



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Ανάλυση Ευαισθησίας του Μοντέλου Άρδευσης FAO-56 και Πειραματική Εφαρμογή σε
Ελαιόδεντρα της Κρήτης»**



Του μεταπτυχιακού φοιτητή :

Ιωάννη Λουλουδάκη

ΑΜ: mgf142

Επιβλέπων καθηγητής: Ιωάννης Ν. Δαλιακόπουλος

Ηράκλειο, Ιούλιος, 2023

Αυτή η σελίδα σκοπίμως αφέθηκε κενή

1 Περιεχόμενα

Περίληψη.....	6
Abstract	7
2 Εισαγωγή.....	8
2.1 Παγκόσμια κατανάλωση ύδατος	8
2.2 Συστήματα άρδευσης.....	8
2.2.1 Υδατική κατάσταση των φυτών	9
2.2.2 Μοντέλα στη γεωργία.....	11
2.2.3 Δεδομένα	12
2.3 Άρδευση στην Ελλάδα	13
2.4 Συνθήκες στην Κρήτη	13
2.5 Ανάλυση ευαισθησίας	13
2.6 Σκοπός της διπλωματικής.....	14
2.7 Ανάλυση ευαισθησίας	15
2.8 Αποδοτικότητα άρδευσης.....	15
2.9 Μέθοδος διπλού φυτικού συντελεστή	18
2.9.1 Παράμετροι και Παραδοχές	19
2.10 Προσδιορισμός εξατμισοδιαπνοής	20
2.11 Ποσοτικοποίηση περίσσιας και ελλείματος στην άρδευση.....	20
2.12 Μηχανική σύσταση εδάφους.....	21
2.13 Υδραυλικά χαρακτηριστικά του εδάφους	21
2.13.1 Προετοιμασία οργάνου.....	22
2.14 Ανάλυση ευαισθησίας	23
3 Πειραματική εφαρμογή	25
3.1 Ελαιώνας αγροκτήματος	25
3.2 Έδαφος αγρού.....	26
3.2.1 Μηχανική σύσταση εδάφους.....	26

3.2.2	Υδραυλικά χαρακτηριστικά	27
3.3	Καταγραφή μετεωρολογικών συνθηκών.....	30
3.3.1	Μετεωρολογικές συνθήκες.....	30
3.4	Σενάρια.....	33
3.5	Φυσιολογικές Μετρήσεις	33
3.5.1	Σχετικό υδατικό περιεχόμενο	33
3.5.2	Στοματική αγωγιμότητα	35
3.5.3	Μέτρηση φθορισμού χλωροφύλλης.....	35
3.6	Συγκομιδή.....	36
3.7	Στατιστική ανάλυση	37
4	Αποτελέσματα	38
4.1	Υπολογισμός άρδευσης.....	38
4.2	Ανάλυση ευαισθησίας.....	38
4.2.1	Συντελεστές ευαισθησίας.....	38
4.2.2	Πληθωρική άρδευση.....	39
4.2.3	Ελλειμματική άρδευση.....	42
4.3	Μετρήσεις φυσιολογικών παραμέτρων.....	45
4.3.1	Σχετικό υδατικό περιεχόμενο	45
4.3.2	Στοματική αγωγιμότητα	46
4.3.3	Φθορισμός χλωροφύλλης.....	47
4.3.4	Συγκομιδή.....	48
5	Συζήτηση.....	50
5.1	Αποτελέσματα RWC.....	50
5.2	Αποτελέσματα πορόμετρου.....	50
5.3	Αποτελέσματα φθορισμού.....	50
5.4	Αποτελέσματα συγκομιδής	51
5.5	Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας στη παραγωγή	51

5.6	Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας στην ET	52
5.7	Αποτελέσματα ποσοτικοποίησης πληθωρικής άρδευσης.....	52
5.8	Περιορισμοί.....	53
6	Συμπεράσματα.....	54
	Βιβλιογραφία.....	56

Περίληψη

Η αγροτική παραγωγή αποτελεί τον μεγαλύτερο καταναλωτή νερού παγκοσμίως, με το 70% της κατανάλωσης να προέρχεται από αυτή. Η περιοχή της Μεσογείου έχει χαρακτηριστεί ως ένα «hot-spot» κλιματικής αλλαγής. Ταυτόχρονα, στην Ελλάδα, οι υδατικοί πόροι φαίνεται να επηρεάζονται ιδιαίτερα IPCC 2021. Στην επικράτεια της Ελλάδας, το 45.5% της γης καλλιεργείται εντατικά, με το 45% αυτού να αρδεύεται. Η άρδευση είναι ζήτημα του κράτους σε επίπεδο κοινοτήτων μόνο για το 1/3 της αρδευόμενης έκτασης, αφήνοντας το υπόλοιπο στην ευθνή του κάθε αγρότη. Ο κλήρος όμως, στην Ελλάδα, είναι διασπασμένος σε μικρά κομμάτια, δυσκολεύοντας έτσι την οικονομία κλίμακας που είναι απαραίτητη για την εφαρμογή τεχνολογιών ευφυούς άρδευσης. Σκοπός της εργασίας είναι να προσδιοριστεί ο βαθμός κατά τον οποίο ο σημερινός, συνήθως εμπειρικός τρόπος άρδευσης, είναι αποτελεσματικός ή προξενεί απώλειες, είτε αυτές αφορούν υδατικούς πόρους είτε την απόδοση της παραγωγής. Για το λόγο αυτό, έγινε (α) βαθμονόμηση του μοντέλου FAO-56 στις συνθήκες άρδευσης ενός πειραματικού ελαιώνα, (β) ανάλυση ευαισθησίας στο μοντέλο, (γ) πείραμα και μετρήσεις πεδίου ώστε να επιβεβαιωθούν κατά το δυνατόν τα αποτελέσματα του μοντέλου και της ανάλυσης ευαισθησίας, καθώς και (δ) ποσοτικοποίηση της πληθωρικής άρδευσης αλλά και της μείωσης της παραγωγής βάση της έλλειψης άρδευσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο είναι ικανοποιητικό στις συνθήκες της Κρήτης. Η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε τη σχετικής υγρασίας ως τον παράγοντα με τη μεγαλύτερη επιρροή στο μοντέλο. Το πείραμα επιβεβαίωσε τα το μοντέλο άρδευσης αλλά και επέτρεψε τη ποσοτικοποίηση η οποία έγινε τόσο στη περίσσια άρδευσης όσο και στην ελλειμματική, αντιστοιχώντας τη τελευταία ως μείωση στην παραγωγή.

Abstract

Agriculture is the largest consumer of water worldwide, accounting for 70% of consumption. The Mediterranean region has been identified as a 'hot-spot' of climate change. At the same time, in Greece, water resources seem to be particularly affected (IPCC 2021). In the territory of Greece, 45.5% of the land is intensively cultivated, with 45% of this being irrigated. Irrigation is a matter for the state at the community level for only 1/3 of the irrigated area, leaving the rest to the discretion of the individual farmer. However, in Greece, the vineyard is fragmented into small pieces, making it difficult to achieve the economies of scale that are necessary for the implementation of smart irrigation technologies. The aim of this paper is to determine the extent to which the current, usually empirical, mode of irrigation is efficient or causes losses, either in terms of water resources or production efficiency. To this end, (a) calibration of the FAO-56 model to the irrigation conditions of an experimental olive grove, (b) sensitivity analysis of the model, (c) experiment and field measurements to confirm, as much as possible, the results of the model and sensitivity analysis, and (d) quantification of both flood irrigation and yield reduction based on lack of irrigation. The results show that the model is satisfactory for the conditions of Crete. Sensitivity analysis showed relative humidity as the most influential factor to the model. The experiment confirmed the irrigation model while also allowing for the quantification which was done on both the surplus irrigation and the deficit irrigation, relating the latter as a reduction in yield.

2 Εισαγωγή

2.1 Παγκόσμια κατανάλωση ύδατος

Η αγροτική παραγωγή αποτελεί τον μεγαλύτερο καταναλωτή νερού παγκοσμίως, με το 70% της κατανάλωσης να προέρχεται από αυτή (Aquastat 2016). Επιπλέον, η κλιματική αλλαγή επιβαρύνει περαιτέρω τους υδατικούς πόρους, με τις ημίξηρες περιοχές να είναι πιο ευάλωτες (WWAP 2012). Στις περιοχές της μεσογείου, όπου η αγροτική παραγωγή έχει κύριο ρόλο στις οικονομίες τους, το ζήτημα του νερού παρουσιάζει αυξημένο ενδιαφέρον (Koutroulis *et al.* 2016).

Η περιοχή της Μεσογείου έχει χαρακτηριστεί ως ένα «hot-spot» (Koutroulis *et al.* 2013a) κλιματικής αλλαγής, ιδιαίτερα ευάλωτη στις αλλαγές θερμοκρασίας και τις αυξανόμενης συχνότητας ξηρασίες (Dubronský *et al.* 2014). Διάφορες έρευνες έχουν δείξει ότι η κλιματική αλλαγή θα επιφέρει συχνότερα φαινόμενα ξηρασίας και μειωμένα αλλά πιο ισχυρά φαινόμενα κατακρημνίσεων στη λεκάνη (Dai 2013; Daliakopoulos *et al.* 2020a; Koutroulis *et al.* 2013a).

Στην Ελλάδα, οι υδατικοί πόροι φαίνεται να επηρεάζονται ιδιαίτερα, καθώς, όπως αναφέρεται στο IPCC 2021, η μέση θερμοκρασία έτους και η εξατμισοδιαπνοή, αναμένονται να αυξηθούν περισσότερο από το παγκόσμιο. Πιο συγκεκριμένα, η Ελλάδα, σε προβλέψεις συνδυασμένων σεναρίων κλιματικής αλλαγής, φαίνεται να μειώνεται σημαντικά η βροχόπτωση τη καλοκαιρινή περίοδο και να αυξάνεται τους φθινοπωρινούς μήνες (Jacob *et al.* 2014). Ειδικότερα, η Κρήτη, βρίσκεται ανάμεσα στις περιοχές που φαίνονται να πλήττονται περισσότερο από ξηρές περιόδους (Nastos & Zerefos 2009).

Η μείωση ή σταθεροποίηση των απαιτήσεων της γεωργικής παραγωγής σε νερό προϋποθέτει την αύξηση της αποδοτικότητας της παραγωγής ανά μονάδα ύδατος που καταναλώθηκε (Kelly *et al.* 2023). Οι στρατηγικές επίτευξης, αυτού του στόχου, προέρχονται από πολιτικές αποφάσεις που εφαρμόζουν περιορισμούς σε ποσότητες χωρίς να γίνονται πιο συγκεκριμένες (Loch *et al.* 2020; *The State of Food and Agriculture 2020 2020*; Young *et al.* 2021) αλλά και από κίνητρα τα οποία δίνονται για την αύξηση αποδοτικότητας και παραγωγικότητας μέσω βελτίωσης της διαχείρισης άρδευσης που εφαρμόζεται κατά την καλλιεργητική περίοδο (Berbel *et al.* 2019; Kukul *et al.* 2020).

2.2 Συστήματα άρδευσης

Στα συμβατικά συστήματα άρδευσης δεν λαμβάνονται υπόψη οι χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις των καιρικών συνθηκών και των χαρακτηριστικών του εδάφους (Vories *et al.* 2021). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη χωρική διακύμανση στη διήθηση της άρδευσης και ως εκ τούτου, του διαθέσιμου νερού για τα φυτά. Η περίπτωση πληθωρικής εφαρμογής μπορεί να επιφέρει,

μεταξύ άλλων, διήθηση λιπασμάτων και επιφανειακή απορροή. Από την άλλη πλευρά, σε περίπτωση ελλειμματικής άρδευσης μπορεί να υπάρξει μείωση στη ποσότητα αλλά και την ποιότητα της παραγωγής λόγω καταπόνηση των φυτών (Bwambale *et al.* 2022).

