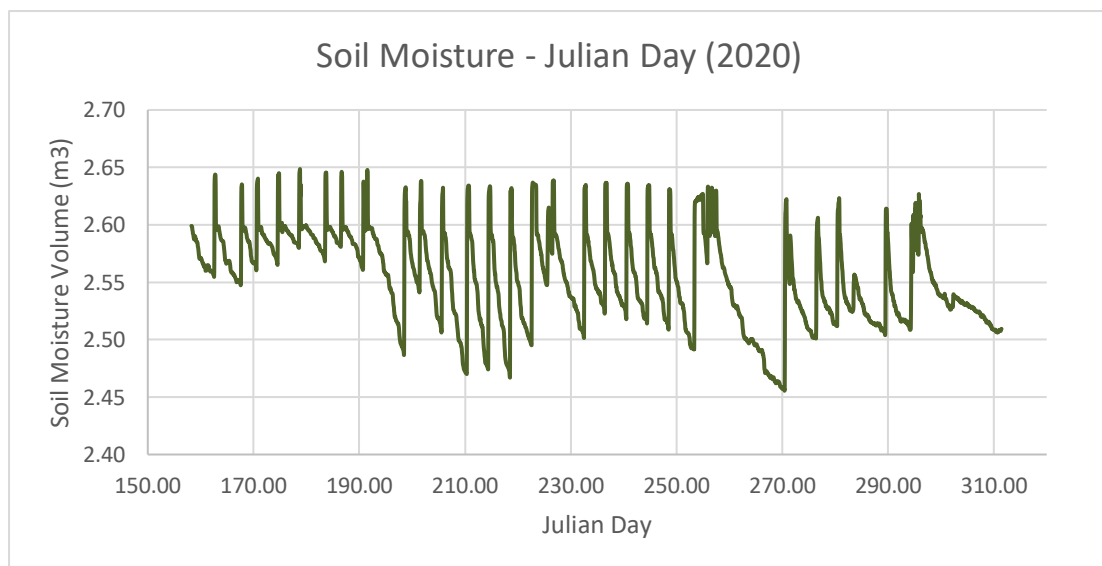
4.6. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΔS

Σε αυτή την ενότητα παραθέτουμε τα αποτελέσματα της εδαφικής υγρασίας, όρος του υδατικού ισοζυγίου. Ούτε για αυτόν τον όρο έχουμε αρκετά δεδομένα για το 2022, προκειμένου να παραθέσουμε το αντίστοιχο διάγραμμα.

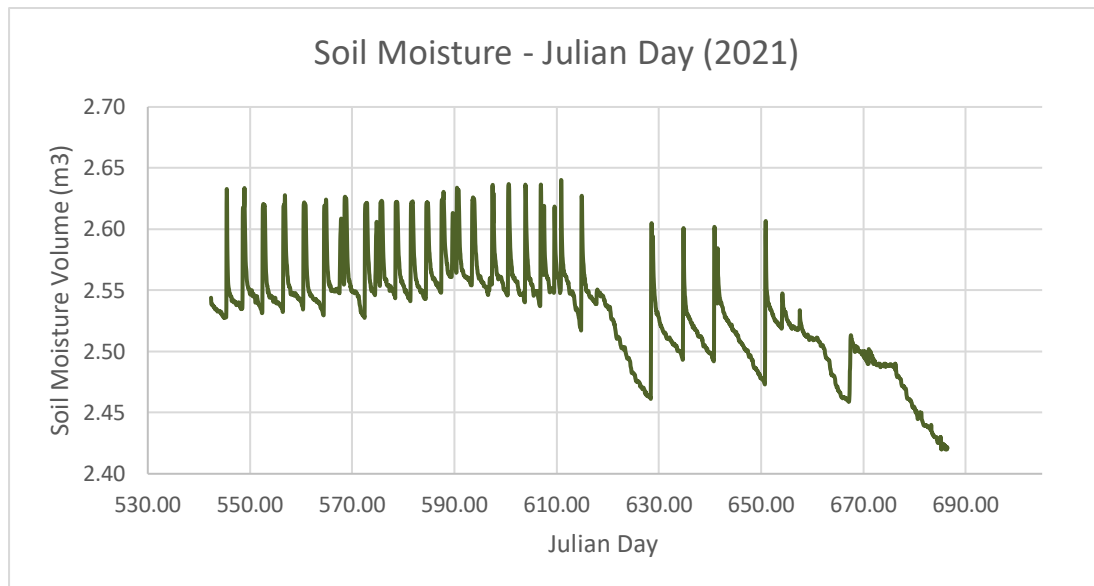
Στα Γραφήματα 4.23., 4.24., 4.25. παρουσιάζεται ο όγκος της υγρασίας του εδάφους σε m^3 σε ακτίνα 1,5 μέτρων από τον κορμό του φυτού, μέχρι το βάθος των 90 εκατοστών. Στα γραφήματα βλέπουμε αυτή τη διακύμανση, καθώς μόλις αρδεύουμε τα φυτά, αυξάνεται η εδαφική υγρασία, όπου και παρατηρούμε τις κορυφές και έπειτα, μέχρι την επόμενη άρδευση, ο συνολικός όγκος μειώνεται, εξαιτίας της διήθησης και της εξάτμισης από το έδαφος.



Γράφημα 4.23. Ογκομετρική υγρασία του εδάφους ως προς τις ώρες της ημέρας, μεταποιημένες σε ιουλιανή ημέρα για τις ημερομηνίες 16/07/2019 (11 π.μ.) - 31/12/2019 (11 μ.μ.).