Σε συστήματα γεωργίας ακριβείας, γίνεται χρήση τεχνολογιών που ενσωματώνουν αισθητήρες, συστήματα πληροφοριών, μηχανήματα τελευταίας τεχνολογίας και τεκμηριωμένη διαχείριση (Yin *et al.* 2021). Η γεωργία ακριβείας, και πιο συγκεκριμένα η ευφυής άρδευση, δίνει τη δυνατότητα στους παραγωγούς να εξορθολογήσουν τις γεωργικές εισροές χωρίς τα φυτά να υποβάλλονται σε υδατικό καταπόνηση (Bwambale *et al.* 2022). Συμπερασματικά, λοιπόν, επιβάλλεται η ύπαρξη στρατηγικής, για τον προγραμματισμό βέλτιστης άρδευσης, που θα συμπεριλαμβάνει περιβαλλοντικούς παράγοντες, τους παράγοντες εδαφικής υγρασίας και της φυσιολογικής κατάστασης των φυτών, για την μείωση των εισροών σύμφωνα με τη προσαρμογή του φυτού στις συνθήκες (Abioye *et al.* 2020).

Ο προγραμματισμός άρδευσης έχει καθοριστικό ρόλο στην παραγωγικότητα, καθώς είναι αυτός που καθορίζει την ποσότητα και το χρόνο που θα υπάρξει ένα γεγονός άρδευσης (Koech & Langat 2018). Η αποτελεσματικότητα της άρδευσης απαιτεί την κατανόηση της δυναμικής των σχέσεων ανάμεσα στον καιρό, το φυτό και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Ένας αποτελεσματικός προγραμματισμός εφαρμόζει τη σωστή ποσότητα, στο σωστό χρόνο με στόχο τη βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας και μετριάξει περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Hassan *et al.* 2021).

Για την βελτίωση της απόδοσης, είναι σημαντικό, να γίνεται παρακολούθηση συγκεκριμένων παραγόντων που επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών. Η παρακολούθηση, από τη σκοπιά της ευφυούς άρδευσης, έγκειται στη συλλογή δεδομένων, πραγματικού χρόνου, του συστήματος εδάφους-φυτού-ατμόσφαιρας, μέσω τεχνολογιών επικοινωνίας (Abioye *et al.* 2020).

2.2.1 Υδατική κατάσταση των φυτών

Η υδατική κατάσταση των φυτών, προκύπτει από ένα σύνολο αλληλεπιδράσεων διαφόρων ατμοσφαιρικών, φυτικών και εδαφικών παραμέτρων. Το διαθέσιμο νερό στο έδαφος, οι ατμοσφαιρικές απαιτήσεις (αποτέλεσμα της ακτινοβολίας, σχετικής υγρασίας, θερμοκρασίας και ανέμου), η ικανότητα του ριζικού συστήματος στην απορρόφηση νερού, η ικανότητα του φυτού να μεταφέρει τη διαθέσιμη υγρασία στα φύλλα και η ανταπόκριση των στομάτων στη ρύθμιση της διαπνοής είναι μερικές από τις παραμέτρους που επηρεάζουν σημαντικά την υδατική κατάσταση του φυτού (Ψ) (Gimenez *et al.* 2004; Giménez *et al.* 2013).

Το υδατικό δυναμικό (Ψ) των φυτών είναι δείκτης για τη μέγιστη συγκράτηση νερού, όπου λόγω του ρόλου του στο σύστημα έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα, επιτρέπει την κίνηση του νερού στα

υπόλοιπα σημεία του φυτού και την εξέταση τους. Το υδατικό δυναμικό είναι η θεωρητική βάση στην οποία βασίζουμε την κίνηση ενός mol νερού από ένα σημείο του φυτού ή του εδάφους προς ένα σημείο αναφοράς σε σταθερή θερμοκρασία και ατμοσφαιρική πίεση. Το Ψ κυμαίνεται από μηδέν (0) έως αρνητικές τιμές και μετράται σε τιμές πίεσης, με συχνότερες να είναι εκείνες των MPa (Gimenez *et al.* 2004; Giménez *et al.* 2013).

Τα φύλλα είναι τα όργανα του φυτού όπου συμβαίνει το μεγαλύτερο μέρος της ανταλλαγής CO₂ και H₂O ανάμεσα σε φυτό κι ατμόσφαιρας. Η διαδρομή εισόδου του διοξειδίου του άνθρακα είναι η ίδια με εκείνη της εξαγωγής υδρατμών από το φυτό. Η διάχυση υδρατμών, ενός κορεσμένου φυτικού ιστού, προς την ξηρότερη ατμόσφαιρα, είναι ανάλογη της πίεσης των υδρατμών (Gimenez *et al.* 2004; Giménez *et al.* 2013).

Για την μεγιστοποίηση της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, τα στόματα πρέπει να παραμένουν ανοιχτά για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος της ημέρας. Έτσι μεγιστοποιείται και η ποσότητα του νερού που διαχέεται μέσω της διαπνοής. Το υδατικό δυναμικό των φύλλων (Ψ) είναι το ισοζύγιο μεταξύ της υγρασίας όπου χάνεται μέσω της διαπνοής (T) και της υγρασίας που η ρίζα απορροφά από το έδαφος, όπου το τελευταίο εξαρτάται από το διαθέσιμο στο έδαφος νερό και της συνολικής αντίστασης (r) που συναντά το νερό στην κίνηση του από το ριζικό σύστημα και στους υπόλοιπους φυτικούς ιστούς. Οι σχέσεις αυτές περιγράφονται στη σχέση:

$$\Psi = \psi_{soil} - (T * r) \quad (1)$$

Κατά τη διάρκεια της διαπνοής, τα φυτά διαχέουν στην ατμόσφαιρα περίπου το 90% του νερού όπου απομυζούν από το έδαφος. Η κίνηση του νερού καθορίζεται από τη διαφορά του υδατικού δυναμικού ($\Delta\Psi$), μετρούμενο σε MPa και τα μόρια του νερού ακολουθούν πάντα διαδρομή από σημεία με υψηλότερο Ψ σε εκείνα με χαμηλότερο Ψ . Έτσι, για τη μεταφορά του νερού, από το ριζικό σύστημα στα φύλλα, το Ψ των φύλλων πρέπει να είναι χαμηλότερο από εκείνο της ρίζας. Σε αυτή τη κατάσταση έρχεται το Ψ των φύλλων κατά την εξατμισοδιαπνοή, μέσω των στομάτων, δημιουργώντας έτσι, ροή νερού από το ξύλομα, ασκώντας μύζηση στα αγγεία όπου τα τελευταία, μέσω του ριζικού απορροφούν νερό από το έδαφος (Gimenez *et al.* 2004; Giménez *et al.* 2013).

Γενικά, το ψ_{soil} είναι υψηλότερο του δυναμικού του ριζικού συστήματος με αποτέλεσμα την κίνηση του νερού προς το ριζικό όταν το φυτό διαπνέει. Αυτή η διαδικασία μειώνει το ψ_{soil} στη ριζόσφαιρα και δημιουργεί μία διαφορά ($\Delta\Psi$) μεταξύ αυτής και της γειτνιάζουσας περιοχής του εδάφους που διαθέτει υψηλότερο Ψ . Έτσι, το υδατικό περιεχόμενο και ο ρυθμός κίνησης του

νερού, είναι άμεσα εξαρτόμενα από τον τύπο του εδάφους και της κατάστασης του (Gimenez *et al.* 2004; Jeanguenin *et al.* 2016).

2.2.2 Μοντέλα στη γεωργία

2.2.2.1 Μαθηματικά μοντέλα

Όπως αναφέρεται από τους (Zeinalie *et al.* 2021), τα μοντέλα είναι η διαδικασία μέσω της οποίας περιγράφονται, με διάφορους τρόπους, οι σχέσεις μεταξύ των στοιχείων, του κόσμου, που μας αφορούν στην λήψη αποφάσεων. Για αυτό το λόγο, τα μοντέλα, προϋποθέτουν τη διάκριση των σχέσεων των μεταβλητών τους, εκφρασμένη στη γλώσσα των μαθηματικών. Η μοντελοποίηση, επιστημονικά, είναι η διαδικασία μέσω της οποίας παρατηρείται, ορίζεται, καθορίζεται, κατανοείται ή και προσομοιάζεται μία φυσική διαδικασία, σε σχέση με τη διαθέσιμη και αποδεκτή γνώση που έχει παραχθεί (Cartwright 1983; Hacking 1983).

Η διαχείριση υδάτινων πόρων, περιλαμβάνει την αναγνώριση και ανάπτυξη έργων υδάτινων πόρων για την μεγιστοποίηση του κέρδους ή την ελαχιστοποίηση κόστους, συμπεριλαμβάνοντας μη εμπορεύσιμα μεγέθη όπως την πιθανή επιβάρυνση οικοσυστημάτων ή κοινωνικών επιπτώσεων (Mayer & Muñoz-Hernandez 2009). Υπό αυτό το πρίσμα, τα μοντέλα υδάτινων πόρων, χρησιμοποιούνται στη λήψη αποφάσεων διαχείρισης πόρων, οικολογικών αποκαταστάσεων και διαχείρισης πολύπλοκων συστημάτων (Loucks 2008).

Τα μαθηματικά μοντέλα προορίζονται για τη λύση των εξισώσεων του αντικειμένου, όπου στη μηχανική υδάτων, αφορούν στις φυσικές διαδικασίες νερού και εδάφους. Για τη λύση τους έχουν αναπτυχθεί υπολογιστικά μοντέλα, τα οποία αποκαλούνται έτσι λόγω του ότι αναλύονται από υπολογιστές και είναι ευρέως διαδεδομένα καθώς αποτελούν απλή και χαμηλού κόστους λύση (Zeinalie *et al.* 2021).

2.2.2.2 Υπολογιστικά μοντέλα αρδεύσεων

Πολλά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί έχοντας ως σκοπό τον προσδιορισμό των υδατικών απαιτήσεων των καλλιεργειών, για την καλύτερη διαχείριση των υδάτων με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της ποσότητας άρδευσης. Μοντέλα όπως τα CROPWAT (Smith & Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1992) και AQUACROP (Raes *et al.* 2009), είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα (Kourgiyalas *et al.* 2022) από το Τμήμα Ανάπτυξης Υδατικών και Εδαφικών Πόρων της Διεθνούς Οργάνωσης Τροφίμων και Γεωργίας (FAO). Τα μοντέλα αυτά, για να πετύχουν αποδοτική διαχείριση άρδευσης, βασίζονται στην εξατμισοδιαπνοή των φυτών (ET), η οποία πρέπει να προσδιορίζεται με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια για να πετύχουν το σκοπό τους. Σύμφωνα με τους Allen (2000), η ET₀, αντιπροσωπεύει τις απαιτήσεις εξάτμισης, της

καλλιέργειας αναφοράς, σε σχέση με τις κλιματολογικές συνθήκες και υπολογίζεται σύμφωνα με μετεωρολογικά δεδομένα και το φυτικό συντελεστή που εξαρτάται από το είδος της καλλιέργειας. Για τη βέλτιστη διαχείριση άρδευσης, είναι απαραίτητη μία ροή δεδομένων, από διάφορες πηγές όπως κλιματικοί σταθμοί και αισθητήρες εδάφους (Pereira *et al.* 2020).

2.2.3 Δεδομένα

2.2.3.1 Ροές δεδομένων

Τα δεδομένα είναι το κεντρικό στοιχείο στη διαχείριση υδάτων τα έργα και τον σχεδιασμό γύρω από αυτή. Η παραγόμενη πληροφορία προέρχεται από τη διαδικασία ανάλυσης των δεδομένων, της ενσωμάτωσης τους και την ερμηνεία τους. Με άλλα λόγια, η πληροφορία, είναι η επεξεργασμένη και συντεθειμένη μορφή των δεδομένων (Cantor *et al.* 2018). Τα δεδομένα υδάτων μπορούν να προέρχονται από μία γκάμα διαφορετικών μορφών, συμπεριλαμβανομένων των υπολογιστικών φύλλων, δορυφορικών εικόνων, βάσεων δεδομένων γεωχωρικών πληροφοριών και φωτογραφίες (Laituri & Sternlieb 2014). Οι διαχειριστές και οι οργανισμοί διαχείρισης υδάτων πρέπει να έχουν πρόσβαση στις πληροφορίες αυτές με τη κατάλληλη κάθε φορά χωρική και χρονική ανάλυση (Cantor *et al.* 2018), καθώς σε αντίθετη περίπτωση η ορθότητα των αποφάσεών τους και της στρατηγική διαχείρισης μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά (Jahanddideh-Tehrani *et al.* 2021).

Γενικά, τα δεδομένα υδάτων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πρωτογενή και δευτερογενή δεδομένα. Πρωτογενή δεδομένα αποκαλούνται τα ακατέργαστα δεδομένα, είτε προέρχονται από μετρήσεις που διεξήγαγε κάποιος τεχνικός είτε από αυτοματοποιημένες διαδικασίες αισθητήρων. Τα δευτερογενή δεδομένα μπορούν να έρχονται από μοντέλα, συγκεκριμένες μεθόδους και πειραματικά κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες, εργαστηριακά. Συνήθως, στα μοντέλα, γίνεται είσοδος πρωτογενών δεδομένων, από διάφορες πηγές, για την ανάλυση τους και τον προσδιορισμό μίας παραμέτρου (Jahanddideh-Tehrani *et al.* 2021). Για παράδειγμα, κατακρημνίσεις και σχετική υγρασία απαιτούνται στη μέθοδο υπολογισμού εξατμισοδιαπνοής FAO-56 (Allen 2000a).

Οι μετρήσεις *in situ* μπορούν να παρέχουν τις πιο αξιόπιστες τιμές στα κλιματικά δεδομένα, δεδομένου επαρκής βαθμονόμησης. Το μειονέκτημα όμως των άμεσων μετρήσεων έγκειται στο υψηλό κόστος αγοράς, εγκατάστασης, βαθμονόμησης και συντήρησης του εξοπλισμού (Bureau of Meteorology n.d.). Τα παραπάνω προϋποθέτουν συνεχούς οικονομικής ενίσχυσης τους και χρόνο διαχείρισης του εξοπλισμού.

2.3 Άρδευση στην Ελλάδα

Στην επικράτεια της Ελλάδας, το 45.5% της γης καλλιεργείται εντατικά (data.worldbank.org, 2020), με το 45% αυτού να αρδεύεται (Kourgialas 2021). Η άρδευση είναι ζήτημα του κράτους σε επίπεδο κοινοτήτων μόνο για το 1/3 της αρδευόμενης έκτασης, αφήνοντας το υπόλοιπο στην ευθιγή του κάθε αγρότη (Latinopoulos 2005). Ο κλήρος όμως, στην Ελλάδα, είναι διασπασμένος σε μικρά κομμάτια, δυσκολεύοντας έτσι την οικονομία κλίμακας (Kourgialas 2021) που είναι απαραίτητη για την εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών (Christias *et al.* 2020).

2.4 Συνθήκες στην Κρήτη

Πιο συγκεκριμένα, για την περιοχή που αφορά αυτή τη μελέτη, την Κρήτη, οι γεωργικές πρακτικές περιλαμβάνουν κυρίως μονοκαλλιέργειες, με ελαιώνες και αμπέλια τόσο στα ορεινά όσο και στα πεδινά. Το ελαιόλαδο αποτελεί το κύριο προϊόν του νησιού και αυτή τη στιγμή η πιο κερδοφόρα καλλιέργεια του αγροτικού τομέα. Σύμφωνα με την ΕΛΣΤΑΤ, το 2007 τα «ελαιόδενδρα για ελιές ελαιοποίησης» του Ν. Ηρακλείου καταλαμβάνουν 1.148.190 στρέμματα ή 1.148,19 km², δηλαδή το 43% της έκτασης του Νομού. Σε νεότερη καταγραφή (2011) η αντίστοιχη έκταση φαίνεται αυξημένη κατά 46% στα 1.678,56 km², δηλαδή το 64% της έκτασης του Ν. Ηρακλείου, συνεπώς υπάρχει αυξητική τάση στην εγκατάσταση ελαιοκαλλιεργειών (Christias *et al.*, 2020). Όμως, οι καλλιεργούμενες ιδιοκτησίες είναι συνήθως διάσπαρτες γύρω από τα χωριά με τον μέσο καλλιεργητή να έχει περίπου 5-10 αγροτεμάχια με μέσο μέγεθος ιδιοκτησίας τα 35 στρέμματα, ενώ η μέση απόσταση μεταξύ του χωριού και των καλλιεργειών είναι 3-5 km (van den Elsen *et al.* 2020). Συνθήκες που, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, δυσχεραίνουν την εφαρμογή τεχνολογιών λόγω κόστους (Kourgialas 2021).

2.5 Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας είναι η εκτίμηση της τελικής μεταβλητής ενός μαθηματικού μοντέλου, βάσει των αλλαγών ή της αβεβαιότητας των δεδομένων εισόδου. Ο σκοπός της ανάλυσης ευαισθησίας είναι η αναγνώριση της μεταβλητής που ασκεί την μεγαλύτερη επιρροή στην τελική μεταβλητή. Παράλληλα, η ανάλυση ευαισθησίας, προσφέρει ασφαλή και λεπτομερή ποσοτικά αποτελέσματα σε περίπλοκες σχέσης, όπως αυτής της εξατμισοδιαπνοής όπως επίσης αποτελεί μία ανέξοδη μέθοδο σε υπολογιστικό κόστος (Zhao *et al.* 2020).

Ένα ζήτημα το οποίο αναδεικνύεται συχνά μέσα από τις προσπάθειες βελτίωσης των στρατηγικών άρδευσης, είναι η προσαρμογή των μεθόδων προσδιορισμού της άρδευσης στο εύρος των ενδεχόμενων κλιματικών συνθηκών (Kelly *et al.* 2023). Διάφοροι μελετητές έχουν χρησιμοποιήσει την ανάλυση αναισθησίας παραγόντων για την μελέτη της επιρροής των κλιματικών συνθηκών

στην εξατμισοδιαπνοή. Σύμφωνα με την ανάλυση ευαισθησίας που διεξήγαγαν οι Hashemi & Sepaskhah (2020), έδειξαν την ηλιακή ακτινοβολία ως τη πιο σημαντική παράμετρο ενώ η ταχύτητα ανέμου ήταν αυτή με τη μικρότερη επίδραση, στο εύρος ανάλυσης τους (-20% έως +20%). Οι Zhao et al. (2020) έδειξαν στα αποτελέσματα τους ότι η σχετική υγρασία και η μέγιστη θερμοκρασία είχαν το μεγαλύτερο ρόλο στην εξατμισοδιαπνοή και οι (Irmak *et al.* 2006a), χρησιμοποιώντας κλιματολογικά δεδομένα διάφορων περιοχών, παρουσιάζουν τους ισχυρούς και ξηρούς ανέμους ως την πιο σημαντική παράμετρο. Επίσης, οι (Babajimopoulos *et al.* 1992) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία ήταν οι σημαντικότερες παράμετροι για την εαρινή περίοδο ενώ κατά τη χειμερινή η σχετική υγρασία παρουσιάστηκε σημαντικότερη. Αντίστοιχα, οι (Coleman & Decoursey 1976) αναφέρουν ότι η σχετική υγρασία είναι η σημαντικότερη παράμετρος σε επίπεδο έτους, με την θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία να επηρεάζουν σημαντικότερα κατά τη καλοκαιρινή περίοδο και η σχετική υγρασία κατά την χειμερινή. Τέλος, σύμφωνα με την ανάλυση ευαισθησίας του Saxton (1975a) δείχνει την ηλιακή ακτινοβολία να επιδράει σημαντικότερα κατά την καλοκαιρινή περίοδο, ενώ το φθινόπωρο και την άνοιξη την ταχύτητα του ανέμου.

Στις παραπάνω έρευνες, όταν υπολογίζεται η διακύμανση στην εδαφική υγρασία, γίνεται κατά προσέγγιση με βάση τη μηχανική σύσταση του εδάφους. Ωστόσο, η προσαρμογή ενός μοντέλου σε συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες πρέπει να συνοδεύεται από μελέτη των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους (Schneider *et al.* 2021). Οι υδραυλικές ιδιότητες των εδαφών επηρεάζονται επίσης από τη δομή τους, το πορώδες, τα συσσωματώματα, τη σχετική του πυκνότητα και τη παρουσία οργανικής ύλης, ιδιαίτερα όταν αναφερόμαστε σε μικτής σύστασης εδάφη (An *et al.* 2018; Assouline & Narkis 2019). Τα δεδομένα αυτά προϋποθέτουν εξειδικευμένο εξοπλισμό και προσωπικό για να βρεθούν, με αποτέλεσμα, συχνά, να μην είναι διαθέσιμα στον τελικό χρήστη (Dirwai *et al.* 2021; Rodrigues & Braga 2021).

2.6 Σκοπός της διπλωματικής

Σκοπός της εργασίας είναι να προσδιοριστεί ο βαθμός κατά τον οποίο ο σημερινός, συνήθως εμπειρικός τρόπος άρδευσης, είναι αποτελεσματικός ή προξενεί απώλειες, είτε αυτές αφορούν υδατικούς πόρους είτε την απόδοση της παραγωγής. Για το λόγο αυτό, έγινε (α) βαθμονόμηση του μοντέλου FAO-56 στις συνθήκες άρδευσης ενός πειραματικού ελαιώνα, (β) ανάλυση ευαισθησίας στο μοντέλο, (γ) πείραμα και μετρήσεις πεδίου ώστε να επιβεβαιωθούν κατά το δυνατόν τα αποτελέσματα του μοντέλου και της ανάλυσης ευαισθησίας, καθώς και (δ) ποσοτικοποίηση της πληθωρικής άρδευσης αλλά και της μείωσης της παραγωγής βάση της έλλειψης άρδευσης. Το πείραμα έγινε στο Αγρόκτημα του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου. Υλικά και μέθοδοι