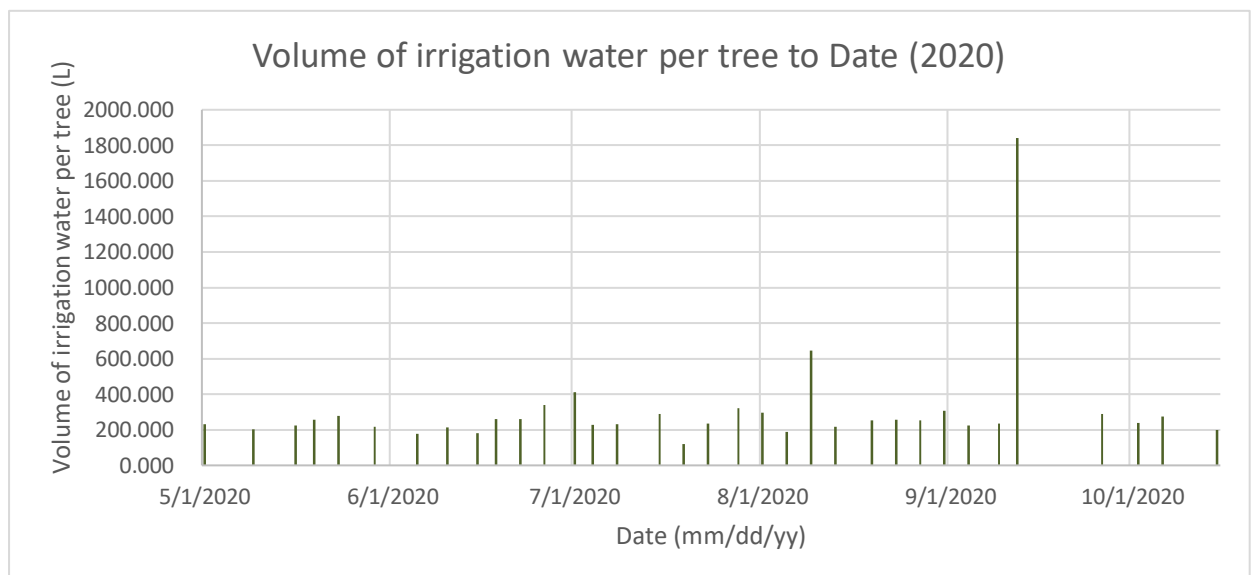
Γράφημα 4.24. Ογκομετρική υγρασία του εδάφους ως προς τις ώρες της ημέρας, μεταποιημένες σε ιουλιανή ημέρα για τις ημερομηνίες 06/06/2020 (6 π.μ.) - 06/11/2020 (11 π.μ.).



Γράφημα 4.25. Ογκομετρική υγρασία του εδάφους ως προς τις ώρες της ημέρας, μεταποιημένες σε ιουλιανή ημέρα για τις ημερομηνίες 25/06/2021 (9 π.μ.) - 16/11/2021 (11 π.μ.).

4.7. ΟΓΚΟΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

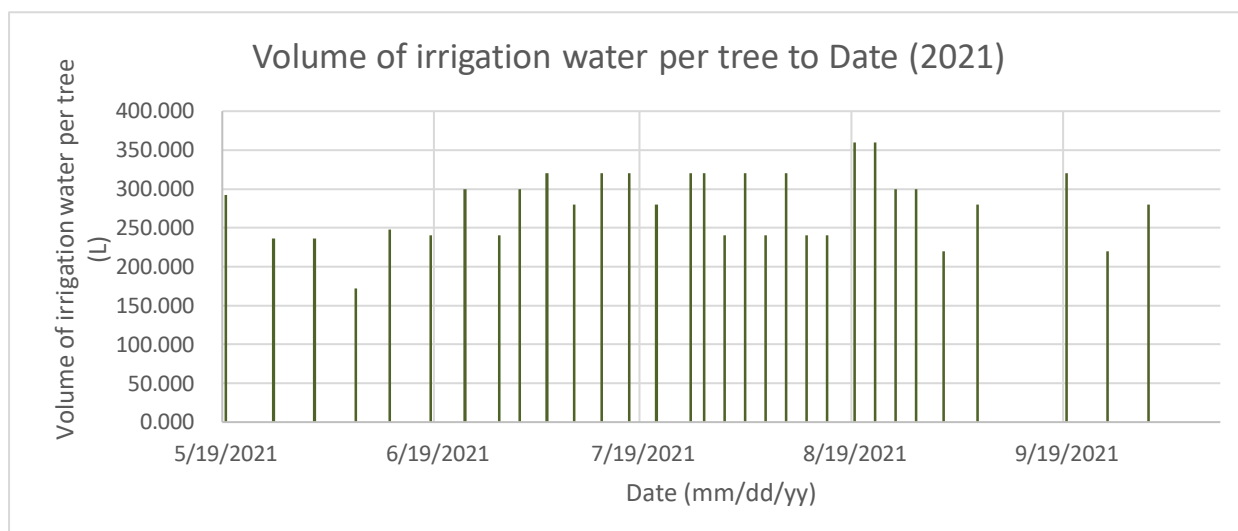
Ο τελευταίος όρος του υδατικού ισοζυγίου για τον οποίο έχουμε στοιχεία είναι αυτός του όγκου άρδευσης. Οι χρονιές που εξετάζονται είναι το 2020 (Γράφημα 4.26.) και το 2021 (Γράφημα 4.27.) και καταγράφεται η ποσότητα νερού που χρησιμοποιήθηκε για την άρδευση της καλλιέργειας.



Γράφημα 4.26. Όγκος νερού που χρησιμοποιήθηκε το 2020 για το πότισμα κάθε δέντρου της καλλιέργειας.

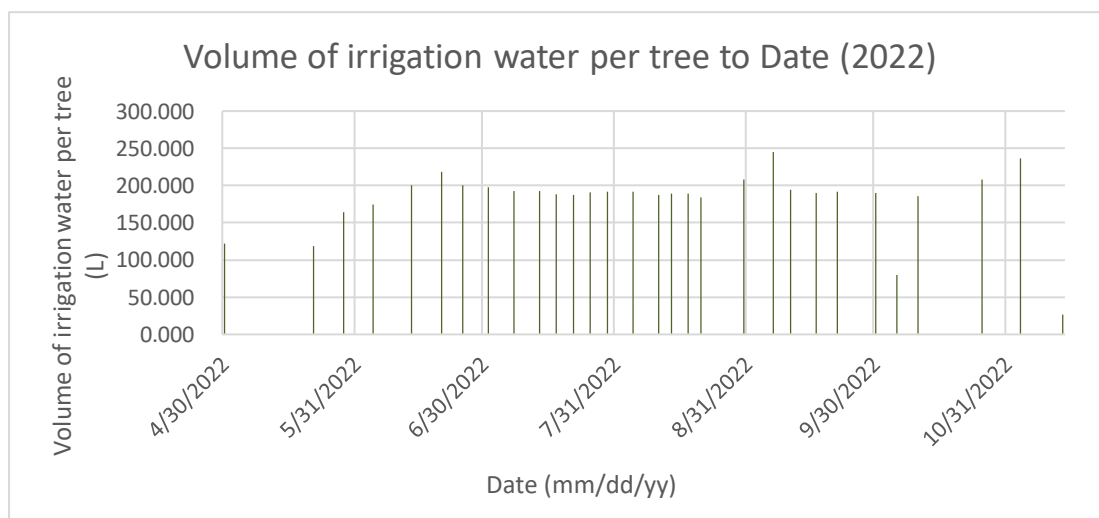
Για το 2020, η αρδευτική περίοδος άρχισε από την αρχή του Μαΐου (01/05) και τελείωσε στα μέσα του Οκτώβρη (15/10). Το πότισμα γινόταν κάθε 4 μέρες, στην πλειοψηφία και διοχετεύθηκαν από 120 έως και 340 L νερού σε κάθε δέντρο. Τα συνολικά λίτρα νερού που διατέθηκαν για το πότισμα κάθε δέντρου, αυτή τη χρονιά, ήταν 10.392,00 L. Στο ποσό αυτό συμπεριλαμβάνονται και τα τρία περιστατικά υπερ-άρδευσης και έχουμε πως ο μέσος όρος νερού άρδευσης του φυτού ήταν 305,6

Λ. Για το σύνολο της καλλιέργειας, η ποσότητα νερού που χρησιμοποιήθηκε ήταν 259.800 L.