2.7 Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό της επιρροής των κλιματικών παραγόντων της εξατμισοδιαπνοής (Irmak *et al.* 2006b; McCuen 1974; Ndiaye *et al.* 2020; Zhao *et al.* 2014). Οι παράγοντες που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την μελέτη είναι: 1. Το ύψος του φυτού (Crop height), 2. Το ολικό διαθέσιμο νερό (TAW), 3. Το βάθος του ριζικού συστήματος (Root Depth), 3. Ο αρχικός φυτικός συντελεστής ($K_{cb\ ini}$), 4. Ο φυτικός συντελεστής για τα μέσα της καλλιεργητικής περιόδου ($K_{cb\ mid}$), 5. Ο φυτικός συντελεστής για τα τέλη της καλλιεργητικής περιόδου ($K_{cb\ end}$), 6. Μέσος όρος σχετικής υγρασίας (Humidity), 7. Μέση θερμοκρασία της καλλιεργητικής περιόδου (Temp), 8. Η μέση ταχύτητα ανέμου για την καλλιεργητική περίοδο (Wind) και 9. Το σύνολο των κατακρημνίσεων που σημειώθηκαν κατά τη καλλιεργητική περίοδο. Η ευαισθησία της ET_0 , στους παράγοντες του μοντέλου, υπολογίστηκε για κάθε παράγοντα ξεχωριστά μεταβάλλοντας τον παράγοντα $\pm 5, 10, 15,$ και 20% , αφήνοντας παράλληλα τους υπόλοιπους παράγοντες στα ίδια επίπεδα. Η ίδια μέθοδος εφαρμόστηκε και στον υπολογισμό της παραγωγής του φυτού αλλάζοντας τον παράγοντα ET_0 με εκείνον της εξίσωσης αποδοτικότητας άρδευσης, Y_a (εξίσωση 2). Ένας συντελεστής αποδόθηκε σε κάθε συντελεστή σύμφωνα με την επιρροή του σύμφωνα με την εξίσωση (Ndiaye *et al.* 2020):

$$S_{vi} = \frac{\partial ET_0}{\partial vi} \frac{vi}{ET_0} \quad (2)$$

$$S_{vi} = \frac{\partial Y_a}{\partial vi} \frac{vi}{Y_a} \quad (3)$$

Όπου vi είναι η υπό εξέταση παράμετρος και ∂vi η διαφορά ανάμεσα στις τιμές. Αυτός ο συντελεστής δείχνει το ποσοστό της αλλαγής στην εξατμισοδιαπνοή και της παραγωγής, αντίστοιχα, που φέρει η ποσοστιαία αλλαγή της κλιματικής παραμέτρου. Το S_{vi} είναι ο αδιάστατος σχετικός συντελεστής ευαισθησίας, είναι επί της ουσίας ένας θετικός/αρνητικός συντελεστής που υποδεικνύει αν η ET_0 ή η Y_a θα μειωθεί ή θα αυξηθεί εφόσον αυξηθεί ο υπό εξέταση παράγοντας. Όσο μεγαλύτερος ο συντελεστής, τόσο μεγαλύτερη και η επιρροή του στην ET_0 και Y_a .

2.8 Αποδοτικότητα άρδευσης

Υπό βέλτιστες συνθήκες, διαθεσιμότητα του νερού και των θρεπτικών, οι κλιματολογικές συνθήκες, η παραγωγή (Y_a) και η εξατμισοδιαπνοή φτάνουν ένα θεωρητικό μέγιστο. Η αναφορά (Steduto *et al.* 2012) περιλαμβάνει αυτές τις παραμέτρους στη σχέση μεταξύ νερού και παραγωγής και της αντίστοιχης μείωσης της παραγωγής σύμφωνα με τη μείωση του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής:

$$Y_a = \begin{cases} \frac{Y_{\max}(ET_a)}{ET_c}, & ET_a \leq ET_c, \\ Y_{\max}, & ET_a > ET_c \end{cases} \quad (4)$$

όπου Y_{\max} [t/ha] και Y_a [t/ha] αντιστοιχούν στην μέγιστη και την πραγματική παραγωγή ενώ ET_c [mm] και ET_a [mm] είναι η μέγιστη και η πραγματική εξατμισοδιαπνοή. Όταν άλλοι αγρονομικοί παράγοντες θεωρούνται βέλτιστοι, η ET_a μπορεί να εξισωθεί με τις καλυπτόμενες ανάγκες από κατακρημνίσεις και αρδεύσεις, ενώ η ET_c με τις ανάγκες άρδευσης. Η ET_c είναι αποτέλεσμα της ET_0 [mm] όπου η τελευταία αντικατοπτρίζει τις ατμοσφαιρικές απαιτήσεις σε υγρασία, τον φυτικός συντελεστής K_c , ο οποίος συνυπολογίζει την αγροτική διαχείριση, τον τύπο του φυτού, την φαινολογία του και έναν συντελεστή υδατικού καταπόνηση K_s όπου υπολογίζει την ριζόσφαιρα και τις συνθήκες υγρασίας του εδάφους (Allen *et al.* 1998b)

$$ET_c = K_s K_c ET_0, \quad (5)$$

Η ET_0 [mm] είθισται να υπολογίζεται με φυσικούς μεθόδους, κατά κύριο λόγο το μοντέλο Penman-Monteith (Allen *et al.* 2006a) όπου για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, ET_0 , είναι απαραίτητα τα δεδομένα της μέγιστης θερμοκρασίας, ελάχιστης θερμοκρασίας, μέσου όρου σχετικής υγρασίας, της ταχύτητας του ανέμου, τις ώρες ηλιοφάνειας, του γεωγραφικού πλάτους και του γεωγραφικό μήκος. Η ET_0 [mm] είθισται να υπολογίζεται με φυσικούς μεθόδους, κατά κύριο λόγο το μοντέλο Penman-Monteith (Allen *et al.* 2006a) όπου για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, ET_0 , είναι απαραίτητα τα δεδομένα της μέγιστης θερμοκρασίας, ελάχιστης θερμοκρασίας, μέσου όρου σχετικής υγρασίας, της ταχύτητας του ανέμου, τις ώρες ηλιοφάνειας, του γεωγραφικού πλάτους και του γεωγραφικό μήκος. Η πρωτότυπη μορφή του μοντέλου (“Chapter 2 - FAO Penman-Monteith equation” n.d.) δίνεται από:

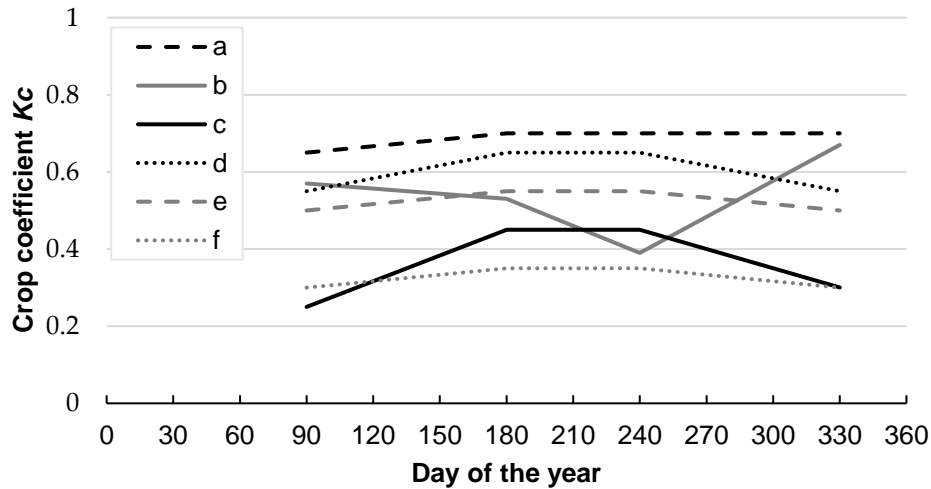
$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + p_a c_p \left(\frac{e_s - e_a}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (6)$$

όπου λ η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης ($\text{kJ m}^2 \text{s}^{-1}$), γ η ψυχρομετρική σταθερά ($\text{kPa/}^\circ\text{C}$), R_n η καθαρή ροή ακτινοβολίας στην επιφάνια του εδάφους ($\text{kJ m}^2 \text{s}^{-1}$), G η ροή θερμότητας στο έδαφος ($\text{MJ m}^{-1} \text{d}^{-1}$), p_a η πυκνότητα του αέρα σε μία δεδομένη πίεση (kg m^{-3}), c_p η ειδική θερμοχωρητικότητα ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), $e_s - e_a$ το έλλειμμα πίεσης υδρατμών (kPa), Η κλίση της καμπύλης κορεσμού υδρατμών της ατμόσφαιρας εκφράζεται ως Δ ($\text{kPa }^\circ\text{C}^{-1}$), ενώ r_s και r_a είναι η

επιφανειακή και αεροδυναμική αντίσταση, αντίστοιχα ($s\ m^{-1}$). Όμως, υπό συνθήκες έλλειψης δεδομένων, όπως αυτές που συχνά απαντώνται στην Ελλάδα και στην Κρήτη, εμπειρικές σχέσεις όπως αυτή των Blaney και Ciddle (Allen 2000a) μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν (Steduto *et al.* 2009).

$$ET_0 = \xi(0,46 \times T + 8,13) \quad (7)$$

όπου η θερμοκρασία T [$^{\circ}C$] είναι η μέση ημερήσια και ξ η μέση ποσοστιαία ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία του έτους σε ώρες. Ο φυτικός συντελεστής K_c μπορεί είτε να υπολογιστεί πειραματικά είτε να βρεθεί σε βάσεις δεδομένων (Akhter *et al.* 2003; Istanbuluoglu 2009; Kırkorir *et al.* 2002; Lovelli *et al.* 2007; Porona *et al.* 2006), σε κάθε περίπτωση δεν είναι σταθερή αλλά αλλάζει βάση συνθηκών. Για παράδειγμα οι απαιτήσεις εξατμισοδιαπνοής της ελιάς (ή της άρδευσης αυτής) υπολογίζονται από τον Απρίλιο έως τον Νοέμβριο (σε ημέρες χρόνου την 90^η έως την 330^η) και εξαρτάται από την διαχείριση της καλλιέργειας, την ποικιλία και την φαινολογία της, με τις τιμές της να μπορούν να διαμορφωθούν όπως εμφανίζονται στην Διάγραμμα 1.



Διάγραμμα 1: τιμές από διάφορες πηγές a) [15], b)[47], c) HMA 1992, d)[48] - Πυκνής καλλιέργειας, e) [48] - Μέτριας πυκνότητας, f) [48] - χαμηλής πυκνότητας/νεαρά.

Η τιμή του συντελεστή υδατικού καταπόνηση K_s ποικίλει ανά ημέρα ανάμεσα στο 0 και 1 ανάλογα της υγρασίας εδάφους θ [m^3/m^3]:

$$K_s = \frac{\theta - \theta_w}{(1 - p)(\theta_{fc} - \theta_w)} \quad (8)$$

Όπου θ_{FC} [m^3/m^3] και θ_{PWP} [m^3/m^3] είναι η υδατοϊκανότητα και το σημείο μόνιμης μάρανσης του εδάφους αντίστοιχα. Η p αντιστοιχεί στην υγρασία του εδάφους που μπορεί να είναι δυναμικά διαθέσιμη στη ρίζα σε ένα δεδομένο βάθος Z_r πριν το φυτό αρχίσει να υφίσταται υδατικό καταπόνηση. Η ημερήσια εδαφική υγρασία $\theta(t)$ μπορεί να εκτιμηθεί κάνοντας χρήση ενός απλού μοντέλου όπου παραλείπει την απορροή και τα υπόγεια νερά:

$$\theta(t)Z_r = \theta(t-1)Z_r + P(t) + I(t) - ET_c(t), \quad (9)$$

Καθημερινά, η περιεκτικότητα σε εδαφική υγρασία $\theta(t)$, πέραν της υδατοϊκανότητας θ_{FC} , διαρρέει βαθύτερα της ριζόσφαιρας, όπου πλέον δεν είναι δυνατό για τα φυτά να απομυζήσουν πέραν του σημείου μόνιμου μαρασμού θ_{PWP} . Για αυτό το λόγο ο παραγωγός πρέπει να λαμβάνει υπόψιν του τις απαιτήσεις εξατμισοδιαπνοής ET_c στο σχέδια άρδευσης όπου ακολουθεί.

2.9 Μέθοδος διπλού φυτικού συντελεστή

Η μέθοδος διπλού φυτικού συντελεστή προτάθηκε ως μέρος της μεθόδου FAO-56 για την βελτίωση υπολογισμού της ET_c , αξιοποιώντας τον φυτικό συντελεστή βασικής καλλιέργειας και εδαφικής εξάτμισης (Allen 2000b; Allen *et al.* 2006b). Ο συντελεστής βασικής καλλιέργειας K_{cb} αντιπροσωπεύει την αναλογία της ET_c ως προς την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, ET_0 , σε περιοχές όπου το έδαφος περιέχει αρκετή υγρασία για την διατήρηση του φυτού στο μέγιστο της εξατμισοδιαπνοής του. Ο συντελεστής εδαφικής εξάτμισης (K_e) αντιστοιχεί στην εξάτμιση που συντελείται στην επιφάνια τους εδάφους. Η σχέση μεταξύ των συντελεστών είναι:

$$K_c = K_{cb} * K_s + K_e \quad (10)$$

Όπου K_c είναι ο πραγματικός φυτικός συντελεστής, K_{cb} είναι ο συντελεστής της βασικής καλλιέργειας, K_s ο συντελεστής υδατικού καταπόνηση και K_e ο συντελεστής εξάτμισης εδάφους. Ο συντελεστής αναφοράς K_{cb} εκφράζεται ως αποτέλεσμα καιρικών παραμέτρων:

$$K_{cb} = K_{cb(std)} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (11)$$

Όπου ο $K_{cb(std)}$ είναι ο συντελεστής της καλλιέργειας αναφοράς, ο U_2 είναι ο συντελεστής ανέμου σε μέση ημερήσια ταχύτητα στο ύψος των 2 μέτρων (m/s), RH_{min} είναι η μέση χαμηλή ημερήσια τιμή σχετικής υγρασίας, h αντιστοιχεί στο μέσο ύψος φυτών. Ο συντελεστής εξάτμισης του εδάφους (K_e) καθορίζεται μετά τον προσδιορισμό της εδαφικής υγρασίας:

$$K_e = \min(K_r(K_{c,max} - K_{cb}), f_{ew} \times K_{c,max}) \quad (12)$$

Όπου K_r είναι ένας αδιάστατος συντελεστής της εξάτμισης της υγρασίας του εδάφους στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους, $K_{c,max}$ είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η έπειτα από γεγονός βροχής ή άρδευσης και τέλος η f_{ew} είναι το τμήμα εκείνο του εδάφους όπου είναι εκτεθειμένο στην ατμόσφαιρα και είναι σε εκείνο όπου συντελείται η εξάτμιση.

2.9.1 Παράμετροι και Παραδοχές

Οι τιμές της ET_c , στην μέθοδο FAO-56, υπολογίζονται με βάση την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, ET_0 και την ποσότητα του νερού που διείσδυσε στο έδαφος. Οι παραδοχές που ακολουθούνται είναι ότι ένα γεγονός βροχόπτωσης θα σημειωθεί νωρίς εντός μίας ημέρας και δεν θα ακολουθήσει άρδευση αυτού. Το βάθος του εδάφους όπου είναι το σημείο εξάτμισης έχει τοποθετηθεί ανάμεσα στα 0.10 m στο πρότυπο μπορεί να το προσαρμόσει από 0.15, όπως είναι για λεπτόκοκκα εδάφη σύμφωνα με Allen 2000a. Η ολική ποσότητα εξατμισμένης υγρασίας και το διαθέσιμο νερό υπολογίζονται αυτόματα βάση της μηχανικής σύστασης του εδάφους (Allen *et al.* 1998a), Table 19). Οι τιμές των παραμέτρων καθορίζονται από τα δεδομένα όπου προσθέτει ο χρήστης στην ενότητα «Crop and soil Characteristics» του προτύπου. Για παράδειγμα, το συνολικό νερό που δύναται να εξατμιστεί από το έδαφος και το εύκολα εξατμιζόμενο υπολογίζονται ως αποτέλεσμα της υδατοϊκανότητας, σημείο μάρανσης και εδαφικού βάθους, όπου τα παραπάνω στη μηχανική του εδάφους που καθορίζεται στο πρότυπο από τον χρήστη (Allen *et al.*, 1998).

Πίνακας 1: Φυσικές ιδιότητες εδάφους (μέσες τιμές) (Allen *et al.* 1998a), Table 19).

Τύπος εδάφους	Ελαφρύ	Μέσο	Βαρύ
Χωρητικότητα κορεσμού (SC) % βάρους	25-35%	35-45%	55-65%
Υδατοϊκανότητα (FC) % βάρους	8-10%	18-26%	32-42%
Σημείο μαρασμού (WP) % βάρους	4-5%	10-14%	20-24%
SC/FC	2/1	2/1	2/1
FC/WP	2/1	1.85/1	1.75/1
Χύδην πυκνότητα	1,4-1,6 g/cm ³	1.2-1.4 g/cm ³	1-1.2 g/cm ³
Διαθέσιμη εδαφική υγρασία κατ' όγκο	6%	12%	16-20%
Διαθέσιμη υγρασία σε mm για κάθε μέτρο βάθους στο έδαφος	60 mm	120 mm	160-200 mm
Μύζηση εδάφους σε bars			
• Σε κορεσμό	0.1	0.2	0.3
• Στο σημείο μαρασμού	15.0	15.0	15.0
Χρόνος μετάβασης από κορεσμό σε υδατοϊκανότητα	18-24 ώρες	24-36 ώρες	36-89 ώρες
Ρυθμός διήθησης	25-75 mm/h	8-16 mm/h	2-6mm/h

2.10 Προσδιορισμός εξατμισοδιαπνοής

Ο προσδιορισμός της εξατμισοδιαπνοής έγινε βάση του διπλού φυτικού συντελεστή (βλ. Μέθοδος διπλού φυτικού συντελεστή) με την ET_0 να καθορίζεται από την Blaney-Criddle.

2.11 Ποσοτικοποίηση περίσσιας και ελλείματος στην άρδευση

Εκτιμάται ότι από το νερό άρδευσης που εφαρμόζεται, μόνο το 65% καταναλώνεται για τη διαπνοή της καλλιέργειας, ενώ το 8% χάνεται κατά τη μεταφορά, το 7% κατά την εφαρμογή του στον αγρό και το 20% σε εξάτμιση (Chartzoulakis 2011). Πέραν των απωλειών αυτών, σε μια πρόσφατη μελέτη τους σε δενδρώδεις καλλιέργειες, οι (Phogat et al., 2014) έδειξαν ότι περίπου 34% του εφαρμοζόμενου αρδευτικού ύδατος στράγγιζε κάτω από τη ζώνη του ριζικού συστήματος παρόλο που οι αρδευτικές ανάγκες είχαν υπολογιστεί με βάση την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας. Παρόμοιες πρόσφατες μελέτες (Egea et al. 2016) δείχνουν ότι ο προσδιορισμός βέλτιστων τεχνικών άρδευσης και η βελτιστοποίηση του προγραμματισμού της αποτελούν σημαντικούς παράγοντες για την εξοικονόμηση αρδευτικού ύδατος.

Εδώ κάνουμε την παραδοχή ότι οι απώλειες λόγω υπερ-άρδευσης I_{over} μπορούν να ποσοτικοποιηθούν χρησιμοποιώντας την εξίσωση (13) ενώ του ελλείματος άρδευσης I_{under} με την εξίσωση (14):

$$I_{over} = \begin{cases} ET_R - ET_C, & ET_R - ET_C > 0 \\ 0, & ET_R - ET_C \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$I_{under} = \begin{cases} ET_R - ET_C, & ET_C - ET_R > 0 \\ 0, & ET_C - ET_R \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

όπου ET_R η πραγματική εξατμισοδιαπνοή και ET_C η άρδευση που εφαρμόστηκε .

Κατά την ελλειμματική άρδευση, είναι πιο ουσιαστικό να μιλάμε για απώλεια παραγωγής, η οποία μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την εξίσωση 4.

Έτσι, ένα πρόγραμμα σταθερής άρδευσης, βασισμένο στα πραγματικά δεδομένα, εφαρμόζεται στην ανάλυση, με μεταβολή του κάθε παράγοντα κατά $\pm 5, 10, 15$, και 20% , αφήνοντας παράλληλα τους υπόλοιπους παράγοντες στα ίδια επίπεδα.

2.12 Μηχανική σύσταση εδάφους

Η μηχανική σύσταση του εδάφους έχει σημαντικό ρόλο στις υδραυλικές διεργασίες στο σύστημα έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα, καθώς είναι αυτή που καθορίζει τη ποιότητα και την παραγωγικότητα του εδάφους. Η αναλογία περιεκτικότητας σε κοκομετρικά μεγέθη, είναι θεμελιώδους σημασίας παράμετρος σε αγρονομικές, εδαφολογικές και περιβαλλοντολογικές μελέτες, καθιστώντας την ανάλυση της απαραίτητη. Η μηχανική σύσταση του εδάφους επηρεάζει την ικανότητα του εδάφους στη συγκράτηση κι απελευθέρωση θρεπτικών. Γενικά, λεπτόκοκκα εδάφη έχουν τη τάση να συγκρατούν περισσότερη υγρασία σε σχέση με αμμώδη, λόγω της μικρότερης κοκκομετρίας τους. Η μηχανική σύσταση δεν αλλάζει εύκολα με το χρόνο και για αυτό το λόγο αντιμετωπίζεται συχνά ως κάτι σταθερό (Brady & Weil 2008).

Η συνηθέστερη διαδικασία ανάλυσης της μηχανικής σύστασης του εδάφους (Mwendwa 2022) είναι εκείνη του Bouyoucos (1962). Η μέθοδος προτάθηκε το 1927 (Bouyoucos 1927) και στηρίζεται στη στον νόμο κίνησης σφαιρικών σωμάτων στο νερό του Stokes που συσχετίζει τη μέγεθος των σωμάτων με τον ρυθμό καθίζησης τους σε έναν πυλώνα νερού. Η διαδικασία ακολουθήθηκε όπως περιγράφεται στην Sinanis (2015).

2.13 Υδραυλικά χαρακτηριστικά του εδάφους

Ο Πίνακας 1 δίνει μια γενική εκτίμηση για τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του εδάφους, ανάλογα με την μηχανική τους σύσταση. Αντίστοιχες εκτιμήσεις δίνονται από άλλες βιβλιογραφικές πηγές (Sinanis 2015) καθώς και υπολογιστικά εργαλεία όπως το ROSETTA (Schaap *et al.* 2001). Όμως οι εκτιμήσεις αυτές δεν μπορούν να έχουν την ακρίβεια μιας άμεσης μέτρησης. Άμεσες μετρήσεις υδραυλικών ιδιοτήτων πορωδών μέσων, σαν αυτή με τη χρήση πιεζόμενων κεραμικών πλακών, είναι χρονοβόρες λόγω του αργού ρυθμού με τον οποίο επιτυγχάνεται ισορροπία κάτω από χαμηλές τιμές υδατικού δυναμικού (Daliakopoulos *et al.* 2021a).

Το «Hyprop Hydraulic Properties Analyzer» (HYPROP2, Meter Group, USA) είναι ένα εναλλακτικό εργαλείο το οποίο παρέχει διάφορα πλεονεκτήματα σε σχέση με κλασικούς μεθόδους και τεχνικές για την μελέτη των υδραυλικών ιδιοτήτων. Μία από τις σημαντικότερες πτυχές του Hyprop2 (Εικόνα 2) είναι η υψηλής ανάλυσης δεδομένων που παράγονται για την υδατική συγκράτηση (κατά προσέγγιση 100 σημεία δεδομένων στο διάστημα 0-100 kPa), μέσα σε μόνο μερικές ημέρες. Παράλληλα, πέραν των καμπυλών συγκράτησης υγρασίας σε εδάφη, το Hyprop έχει χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της υδραυλικής συμπεριφοράς υποστρωμάτων (Brunetti *et al.* 2016) αλλά και σε μελέτη άρδευσης ακριβείας για τη καλλιέργεια εκτός εδάφους βασιλικού (Montesano *et al.* 2018). Ωστόσο, παρά της δυνατότητας ημιαυτόματης μέτρησης που προσφέρει

το Hyprop2, η μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης υπό συνθήκες περιβάλλοντος, απαιτεί από 2 ημέρες (άργιλος) έως 10 ημέρες (τύρφη και άμμος) (Schindler *et al.* 2010). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος θέρμανσης του δείγματος Εικόνα 2 σε σταθερές συνθήκες όπως περιγράφεται στη πηγή Daliakoroulos *et al.* 2021a.