Γράφημα 4.27. Όγκος νερού που χρησιμοποιήθηκε το 2021 για το πότισμα κάθε δέντρου της καλλιέργειας.

Για το 2021, η αρδευτική περίοδος άρχισε από τις 19/05 και τελείωσε στις 11/10. Το πότισμα γινόταν κάθε 4 μέρες και τα δέντρα δέχονταν από 172 έως και 360 L νερού. Η μέση τιμή του νερού που διοχετεύθηκε ήταν 270,8 L. Η συνολική ποσότητα νερού άρδευσης είναι 8.664,0 L για κάθε δέντρο. Αυτή τη χρονιά δεν είχαμε υπερ-αρδεύσει και όλη η καλλιέργεια δέχτηκε συνολικά 216.600 L νερού.



Γράφημα 4.28. Όγκος νερού που χρησιμοποιήθηκε το 2022 για το πότισμα κάθε δέντρου της μικρής καλλιέργειας.

Για το 2022, η αρδευτική περίοδος άρχισε από τις 30/04 και τελείωσε στα μέσα του Νοέμβρη, 13/11. Αυτή τη χρονιά αρδεύτηκαν δυο αγροί ταυτόχρονα. Ο ένας (μικρός αγρός) αποτελείται από 25 δέντρα, τα οποία περιβάλλονται από 25 σταλλάκτες και ο άλλος (μεγάλος αγρός) από 40 δέντρα, με 15 σταλλάκτες το καθένα. Τα δέντρα ποτίζονταν κάθε 4 μέρες, με 27 έως και 245 L τη φορά. Η μέση τιμή νερού που διοχετεύθηκε ήταν 175,3 L. Από τα δεδομένα που λάβαμε, υπολογίσαμε ότι για όλη την περίοδο και οι δύο αγροί, δέχτηκαν συνολικά 266.320 L. Συμπερασματικά, ο κάθε σταλλάκτης παρέχει 217,4 L νερού και τα δέντρα του μικρού χωραφιού δέχονταν 5.435 L νερό. Συνολικά ο αγρός δέχεται 135.875 L νερό.

Τα αποτελέσματα αυτά μας αποδεικνύουν ότι η χρήση 700 m³, που προτείνεται από την περιφέρεια, είναι υπερβολική για μια φυτεία που διαθέτει 25-30 δέντρα. Το 2020, μάλιστα, όπου είχαμε τα φαινόμενα υπερ-άρδευσης, η παροχή της περίσσειας νερού άσκησε πίεση στα φυτά, την οποία παρατηρήσαμε μέσω των δεικτών βλάστησης. Συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα, το 2020 ο όγκος άρδευσης, μαζί με τα περίσσεια κυβικά είναι 259,8 m³, το 2021, η καλλιέργεια ποτίστηκε με 216,6 m³ νερού και το 2022 με περίπου 135,9 m³. Βλέπουμε ότι σε κάθε περίπτωση, δεν χρειάζεται να ξεπεράσουμε το όριο των 300 m³ νερού για να έχουμε ικανοποιητική παραγωγή. Το 2022, όπου έχουμε την μικρότερη παροχή νερού, λάβαμε παραγωγή 41 kg από κάθε δέντρο, χωρίς το δέντρο να παρουσιάζει συμπτώματα υδατικού στρες στα φύλλα του.

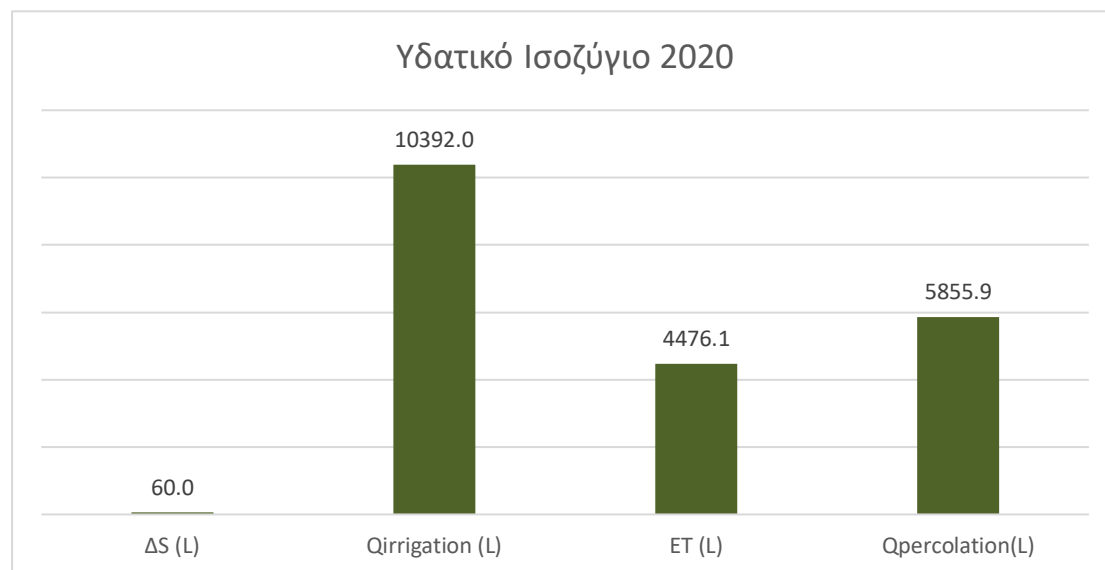
Επομένως, είναι ασφαλές να πούμε ότι η λύση βρίσκεται στη στρατηγική άρδευσης. Στην περίπτωση μας, είναι εμφανές ότι η μεμονωμένη άρδευση του κάθε δέντρου, σε κυκλική διάταξη, αποδίδει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

4.8. ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ

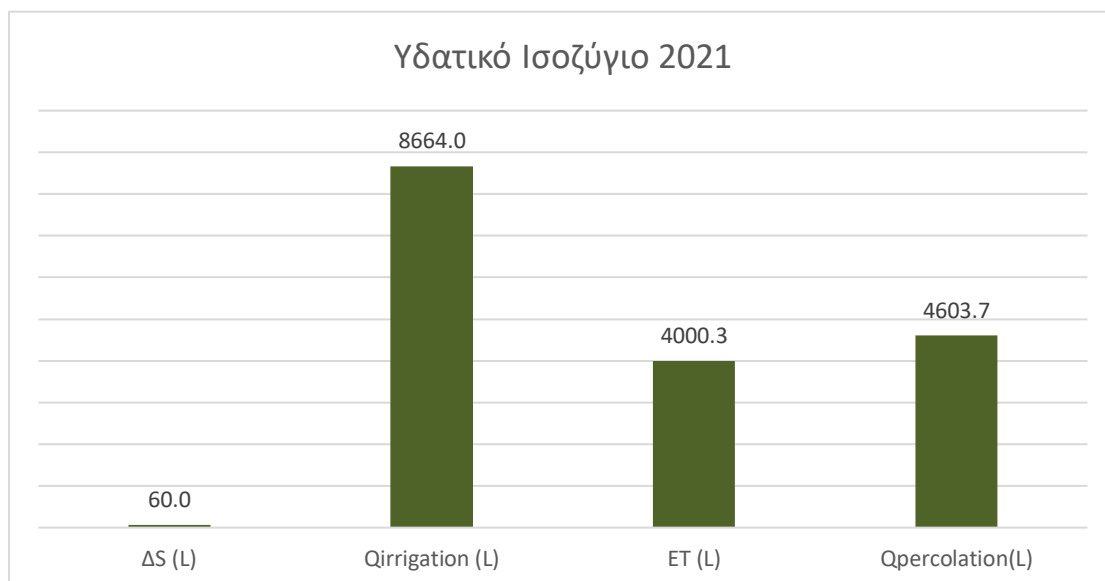
Αφού επεξεργάστηκαν όλες οι μεταβλητές της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου ξεχωριστά και συμπληρώθηκαν στην εξίσωση, βρέθηκε η τιμή του όγκου διήθησης για τις χρονιές 2020 και 2021. Με τα παρακάτω γραφήματα (Γράφημα 4.28., 4.29.) μπορούμε να δούμε παραστατικά τις τιμές κάθε μεταβλητής του ισοζυγίου.

Βλέπουμε από το Γράφημα 4.29., ότι όταν διαθέτουμε λιγότερο νερό, έχουμε λιγότερη ET και λιγότερη διήθηση, το οποίο μας επιβεβαιώνει ότι η περίσσεια νερού δεν είναι χρήσιμη στο φυτό. Η υγρασία εδάφους παραμένει σταθερή και στις δυο περιπτώσεις, επομένως βλέπουμε πως για τις δυο χρονιές δεν έχει μεταβληθεί η αποθηκευτική ικανότητα του εδάφους.

Αξίζει να θυμηθούμε ότι το 2020 ήταν η χρονιά με τα περιστατικά υπερ-άρδευσης, επομένως οι απώλειες στον υπόγειο υδροφόρα θα μπορούσαν να ήταν μικρότερες. Παρόλα αυτά, αυτό μας αποδεικνύει περαιτέρω ότι χρειάζεται να βρούμε τις κατάλληλες ποσότητες άρδευσης, ώστε να μειώσουμε τη διήθηση όσο το δυνατό περισσότερο.



Γράφημα 4.29. Ποσότητες των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου για το έτος 2020.



Γράφημα 4.30. Ποσότητες των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου για το έτος 2021.

Για το 2022, δυστυχώς δεν μπορούμε να παρουσιάσουμε ένα αντίστοιχο σχήμα επειδή δεν διαθέτουμε τα αναγκαία δεδομένα για τον όγκο της εδαφικής υγρασίας (ΔS). Έχουμε όμως τα αποτελέσματα για τον όγκο άρδευσης και την εξατμισοδιαπνοή και θεωρώντας ότι το ΔS θα παραμείνει σταθερό και για αυτή τη χρονιά ή τουλάχιστον θα κυμαίνεται σε κοντινές τιμές, μπορούμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα για τον όγκο διήθησης.

Αρχικά, ο όγκος άρδευσης για το 2022 για τη μικρή φυτεία είναι 5.435 L, ο οποίος είναι εμφανώς μικρότερος των προηγούμενων χρόνων. Η εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε στα 5.243,31 L και θεωρώντας το ΔS ίσο με 60 L, ο όγκος διήθησης υπολογίζεται προσεγγιστικά στα 131,69 L. Βλέπουμε ότι πλέον μιλάμε για απώλειες της τάξης των λίτρων και όχι των κυβικών. Με τη σημαντική αυτή μείωση στον όγκο άρδευσης, παρατηρούμε ότι το φυτό χρησιμοποιεί το νερό για τις διεργασίες που έχει να επιτελέσει και το νερό που χάνεται μειώνεται σημαντικά. Όλα αυτά χωρίς να πιέζεται λόγω υδατικού στρες, ενώ δεν επηρεάζεται ούτε η παραγωγή του.

4.9. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Ως τελικό στάδιο, θέλουμε να δούμε εάν τα αποτελέσματα της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου και του μοντέλου HYDRUS-1D έχουν κάποια συνάφεια.

Αρχικά, από τα φύλλα excel, κοιτώντας το 2020, έχουμε:

i. Εξατμισοδιαπνοή (ET)

$$ET_{2020} = 4,476 \text{ m}^3$$

Υπολογίσθηκε το σύνολο της εξατμισοδιαπνοής των φυτών για κάθε μια από τις μέρες άρδευσης και έπειτα, αφού πολλαπλασιάστηκε με την επιφάνεια (με $D=3,0 \text{ m}$), καταλήξαμε με $ET_{2020} = 4,476 \text{ m}^3$.

ii. Όγκος άρδευσης ($Q_{\text{Irrigation}}$)

$$Q_{\text{Irrigation}} = 8,1 \text{ m}^3$$

Το σύνολο του νερού που παρέχεται για την άρδευση κάθε δέντρου είναι $10,392 \text{ m}^3$. Για να μπορέσουμε όμως να συγκρίνουμε τις τιμές αυτές με αυτές του μοντέλου, χρειάζεται να αφαιρέσουμε τους παραπλήσιους όγκους από τις ημέρες που υπερ-αρδεύσαμε. Το μοντέλο δέχεται μια ενδεικτική τιμή μιας μόνο χρονική περιόδου ποτίσματος, που στην περίπτωση μας ήταν 4 μέρες και με αυτή μπορούμε και βγάζουμε στη συνέχεια τα αποτελέσματα του χρόνου. Επομένως, αφαιρώντας τις ποσότητες αυτών των ημερών, το τελικό σύνολο βγαίνει $8,1 \text{ m}^3$. Είχαμε $0,5 \text{ m}^3$ παραπλήσια στις 09/08/2020, $1,6 \text{ m}^3$ στις 12/09/2020 και $0,2 \text{ m}^3$ στις 01/07/2020.