Εικόνα 2: Το όργανο Hyprop με τις τροποποιήσεις από Daliakoroulos *et al.* 2021a

2.13.1 Προετοιμασία οργάνου

Η προετοιμασία έγινε με μικρές τροποποιήσεις στον οδηγό του HYPROP2. Αρχικά, γίνεται εξαέρωση σε απιονισμένο νερό, με χρήση αντλίας κενού, σε 0,85 bar πίεσης για 24 ώρες (Εικόνα 3, α). Έπειτα τα тенσιόμετρα και τα κεραμικά τους γεμίζονται με το νερό και αφήνονται για άλλες 24 ώρες υπό την αντλία (Εικόνα 3, β), ενώ ταυτόχρονα το δείγμα εμβαπτίζεται για το ίδιο χρονικό διάστημα στο ίδιο νερό. Με το πέρας της τρίτης ημέρας, τοποθετείται η κεφαλή στο ζυγό και συνδέεται στον υπολογισμό για την αρχή των μετρήσεων (Εικόνα 3, γ).

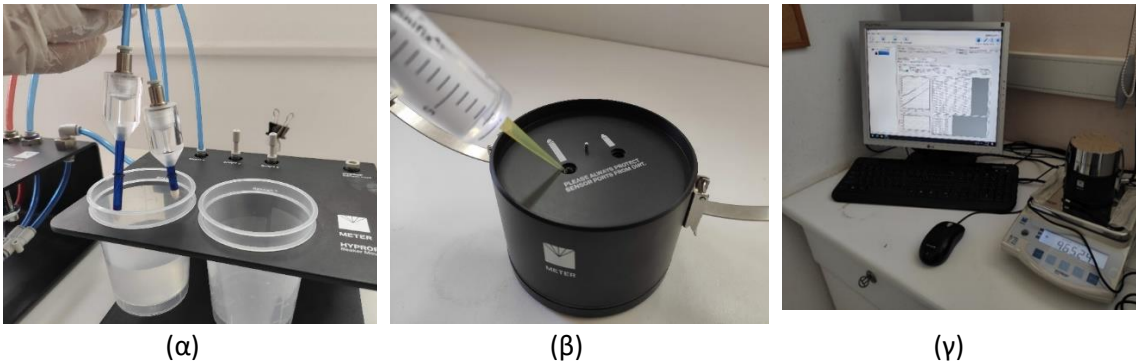
Το HYPROP2 μετρά, μέσω тенσιόμετρων την αλλαγή στο υδατικό δυναμικό και υδατικό περιεχόμενο, μετρώντας τις αλλαγές στο βάρος του δείγματος, διατηρώντας ταυτόχρονα κατάλληλες συνθήκες ξήρανσης για το δείγμα. (Daliakoroulos *et al.* 2021c; Zheng *et al.* 2018). Τέλος, προσδιορίζεται η φαινόμενη πυκνότητα και το λογισμικό «LABROS SoilView-Analysis software» (Meter Group, USA) χρησιμοποιείται για την εύρεση της κατ' όγκου περιεκτικότητα νερού στο έδαφος, θ_v , και η μέση μύζηση από τα δύο тенσιόμετρα σε κάθε χρονικό διάστημα (10 s). Για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας, υποθέτουμε, ότι η εδαφική υγρασία διαρρέει μια οριζόντια επιφάνεια που βρίσκεται ακριβώς στο μέσο της απόστασης μεταξύ των δύο тенσιόμετρων. Εδώ, μέσω του Hyprop2 έγινε καταγραφή της μεταβολής της μύζησης h [cm] σε

δύο βάθη (1,25 και 3,75 cm) για διάστημα 53 ωρών (Εικόνα 3(γ)). Στο διάστημα αυτό το καθαρό βάρος του δείγματος έφτασε τα 394,16 gr. Οι μετρήσεις βάρους και τάσης επεξεργάστηκαν στο λογισμικό HYPROP-FIT (Meter, USA) που υπολογίζει τις παραμέτρους της εξίσωσης (van Genuchten, 1980):

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (ah)^n} \right]^m \quad (15)$$

όπου θ η κατ' όγκο περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό [$L^3 L^{-3}$], θ_s [$L^3 L^{-3}$] η υγρασία κορεσμού και θ_r η υπολειμματική περιεκτικότητα σε νερό. Η παράμετρος a [cm^{-1}] είναι εμπειρική παράμετρος που προσεγγίζει το αντίστροφο ύψος μύζησης εισόδου αέρα (air-entry point) ενώ n είναι αδιάστατη εμπειρική παράμετρος που καθορίζει το σχήμα της καμπύλης του μοντέλου και $m = 1 - 1/n$. Η ποιότητα της προσαρμογής του μοντέλου με τα μετρημένα δεδομένα μπορεί να αξιολογηθεί με τη βοήθεια του κριτηρίου τη τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (root mean square error) RMSE που δίνεται από τη σχέση:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (16)$$



Εικόνα 3: Προετοιμασία οργάνου.

2.14 Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό της επιρροής των κλιματικών παραγόντων της εξατμισοδιαπνοής (Irmak *et al.* 2006b; McCuen 1974; Ndiaye *et al.* 2020; Zhao *et al.* 2014). Οι παράγοντες που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την μελέτη είναι: 1. Το ύψος του φυτού (Crop height), 2. Το ολικό διαθέσιμο νερό (TAW), 3. Το βάθος του ριζικού συστήματος (Root Depth), 3. Ο αρχικός φυτικός συντελεστής (Kcb ini), 4. Ο φυτικός

συντελεστής για τα μέσα της καλλιεργητικής περιόδου ($K_{cb\ mid}$), 5. Ο φυτικός συντελεστής για τα τέλη της καλλιεργητικής περιόδου ($K_{cb\ end}$), 6. Μέσος όρος σχετικής υγρασίας (Humidity), 7. Μέση θερμοκρασία της καλλιεργητικής περιόδου (Temp), 8. Η μέση ταχύτητα ανέμου για την καλλιεργητική περίοδο (Wind) και 9. Το σύνολο των κατακρημνίσεων που σημειώθηκαν κατά τη καλλιεργητική περίοδο. Η ευαισθησία της ET_0 , στους παράγοντες του μοντέλου, υπολογίστηκε για κάθε παράγοντα ξεχωριστά μεταβάλλοντας τον παράγοντα $\pm 5, 10, 15,$ και 20% , αφήνοντας παράλληλα τους υπόλοιπους παράγοντες στα ίδια επίπεδα. Η ίδια μέθοδος εφαρμόστηκε και στον υπολογισμό της παραγωγής του φυτού αλλάζοντας τον παράγοντα ET_0 με εκείνον της εξίσωσης αποδοτικότητας άρδευσης, Y_a (εξίσωση 2). Ένας συντελεστής αποδόθηκε σε κάθε συντελεστή σύμφωνα με την επιρροή του σύμφωνα με την εξίσωση (Ndiaye *et al.* 2020):

$$S_{vi} = \frac{\partial ET_0}{\partial vi} \frac{vi}{ET_0} \quad (2)$$

$$S_{vi} = \frac{\partial Y_a}{\partial vi} \frac{vi}{Y_a} \quad (3)$$

Όπου vi είναι η υπό εξέταση παράμετρος και ∂vi η διαφορά ανάμεσα στις τιμές. Αυτός ο συντελεστής δείχνει το ποσοστό της αλλαγής στην εξατμισοδιαπνοή και της παραγωγής, αντίστοιχα, που φέρει η ποσοστιαία αλλαγή της κλιματικής παραμέτρου. Το S_{vi} είναι ο αδιάστατος σχετικός συντελεστής ευαισθησίας, είναι επί της ουσίας ένας θετικός/αρνητικός συντελεστής που υποδεικνύει αν η ET_0 ή η Y_a θα μειωθεί ή θα αυξηθεί εφόσον αυξηθεί ο υπό εξέταση παράγοντας. Όσο μεγαλύτερος ο συντελεστής, τόσο μεγαλύτερη και η επιρροή του στην ET_0 και Y_a .

3 Πειραματική εφαρμογή

3.1 Ελαιώνας αγροκτήματος

Ο πειραματικός αγρός αποτελείται από 5 σειρές των 9 δέντρων, οι οποίες είναι υδραυλικά απομονωμένες με πλαστική μεμβράνη μέχρι το βάθος των 2 m μειώνοντας (ουσιαστικά μηδενίζοντας) την οποιαδήποτε επιρροή στην άρδευση μεταξύ των σειρών. Το αρδευτικό δίκτυο που σχεδιάστηκε ελέγχεται από 4 ηλεκτροβάνες που λειτουργούν από το σύστημα που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του ερευνητικού έργου DRIP (Daliakopoulos *et al.* 2020b; Petousi *et al.* 2018). Στην παρούσα μελέτη αξιοποιήθηκαν 3 από τις σειρές του ελαιώνα. Ενώ οι επεμβάσεις άρδευσης πραγματοποιήθηκαν στις 25/05, 03/07, 10/08 και 29/08.



Εικόνα 4: Νοτιοδυτική άποψη του πειραματικού ελαιώνα



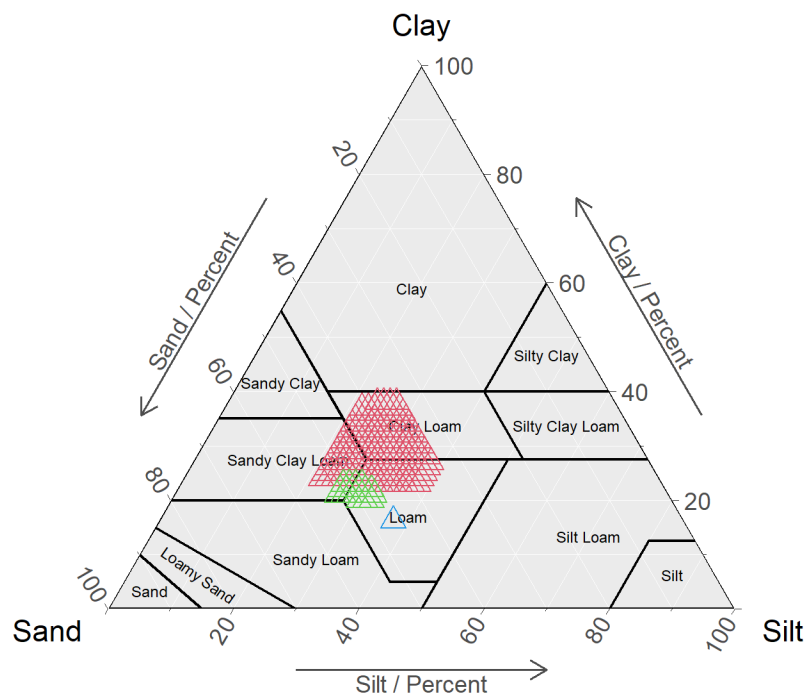
Εικόνα 5: Αρδευτικό δίκτυο πειραματικού ελαιώνα

3.2 Έδαφος αγρού

3.2.1 Μηχανική σύσταση εδάφους

Κατά τη διάρκεια του ερευνητικού προγράμματος «DRIP», 2019-2021, διεξήχθησαν 2 μετρήσεις μηχανικής σύστασης του εδάφους, ενώ παλαιότερα για τον ίδιο ελαιώνα είχε μετρηθεί από τους Petousi et al. (2015). Για τη λήψης δείγματος, πραγματοποιήθηκαν 3 επαναλήψεις ανά μεταχείριση και στις 3 μετρήσεις. Η κοκκομετρική ανάλυση του εδάφους πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Bouyoucos. Τα αποτελέσματα της έδωσαν για την ογκομετρία της άμμου 35% έως 54%, για της ιλύς 22% έως 38% και της αργίλου 20% έως 30%. Έπειτα, σύμφωνα με το τρίγωνο της μηχανικής σύστασης και ακολουθώντας την μέθοδο αντιστοίχισης, το έδαφος κατηγοριοποιήθηκε και για τις 3 μετρήσεις (Εικόνα 6).