iii. Εδαφική υγρασία (ΔS)

$$\Delta S = 0,06 \text{ m}^3$$

Για την εύρεση της εδαφικής υγρασίας κάνουμε αφαίρεση της πρώτης μέρας ποτίσματος που μας ενδιαφέρει από τη τελευταία για το χρονικό διάστημα που έχουμε χρησιμοποιήσει και στο μοντέλο. Συγκεκριμένα, για τους υπολογισμούς του 2020 έχουμε $2,66 \text{ m}^3 - 2,60 \text{ m}^3 = 0,06 \text{ m}^3$

iv. Ισοζύγιο

$$Q_{\text{perc.}} = Q_{\text{irr.}} - ET - SM = 8,1 \text{ m}^3 - 4,476 \text{ m}^3 - 0,06 \text{ m}^3 = 3,6 \text{ m}^3$$

Το αποτέλεσμα του μοντέλου για το 2020 (22/06/20-26/06/20) είναι $Q_{\text{perc.}} = 1,92 \text{ m}^3$.

Για τη χρονιά του 2021, τα αποτελέσματα που συγκεντρώνουμε από το excel είναι:

i. Εξατμισοδιαπνοή (ET)

$$ET_{2021} = 4,00 \text{ m}^3$$

ii. Όγκος άρδευσης ($Q_{\text{Irrigation}}$)

$$Q_{\text{irr.}} = 8,664 \text{ m}^3$$

Αυτή τη χρονιά δεν έχουμε μέρες όπου έχουμε ποτίσει παραπάνω από $0,2 \text{ m}^3$.

iii. Εδαφική υγρασία (ΔS)

$$\Delta S = 0,06 \text{ m}^3$$

iv. Ισοζύγιο

$$Q_{\text{perc.}} = 4,60 \text{ m}^3$$

Το αποτέλεσμα του μοντέλου για το 2021 (13/07/21-17/07/21) είναι $Q_{\text{perc.}} = 2,6 \text{ m}^3$.

Βλέπουμε πως και στις δύο περιπτώσεις, οι τιμές που παίρνουμε από το excel και τα αποτελέσματα που μας δίνει το μοντέλο, δεν είναι κοντινά. Συγκεκριμένα, η διαφορά είναι κοντά στα 2 m^3 . Οι διαφορές είναι εμφανείς και είναι πιθανό να αφορούν λάθη στη βαθμονόμηση κατά τη χρήση του μοντέλου.

Όπως στην πρώτη περίπτωση, έτσι και στη δεύτερη, χρησιμοποιήσαμε μια χρονική περίοδο της οποίας ο όγκος άρδευσης ήταν κοντά στη μέση τιμή του συνολικού όγκου ποτίσματος για όλη τη χρονιά. Ειδικότερα, για το 2020, ο μέσος όγκος ποτίσματος είναι $7,64 \text{ m}^3$ και επιλέχθηκε ένα χρονικό διάστημα με $6,5 \text{ m}^3$. Για το 2021, η μέση τιμή είναι $6,8 \text{ m}^3$ και επιλέχθηκε χρονικό διάστημα με όγκο άρδευσης 8 m^3 .

Δυστυχώς υπήρχαν κάποιες ελλείψεις στα δεδομένα που είχαμε είτε από τους μετεωρολογικούς σταθμούς είτε από τους αισθητήρες φασματικής ανάκλασης. Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαία η συνέχιση της συλλογής δεδομένων ώστε να μπορούμε να κάνουμε περαιτέρω αναλύσεις. Για τη βελτίωση της μεθοδολογίας, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν πρόσθετες έρευνες, χρησιμοποιώντας ένα μεγαλύτερο δικτύου σταθμών. Ειδικότερα, είναι απαραίτητο να εξεταστεί η ευαισθησία αισθητήρων φασματικής ανάκλασης SRS μέσω των οποίων εξάγονται μεταβλητές που εμπλέκονται στη διαδικασία της παραγωγικότητας, και να παρουσιαστούν εναλλακτικές διατυπώσεις για διάφορους συνδυασμούς ελλειπόντων μετεωρολογικών δεδομένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της μελέτης ήταν να εκτιμηθούν οι πραγματικές ανάγκες του φυτού σε άρδευση και να συγκριθούν με τις θεωρητικές ποσότητες που προτείνονται από διάφορους οργανισμούς. Τα αποτελέσματα της μελέτης μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

Το 2020, η παροχή για τη σεζόν ήταν:

- ♦ $10,4 \text{ m}^3$ για το κάθε δέντρο και
- ♦ $259,8 \text{ m}^3$ για όλο το στρέμμα.

Το έτος αυτό παρατηρήθηκαν τρία περιστατικά υπερ-άρδευσης, τα οποία προκάλεσαν υδατικό στρες στα φυτά, πράγμα το οποίο αποτυπώνεται και από τις διακυμάνσεις των δεικτών βλάστησης.

Το ET ήταν $4,5 \text{ m}^3$ /δέντρο και ο όγκος διήθησης $5,9 \text{ m}^3$ /δέντρο. Το έδαφος κατακρατεί $0,06 \text{ m}^3$ /δέντρο.

Το 2021, η παροχή για τη σεζόν ήταν:

- ♦ $8,7 \text{ m}^3$ /δέντρο
- ♦ $216,6 \text{ m}^3$ /στρέμμα.

Το ET ήταν $4,0 \text{ m}^3$ /δέντρο και ο όγκος διήθησης, $4,6 \text{ m}^3$ /δέντρο. Το έδαφος κατακρατεί $0,06 \text{ m}^3$ /δέντρο.

Τέλος, το 2022, η παροχή για τη σεζόν ήταν:

- ♦ $5,4 \text{ m}^3$ /δέντρο
- ♦ $135,9 \text{ m}^3$ /στρέμμα.

Το ET ήταν $5,2 \text{ m}^3$ /δέντρο και ο όγκος διήθησης $0,13 \text{ m}^3$ /δέντρο. Το έδαφος κατακρατεί $0,06 \text{ m}^3$ /δέντρο.

Από την παραπάνω ανάλυση συμπεραίνεται ότι το φυτό δεν χρειάζεται την προτεινόμενη ποσότητα των 700 m^3 , ενώ μπορεί να τεθεί ένα τυπικό όριο των 300 m^3 .

Η αισθητή μείωση το 2022, επιβεβαιώνει πως με μείωση στην ποσότητα άρδευσης μειώνονται ταυτόχρονα οι απώλειες λόγω διήθησης. Το φυτό καταναλώνει τη μεγαλύτερη ποσότητα του νερού που δέχεται για τις λειτουργίες του και το υπόλοιπο νερό είτε κατακρατείται από το έδαφος είτε διηθείται. Το φυτό δεν δέχεται πίεση λόγω υδατικού στρες και συνεχίζει να δίνει ικανοποιητική παραγωγή. Κάθε δέντρο είχε παραγωγή 41 κιλών.

Είναι εμφανές ότι η μεμονωμένη άρδευση κάθε δέντρου αποδίδει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τη μέθοδο άρδευσης όλου του αγρού, αφού εκμεταλλευόμαστε μόνο την ενεργό ακτίνα που χρησιμοποιεί το δέντρο για την απορρόφηση νερού. Παρατηρείται ότι σε απόσταση μεγαλύτερη από 1,5 m από το κέντρο του κορμού, το φυτό δεν αποκρίνεται και δεν απορροφά νερό.

Όσον αφορά τη συχνότητα ποτίσματος, δεν υπάρχει ανάγκη για πότισμα συχνότερο του διαστήματος των 3-4 ημερών, ακόμα και κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Η διάρκεια της άρδευσης εξαρτάται από τη σύσταση του χώματος, πόσο γρήγορα ή αργά γίνεται η διήθηση, ώστε να γίνεται η άρδευση μέχρι το σημείο όπου η διήθηση δεν ξεπερνά τα 50 εκατοστά, που είναι περίπου η ριζική ζώνη. Το 2022 η διάρκεια της άρδευσης ήταν 3 ώρες.

Τέλος, όσον αφορά τη σύγκριση των δυο μεθόδων, Penman-Monteith και μοντέλο HYDRUS-1D, αυτή δεν μπορεί να γίνει ικανοποιητικά με τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει. Οι διαφορές είναι εμφανείς και στις δυο περιπτώσεις (2020, 2021), αλλά πιθανά οφείλονται σε λανθασμένη βαθμονόμηση των τιμών του μοντέλου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Al-Ghobari, H., 2000. "Estimation of reference evapotranspiration for southern region of Saudi Arabia". *Irrigation Science* 19, p. 81–86. (Available at: <https://doi.org/10.1007/s002710050004>)
2. Alados, I., Foyo-Moreno, I., Alados-Arboledas, L., 1996. "Photosynthetically active radiation: measurements and modelling". *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 78, pp. 121-131. (Available at: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02245-7](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02245-7))
3. Alton, P., B., 2016. "The sensitivity of models of gross primary productivity to meteorological and leaf area forcing: A comparison between a Penman-Monteith ecophysiological approach and the MODIS Light-Use Efficiency algorithm". *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 218-219, p. 11-24. (Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.010>)
4. Anadranistakis, M., Liakatas, A., Kerkidis, P., Rizos, S., Gavanosis, J., Poullovassilis, A., 2000. "Crop water requirements model tested for crops grown in Greece". *Agricultural Water Management*, Vol. 45, Issue 3, p. 297-316. (Available at: [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(99\)00106-7](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00106-7))
5. Asner, G., P., Scurlock, J., M., O., Hicke, J., A., 2003. "Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies". *Global Ecology and Biogeography*, Vol. 12, Issue 3, p. 191-205. (Available at: <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00026.x>)
6. Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T., Hatfield, J.L., 1984. "Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat". *Agronomy Journal*, Vol. 76, Issue 2, p. 175-346. (Available at: <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600020029x>)

7. Berg, A., Sheffield, J., 2018. "Climate Change and Drought: the Soil Moisture Perspective". *Current Climate Change Reports* 4: p. 180-191. (Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40641-018-0095-0>)
8. Beyá-Marshall, Víctor, et al., 2022. "Optimal Irrigation Management for Avocado (Cv. 'Hass') Trees by Monitoring Soil Water Content and Plant Water Status." *Agricultural Water Management*, Vol. 271, p. 107794. (Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107794>)
9. Bhandari, A. K., Kumar, A., Singh, G. K., 2012. "Feature Extraction Using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): a Case Study of Jabalpur City". *Procedia Technology*, Vol. 6, p. 612-621. (Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017312006196?via%3Dihub>)
10. Chartzoulakis, K. S., Paranychanakis, N.V., and Angelakis, A.N., 2001. "Water Resources Management in the Island of Crete, Greece, with Emphasis on the Agricultural Use." *Water Policy* 3, no. 3: 193–205. (Available at: [https://doi.org/10.1016/S1366-7017\(01\)00012-5](https://doi.org/10.1016/S1366-7017(01)00012-5))
11. Chen, J.M., 2018. "Remote Sensing of Leaf Area Index and Clumping Index". *Comprehensive Remote Sensing*, Vol.3, p. 53-77. (Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095489105408>)
12. Cleverly, J., Chen, C., Boulain, N., Villalobos-Vega, R., Faux, R., Grant, N., Yu, Q., Eamus, D., 2013. "Aerodynamic resistance and Penman-Monteith evapotranspiration over a seasonally two-layered canopy in semiarid central Australia". *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 14, Issue 5, p. 1562-1570. (Available at: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-080.1>)
13. Coops, N., C., Hilker, T., Hall, Forrest, G., Nichol, Caroline, J., Drolet, Guillaume, G., 2010. "Estimation of Light-Use Efficiency of Terrestrial Ecosystems from Space: A Status Report". *BioScience*, Vol. 60, Issue 10, p. 788-797. (Available at: <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.10.5>)
14. Carlson, T., N., Ripley, D., A., 1997. "On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index". *Remote sensing of Environment*, 62 (3), p. 241-252. (Available at: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1))
15. Daughtry C.S.T., Gallo, K.P., Goward, S.N., Prince, S.D., Kustas, W.P., 1992. "Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 39, Issue 2, p. 141-152. (Available at: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90132-4](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90132-4))
16. Fang, H., Baret, F., Plummer, S., Strub, G., S., 2019. "An overview of global leaf area index (LAI): methods, products, validation, and applications". *Reviews of Geophysics*, Vol. 57, Issue 3, pp. 739-799. (Available at: <https://doi.org/10.1029/2018RG000608>)
17. Fensholt, Rasmus, Sandholt, Inge, Rasmussen Schultz, Michael, 2004. "Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 91, Issues 3-4, p. 490-507. (Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.04.009>)
18. Gamon, J.A., Peñuelas, J., Field, C.B., 1992. "A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency". *Remote Sensing of the Environment*, 41, p. 35-44. (Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003442579290059S>)
19. Garbalsky, M., F., Peñuelas, J., Gamon, J., Inoue, Y., Filella, I., 2010. "The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies". *Remote Sensing of Environment*, 115, p. 281-297. (Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.023>)
20. Garbalsky, M., F., Peñuelas, J., Papale, D., Filella, I., 2008. "Remote estimation of carbon dioxide uptake by a Mediterranean forest". *Global Change Biology*, Vol. 14, Issue 12, p. 2860-2867. (Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01684.x>)