Σύμφωνα με τις μετρήσεις, παρόλο που ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία στη λήψη δείγματος, παρατηρείται μια ανομοιογένεια (Πίνακας 2) η οποία μπορεί να οφείλεται ή σε διαφορετικό βάθος κατά την λήψη ή σε σημεία να ήταν ανομοιογενές το έδαφος. Οι μετρήσεις έδειξαν κοινό σημείο στην περιοχή του πηλού (βλ. Εικόνα 6), όπως και χαρακτηρίστηκε το έδαφος μας.



Εικόνα 6: Τρίγωνο εδαφικής σύστασης. Με κόκκινο χρώμα τα δείγματα του έτους 2015, πράσινο του 2019 και μπλε από τη δημοσίευση του 2020

Στον Πίνακα 2 μπορούν να φανούν τα αποτελέσματα της κάθε μέτρησης ξεχωριστά.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα μηχανικής σύστασης εδάφους για κάθε μέτρηση

Χρόνος	Άμμος	Ίλος	Αργίλος
2015	42.6%	34.4%	23%
2019	35% - 54%	22% - 38%	23% - 30%
2020	47% - 53%	26% - 32%	20% - 23%

3.2.2 Υδραυλικά χαρακτηριστικά

Με βάση την μηχανική σύσταση του εδάφους και τον πίνακα το μέσο έδαφος του αγρού έχει υδατοϊκανότητα 18-26% και σημείο μόνιμης μάρανσης 10-14%. Χρησιμοποιώντας τους πίνακες των Allen et al. 1998, η εκτίμηση της υδατοϊκανότητας είναι τόσο και του σημείου μόνιμου μαρασμού. Αντίστοιχα χρησιμοποιώντας το ROSSETA.

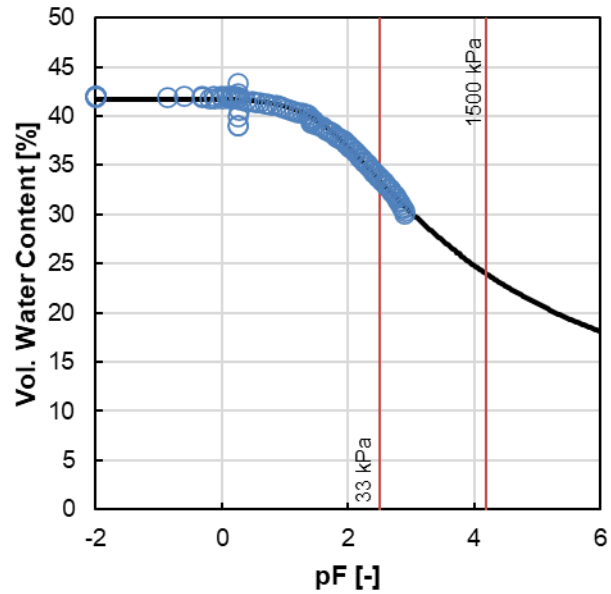
Χρησιμοποιώντας το λογισμικό HYPROP-FIT υπολογίστηκαν αυτόματα οι παράμετροι της Εξίσωσης 1, όπως δείχνει ο Πίνακας 3, και στη συνέχεια υπολογίστηκε η σχέση που δίνει την εδαφική υγρασία σε σχέση με τη μύζηση:

$$\theta(h) = \left[\frac{0,307}{1 + (0,0257 \cdot h)^{1,144}} \right]^{0,126} \quad (15)$$

Πίνακας 3:

Παράμετρος	Τιμή	2.5%	97.5%
a [cm^{-1}]	0.0257	0.0195	0.0338
n [-]	1.144	1.046	1.447
θ_r [$\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$]	0.110	-0.161	0.381
θ_s [$\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$]	0.417	0.415	0.419

Η Εικόνα 7 δείχνει την καμπύλη της Εξίσωσης 3 (γκρι γραμμή) καθώς και τα ζεύγη τιμών που καταγράφηκαν από τη συσκευή HYPROP. Η καμπύλη της Εξίσωσης 3 εμφανίζει $\text{RMSE} = 0,52\%$ υγρασία κατ' όγκο. Από την μορφή της καμπύλης, και ειδικότερα από το επίπεδο τμήμα της στις τιμές κοντά στον κορεσμό, συνάγουμε ότι το δείγμα έχει χαρακτηριστική συμπεριφορά πηλώδους εδάφους με ασθενή συσσωματώματα.



Εικόνα 7: Καμπύλη της Εξίσωσης 3 (μαύρη γραμμή) και τα ζεύγη τιμών που καταγράφηκαν από τη συσκευή HYPROP (μπλε κύκλοι). Οι κόκκινες γραμμές δείχνουν χαρακτηριστικές τιμές πίεσης.

Ο Πίνακας 4 δίνει συνοπτικά τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων από τον Πίνακα 1 και το λογισμικό ROSETTA, καθώς και των μετρήσεων από το HYPROP.

Πίνακας 4: Τιμές της εδαφικής υγρασίας για χαρακτηριστικές τιμές μύζησης, όπως υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την βασική μέθοδο του HYPROP-FIT (VWC).

Ιδιότητα	Πίνακας 1	ROSETTA	HYPROP
Υδατοϊκανότητα	18-26%	31.3-36.5%	33.50%
Σημείο μόνιμης μάρανσης	10-14%	17.6- 21.9%	23.95%

3.3 Καταγραφή μετεωρολογικών συνθηκών

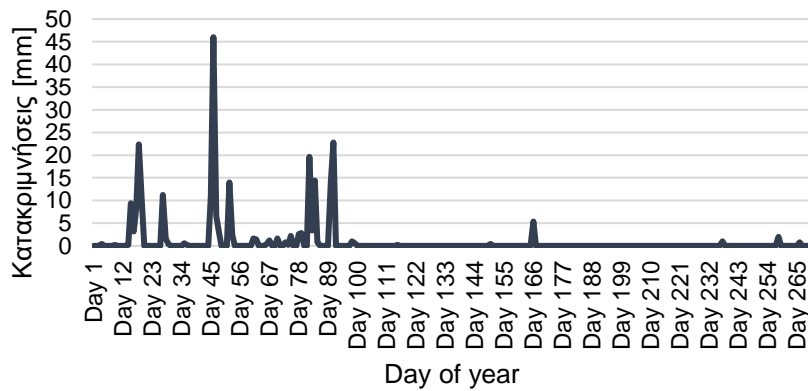
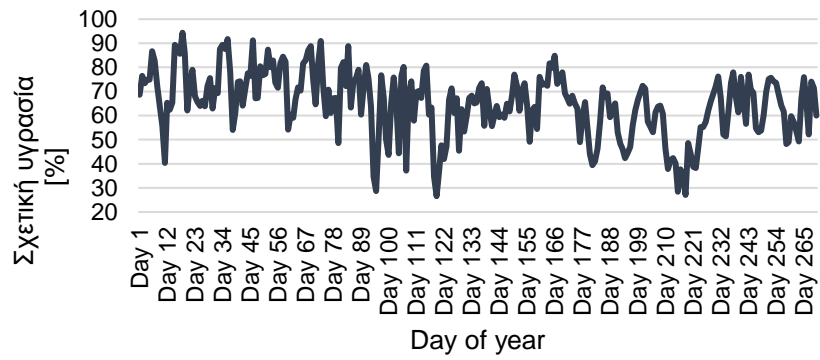
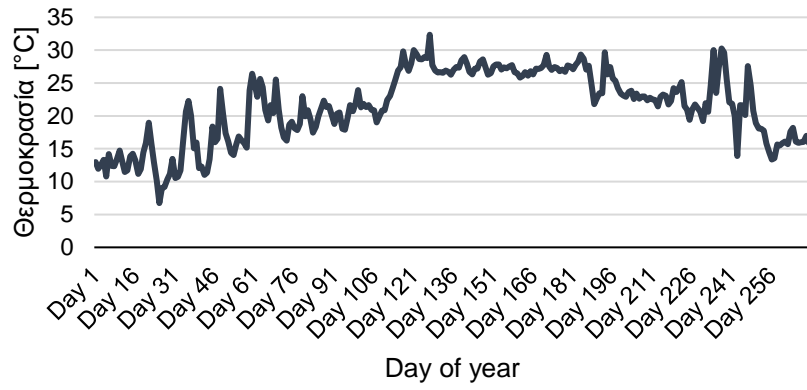
Τα κλιματικά δεδομένα καταγράφηκαν σε σταθμό εντός του Αγροκτήματος του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου. Ο κλιματικός σταθμός ήταν ο Vantage Pro2 (Davis Instruments, USA) ο οποίος μπορεί να φανεί στην Εικόνα 8.

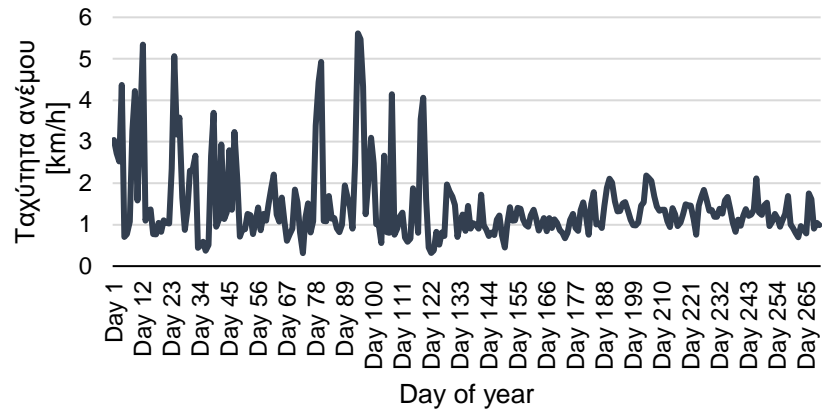


Εικόνα 8: Vantage Pro2 (Davis Instruments, USA)

3.3.1 Μετεωρολογικές συνθήκες

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η μέση θερμοκρασία ήταν 21,4 βαθμοί κελσίου, η σχετική υγρασία είχε μέσω όρο 64.9% ενώ το σύνολο των κατακρημνίσεων ήταν 253mm. Αξίζει να σημειωθεί ότι η σχεδόν το σύνολο της βροχόπτωσης ήταν κατά τη περίοδο της καρπόδεσης και όχι της ωρίμανσης τους άρα είχε και ελάχιστη επιρροή στις άρδευσης μας. Τα παραπάνω παρουσιάζονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στα γραφήματα της Εικόνα 9.