21. Glenn, E., P., Huete, A., R., Nagler, P., L., Nelson, S., G., 2008. "Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape". (Available at: <https://doi.org/10.3390/s8042136>)
22. Gobron, N., Pinty, B., Taberner, M., Mélin, F., Verstraete, M.M., Widlowski, J.L., 2006. "Monitoring the photosynthetic activity of vegetation from remote sensing data". *Advances in Space Research*, 38, p. 2196-2202. (Available at: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.07.079>)
23. Gong, X., Liu, H., Sun, J., Gao, Y., Zhang, X., Jha, S., K., Zhang, H., Ma, X., Wang, W., 2017. "A proposed surface resistance model for the Penman-Monteith formula to estimate evapotranspiration in a solar greenhouse". *Journal of Arid Land* 9, p. 530–546. (Available at: <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0020-8>)
24. Goward, S., N., Huemmrich, K., F., 1992. "Vegetation canopy PAR absorbance and the normalized difference vegetation index: An assessment using the SAIL model". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 39, Issue 2, p. 119-140. (Available at: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90131-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90131-3))
25. Hatfield, J.L., Sauer, T.J., Prueger, J.H., 2001. "Managing Soils to Achieve Greater Water Use Efficiency: A Review". *Agronomy Journal*, Vol. 93, p. 271-280. (Available at: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2134/agronj2001.932271x>)
26. Hatfield, J.L. and Dold, C., 2019. "Water-Use Efficiency: Advances and Challenges in a Changing Climate". *Frontiers in Plant Science*, Section Plant Physiology, Vol. 10. (Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00103/full>)
27. Hatiye, S., D., Hari, Prasad, K., S., Ojha, C., S., P., 2018. "Deep percolation under irrigated water-intensive crops". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 144, Issue 8. (Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001326](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001326))
28. Howell, T. A., 2003. "Irrigation Efficiency", *Encyclopedia of Water Science*, p. 467-472. (Available at: [DOI: 10.1081/E-EWS.120010252](https://doi.org/10.1081/E-EWS.120010252))
29. Imeson, A., 2004. "Changes in the availability of water resources". *Desertification Indicator System for Mediterranean Europe (DIS4ME)*. (Available at: https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public_path/shared_folder/projects/DIS4ME/issues/iss_ue_water_resources.htm#description) (Accessed: 15/06/2023)
30. IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
31. IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151
32. Jackson, R.D. and Huete, A.R., 1991. "Interpreting vegetation indices", *Pre. Vet. Med.*, 11: p. 185-200. (Available at: [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(05\)80004-2](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(05)80004-2))
33. Jefferson, L., J., Maxwell, R., M., Constantine, P., G., 2017. "Exploring the sensitivity of photosynthesis and stomatal resistance parameters in a land surface model". *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 18, Issue 3, p. 897-915. (Available at: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0053.1>)
34. Kang, S., Gu, B., Du, T., and Zhang, J., 2003. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region, *Agricultural Water Management*, 59: p. 239–254. (Available at: [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00150-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00150-6))
35. Khoob, R., A., 2008. "Comparative study of Hargreaves's and artificial neural network's methodologies in estimating reference evapotranspiration in a semiarid

- environment". *Irrigation Science*, Vol. 26, p. 253–259. (Available at: <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0090-z>)
36. Kourgialas, N.N., 2021. "A critical review of water resources in Greece: The key role of agricultural adaptation to climate-water effects". *Science of the Total Environment*, Vol. 775. (Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145857>)
37. Lang, D., Zheng, J., Shi, J., Liao, F., Ma, X., Wang, W., Chen, X., Zhang, M., 2017. "A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with FAO Penman-Monteith method in Southwestern China". *Water*, Vol. 9, Issue 10, p. 734. (Available at: <https://doi.org/10.3390/w9100734>)
38. Laode, S., Nur, A., Hasbullah, S., Sitti, L., Tresjia, C., R. and Jumarddin, L., F., 2021. "Analysis of Soil Water Balance to Determine Planting Time of Crops on Dryland, Indonesia". *Pakistan Journal of Biological Sciences*, Vol. 24: p. 241-251. (Available at: <https://scialert.net/abstract/?doi=pjbs.2021.241.251>)
39. Liang, S. and Wang, J., 2020. "Advanced Remote Sensing, Terrestrial Information Extraction and Applications". "Chapter 3 - Compositing, smoothing, and gap-filling techniques", p. 107-130. (Available at: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03489-4>)
40. Milano, M., Ruelland, D., Fernandez, S., Dezetter, A., Fabre, J., Servat, E., Fritsch, J., M., Ardoin-Bardin, S., Thivet, G., 2013. "Current state of Mediterranean water resources and future trends under climatic and anthropogenic changes", *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 58, Issue 3, p. 498-518. (Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2013.774458>)
41. He, M., Ju, W., Zhou, Y., Chen, J., He, H., Wang, S., Wang, H., Guan, D., Yan, J., Li, Y., Hao, Y., Zhao, F., 2013. "Development of a two-leaf light use efficiency model for improving the calculation of terrestrial gross primary productivity". *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 173, p. 28-39. (Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.01.003>)
42. Monteith, J.L., 1977. "Climate and efficiency of crop production in Britain". *Philosophical Transaction of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 281, p. 227-294
43. Möttus, M., Sulev, M., Baret, F., Lopez-Lozano, R., Reinart, A., 2013. "Photosynthetically Active Radiation: Measurement and Modeling". In: Richter, C., Lincot, D., Gueymard, C.A. (eds) *Solar Energy*. Springer, New York, NY. (Available at: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5806-7_451)
44. Myneni, R.B. and Williams, D.L., 1994. "On the Relationship between FAPAR and NDVI". *Remote Sensing of the Environment*, 49: 200-211
45. Nakaji, T., Kosugi, Y., Takanashi, S., Niyama, K., Noguchi, S., Tani, M., Oguma, H., Nik, A., R., Kassim, A., R., 2014. "Estimation of light use efficiency through a combinational use of the photochemical reflectance index and vapor pressure deficit in an evergreen tropical rainforest at Pasoh, Peninsular Malaysia". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 150, p. 82-92. (Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.021>)
46. Peñuelas, J., Filella, I., Gamon, John, A., 1995. "Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance". *New Phytologist Foundation*, Vol. 131, Issue 3, p. 291-296. (Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1995.tb03064.x>)
47. Peñuelas, J., Llusia, J., Piñol, J., Filella, I., 1997. "Photochemical reflectance index and leaf photosynthetic radiation-use-efficiency assessment in Mediterranean trees". *Remote Sensing*, Vol. 18, No. 13, p. 2863-2868.
48. Pereira, L., S., Allen, R., G., Smith, M., Raes, D., 2015. "Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and Future". *Agricultural Water Management*, Vol. 147, p. 4-20. (Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>)
49. Zhang, Q., Cheng, Y., B., Lyapustin, A., I., Wang, Y., Gao, F., Suyker, A., Verma, S., Middleton, E., M., 2014. "Estimation of crop gross primary production (GPP): fAPARchl versus MOD15A2 FPAR". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 153, p. 1-6

50. Rahman, M.M., Stanley, J.N., Lamb, D.W., Trotter, M.G., 2014. "Methodology for measuring fAPAR in crops using a combination of active optical and linear irradiance sensors: a case study in Triticale (X Triticosecale Wittmack)". *Precision Agriculture*, 15, p. 532-542. (Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-014-9349-6#ref-CR10>)
51. Rahman, M.M., Lamb, D.W., Samborski, S.M., 2019. "Reducing the influence of solar illumination angle when using active optical sensor derived NDVIAOS to infer fAPAR for spring wheat (*Triticum aestivum* L.)". *Computers and Electronics in Agriculture*, 156, p. 1-9. (Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.007>)
52. Roy, J., and Saugier, B., 2001. "Terrestrial Primary Productivity: Definitions and Milestones". *Terrestrial Global Productivity, Physiological Ecology*, p. 1-6. (Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-012505290-0/50002-8>)
53. Ruimy, A., Saugier, B., Dedieu, G., 1994. "Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, No. D3, p. 5263-5283. (Available at: <https://doi.org/10.1029/93JD03221>)
54. Running, S., W., Baldocchi, D., D., Turner, D., P., Gower, S., T., Bakwin, P., S., Hibbard, K., A., 1999. "A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 70, Issue 1, p. 108- 127. (Available at: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00061-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00061-9))
55. Russell, G., 1980. "Crop evaporation, surface resistance and soil water status". *Agricultural Meteorology*, Vol. 21, Issue 3, p. 213-226. (Available at: [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(80\)90054-0](https://doi.org/10.1016/0002-1571(80)90054-0))
56. Soudani, K., Hmimina, G., Dufrêne, E., Berveiller, D., Delpierre, N., Ourcival, J., M., Rambal, S., Joffre, R., 2014. "Relationships between photochemical reflectance index and light-use efficiency in deciduous and evergreen broadleaf forests". *Remote Sensing of Environment*, Volume 144, p. 73-84.
57. Sun, L., Liang, S., Yuan, W., Chen, Z., 2013. "Improving a Penman-Monteith evapotranspiration model by incorporating soil moisture control on soil evaporation in semiarid areas". *International Journal of Digital Earth*, Vol. 6, Issue 1, p. 134-156. (Available at: <https://doi.org/10.1080/17538947.2013.783635>)
58. Szeicz, G., Long, I., F., 1969. "Surface resistance of crop canopies". *Water Resources Research* Vol. 5, Issue 3, p. 622-633. (Available at: <https://doi.org/10.1029/WR005i003p00622>)
59. Thenot, F., Méthy, M., Winkel, T., 2002. "The Photochemical Reflectance Index (PRI) as a water-stress index". *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), p. 5135-5139. (Available at: https://www.researchgate.net/publication/248977342_The_Photochemical_Reflectance_Index_PRI_as_a_water-stress_index)
60. Trotter, G.M., Whitehead, D., Pinkney, E.J., 2001. "The photochemical reflectance as a measure of photosynthetic light use efficiency for plants with varying foliar nitrogen contents". *Remote Sensing*, Vol. 23, No.6, p. 1207-1212. (Available at: <https://doi.org/10.1080/01431160110106096>)
61. Tsanis, I., K., Koutroulis, A., G., Daliakopoulos, I., N. et al., 2011. "Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete". *Climatic Change* 106, p. 667–677. (Available at: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0048-2>)
62. Valipour, M., 2012. Ability of Box-Jenkins Models to Estimate of Reference Potential Evapotranspiration (A Case Study: Mehrabad Synoptic Station, Tehran, Iran). *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 1: 1–11. (Available at: [DOI: 10.9790/2380-0150111](https://doi.org/10.9790/2380-0150111))
63. Vilalta, J., M., Forner, N., G., 2016. "Water potential regulation, stomatal behaviour and hydraulic transport under drought: deconstructing the iso/anisohydric concept". *Plant, Cell & Environment*, Vol. 40, Issue 6, p. 962-976. (Available at: <https://doi.org/10.1111/pce.12846>)

64. Viney, N., R., 1991. "An empirical expression for aerodynamic resistance in the unstable boundary layer". *Boundary-Layer Meteorology* 56, p. 381-393. (Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00119213>)
65. Wallace, J., S., 1995. "Calculating evaporation: resistance to factors". *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 73, Issue 3-4, p. 353-366. (Available at: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)05084-J](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)05084-J))
66. Wang, L., Gong, W., Li, C., Lin, A., Hu, B., Ma, Y., 2013. "Measurement and estimation of photosynthetically active radiation from 1961 to 2011 in Central China". *Applied Energy*, Vol. 111, p.1010-1017. (Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.001>)
67. Wang, L., Kisi, O., Zounemat-Kermani, M., Hu, B., Gong, W., 2016. "Modelling and a comparison of hourly photosynthetically active radiation in different ecosystems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, p. 436-453. (Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.068>)
68. Zempila, M.M., Taylor, M., Bais, A., Kazadzis, S., 2016. "Modelling the relationship between photosynthetically active radiation and global horizontal irradiance using singular spectrum analysis". *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 182, p. 240-263. (Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.06.003>)
69. Zhang, F., Guangsheng, Z., Nilsson, C., 2015. "Remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation for a maize canopy in Northeast China". *Journal of Plant Ecology*, Vol. 8, No. 4, p. 429-435. (Available at: <https://doi.org/10.1093/jpe/rtu027>)
70. Zhang, L., Lemeur, R., 1995. "Evaluation of daily evapotranspiration estimates from instantaneous measurements". *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 74, Issue 1-2, p. 139-154. (Available at: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)02181-I](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)02181-I))

ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΑ

- 1) SRS Spectral Reflectance Sensor, METER Group, Inc. USA, "SRS Spectral Reflectance Sensor Operator's Manual"
http://manuals.decagon.com/Manuals/14597_SRS_Web.pdf
- 2) ATMOS 41 All-in-One Weather Station, METER Group, Inc. USA, "ATMOS41 Manual"
http://library.metergroup.com/Manuals/20635_ATMOS41_Manual_Web.pdf
- 3) SM1 Soil Moisture Sensor, ADCON TELEMETRY, Leaflet
<https://www.adcon.com/download/leaflet-sm1-soil-moisture-sensor/>
- 4) HYDRUS 1-D, Version 3.0, Manual
https://www.pc-progress.com/Downloads/Pgm_hydrus1D/HYDRUS1D-4.17.pdf