Εικόνα 9: Περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη διάρκεια του πειράματος

3.4 Σενάρια

Σχετικά με τα σενάρια, έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

1. Το ύψος του φυτού (Crop height) μετρήθηκε με χρήση μέτρου και βρέθηκε το μέσο όρο στα 4 μέτρα.
2. Το ολικό διαθέσιμο νερό (TAW) είναι η διαφορά FC-PWP (Allen et al. 1998), 25% και 12% αντίστοιχα
3. Το βάθος του ριζικού συστήματος (Root Depth), μετρήθηκε κατά τη διαδικασία εργασιών που προηγήθηκε του πειράματος και βρέθηκε στο μέσο όρο του 1 μέτρου.
4. Ο φυτικός συντελεστής (K_{cb} ini), ο οποίος πάρθηκε από τους Allen et al. 1998
5. Μέσος όρος σχετικής υγρασίας (Humidity), κάθε μία ώρα από τον κλιματικό σταθμό
6. Μέση θερμοκρασία της καλλιεργητικής περιόδου (Temp), κάθε μία ώρα από τον κλιματικό σταθμό
7. Η μέση ταχύτητα ανέμου για την καλλιεργητική περίοδο (Wind), κάθε μία ώρα από τον κλιματικό σταθμό
και
8. Το σύνολο των κατακρημνίσεων που σημειώθηκαν κατά τη καλλιεργητική περίοδο (rain).

3.5 Φυσιολογικές Μετρήσεις

3.5.1 Σχετικό υδατικό περιεχόμενο

Το υδατικό δυναμικό ως προσέγγιση της απόδοσης των υδατικών σχέσεων ανάμεσα σε έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα, δεν συμπεριλαμβάνει την ωσμωτική προσαρμογή. Η ωσμωτική προσαρμογή είναι ο μηχανισμός μέσω του οποίου η υγρασία συντηρείται εντός του κυττάρου. Η μέτρηση του σχετικού υδατικού περιεχομένου (RCW) συμπεριλαμβάνει και την ωσμωτική προσαρμογή, μιας και ο ιστός εμβαπτίζεται για την επανενυδάτωση του. Έτσι, το σχετικό υδατικό περιεχόμενο (RCW), είναι πιθανώς η πιο κατάλληλη μέτρηση της υδατικής κατάστασης του φυτού όσο αφορά τις επιπτώσεις έλλειψης υγρασίας, σε κυτταρικό επίπεδο. Για την ίδια καλλιέργεια 2 διαφορετικές μεταχειρίσεις μπορούν να έχουν διαφορετικό υδατικό περιεχόμενο φύλλων. Έτσι η RWC είναι κατάλληλη και για την υδατική κατάσταση των κυττάρων και για την απόδοση του αποτελέσματος της ωσμωτικής προσαρμογής (Gimenez *et al.* 2004; Giménez *et al.* 2013).

Το σχετικό υδατικό περιεχόμενο είναι το κλάσμα του νερού που περιέχεται σε έναν φρέσκο φυτικό ιστό μετρούμενο σε βάρος. Λόγω της μεγάλης διακύμανσης που μπορεί να έχει, το ολικό νερό, ανάμεσα σε διαφορετικούς ιστούς και όργανα του φυτού, η RWC, κανονικοποιείται για τη χρήση της. Η RWC είναι το περιεχόμενο σε νερό ενός φυτικού ιστού ή φυτικού οργάνου σε σχέση με το μέγιστο περιεχόμενο αυτού όταν βρίσκεται σε κορεσμό. Η RWC είναι μία μέτρηση όπου δείχνει το βαθμό ενυδάτωσης του φυτικού ιστού έχοντας έτσι σχέση με πολλές φυσιολογικές διαδικασίες του φυτού (Giménez *et al.* 2013).

Το σχετικό υδατικό περιεχόμενο εκφράζεται από την εξίσωση :

$$RCW = \frac{FW - DW}{SFW - DW} \quad (17)$$

Όπου FW [gr] είναι το νωπό βάρος του ιστού, DW [gr] το ξηρό βάρος και το SFW [gr] το βάρος του κορεσμένου ιστού. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα περισσότερα σφάλματα κατά τον υπολογισμό του RWC οφείλονται σε εσφαλμένη εκτίμηση του SFW . Για παράδειγμα, η μέθοδος «floating rehydration technique» όπου ο δίσκος επιπλέει σε νερό, μέσα σε τρυβλίο, αυξάνει τα ποσοστά σφάλματος στην ενυδάτωση και μπορεί να οδηγήσει σε υποεκτίμηση της RCW . Ο λόγος είναι ότι οι ιστοί που έχουν υποβληθεί σε σοβαρό υδατικό καταπόνηση, μπορεί να υποστούν υπερκορεσμό κατά την επανενυδάτωση (Arndt *et al.* 2015a). Είναι πιθανόν να συμβαίνει λόγω της μεγαλύτερης έκθεσης, κατά εμβαδό των ιστών, στο νερό ή και λόγω των ανοιχτών τομών του ιστού όπου το νερό μπορεί να εισχωρήσει (Barrs & Weatherley 1962). Μία άλλη πιθανή υπόθεση, στο γιατί μπορεί να συμβαίνει αυτό, είναι ενεργοποίηση πρωτεϊνών, εκλεκτικές σε μόρια νερού, που οδηγούν το νερό εντός του κυττάρου, όπως έχει αποδειχθεί σε διάφορα είδη δέντρων (Ben Baaziz *et al.* 2012). Για να αποφευχθεί το πρόβλημα αυτό, οι (Sade *et al.* 2015) περιγράφουν την «μεθοδολογία όρθιου φύλλου» η οποία έχει αποδειχθεί ότι παρέχει τα μικρότερα σφάλματα στον υπολογισμό του RWC (Arndt *et al.* 2015b).

Από κάθε παρέμβαση επιλέχθηκαν τα 4 μεσαία ελαιόδεντρα από όπου συλλέχθηκαν 5 φύλλα, από βλαστό προηγούμενου έτους, από κάθε δέντρο (Εικόνα 10). Τα φύλλα μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο εντός 10 λεπτών από την κοπή τους και ζυγίστηκαν. Έπειτα τοποθετήθηκαν σε σακούλες τροφίμων σε όρθια θέση και προστέθηκε απιονισμένο νερό έως ότου καλύφθηκε ο μίσχος.



Εικόνα 10: Δείγματα φύλλων

3.5.2 Στοματική αγωγιμότητα

Η στοματική αγωγιμότητα ($\text{mmols m}^{-2} \text{s}^{-1}$) είναι μέτρηση του βαθμού ανοίγματος των στομάτων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένδειξη της υδατικής κατάστασης του φυτού. Η στοματική αγωγιμότητα παρουσιάζεται μέσω μίας ανατροφοδοτούμενης διαδικασίας. Μείωση σε mmols σημαίνει μείωση στην διαπνοή, που επιφέρει κλείσιμο των στομάτων, μειώνοντας περαιτέρω τα mmols (Gimenez *et al.* 2004; Giménez *et al.* 2013).

Η στοματική αγωγιμότητα ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) μετράται με τη χρήση πορόμετρων και είναι ο ρυθμός εισροής CO_2 ή εκροής υδρατμών από τα στόματα των φύλλων. Ένα πορόμετρο μετρά τη στοματική αγωγιμότητα ή την αντίσταση. Ένας θάλαμος περικλείει ένα μέρος ενός φύλλου. Το φύλλο, χάνοντας υδρατμούς, αυξάνει την υγρασία στο θάλαμο. Οι μετρήσεις ενός πορόμετρου λοιπόν, εξαρτώνται από τη διαπνοή, που η εξαρτάται από τη διαθέσιμη υγρασία και την ακτινοβολία. Έτσι, οι μετρήσεις ενός πορόμετρου πρέπει να είναι πάντα συγκριτικές με φυτά όπου βρίσκονται υπό συνθήκες περίσσιας υγρασίας (Vos & Haverkort 2007).

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν λίγες ημέρες πριν τη συγκομιδή (20/10/21, 12:00-13:00) παίρνοντας 3 μετρήσεις από τα 4 μεσαία δέντρα κάθε επέμβασης.

3.5.3 Μέτρηση φθορισμού χλωροφύλλης

Η αρχή της μέτρησης φθορισμού χλωροφύλλης, στηρίζεται στην ενέργεια που παρέχεται στα μόρια χλωροφύλλης, με τη μορφή φωτός, που μπορεί να πάρει 3 οδούς. Η πρώτη είναι να μετατραπεί σε ενέργεια για τη φωτοσύνθεση (φωτοχημική), η δεύτερη ότι η περίσσια ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε θερμοκρασία και η τρίτη να επανεκπεμφθεί ως φως (φθορισμός χλωροφύλλης). Οι τρεις αυτές μετατροπές, που μπορεί να υποστεί η εισερχόμενη ενέργεια, σε

μορφή φωτός, λειτουργούν ανταγωνιστικά μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι όσο αυξάνεται, σε ποσοστό η μία, μειώνονται οι άλλες. Κατά τα παραπάνω, μπορούμε να εξάγουμε πληροφορία για τις αλλαγές στην αποτελεσματικότητα της φωτοχημείας της χλωροφύλλης και της παραγωγής θερμότητας, μετρώντας τον φθορισμό της χλωροφύλλης (Maxwell & Johnson 2000).

Η φωτοσυνθετική ικανότητα (F_v/F_m) είναι η αναλογία ανάμεσα στον κυμαινόμενο φθορισμό (F_v) και το μέγιστο φθορισμό (F_m), όταν μία ακτίνα φωτός δεδομένης έντασης διαπερνά τον φυτικό ιστό (Hájek & Beckett 2008). Η μέτρηση της φωτοσυνθετικής ικανότητας (F_v/F_m) είναι αναγνωρισμένη ένδειξη της μέγιστης κβαντικής απόδοσης της χλωροφύλλης του φωτοσυστήματος 2 (Baker & Oxborough 2007; Hájek & Beckett 2008). Όργανα όπως OS30p (Opti-Sciences, Hudson, New Hampshire, U.S.A), όπου χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την έρευνα, μετρούν το φθορισμό της χλωροφύλλης.

Από κάθε επέμβαση έγιναν δεκαέξι (16) μετρήσεις από τέσσερα (4) δέντρα, σε 3 διαφορετικές περιόδους.

3.6 Συγκομιδή

Στο πείραμα μέγεθος σύγκρισης ήταν οι συνολική απόδοση, δηλαδή το βάρος καρπού ανά ελαιόδεντρο, για κάθε γραμμή (Εικόνα 11).



Εικόνα 11: Συγκομιδή

Η συλλογή ελαιοκάρπου γίνεται συνήθως από το δεύτερο δεκαπενθήμερο του Νοεμβρίου έως τον Ιανουάριο. Στο πείραμα η συλλογή πραγματοποιήθηκε Νοέμβριο χειρονακτικά και το δείγμα

μεταφέρθηκε σε ζυγαριά ακριβείας για την εκτίμηση της συνολικής απόδοσης ελαιοκάρπου ανά επέμβαση.

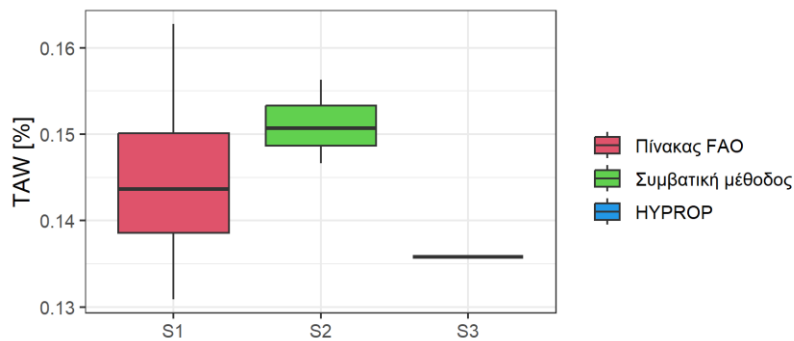
3.7 Στατιστική ανάλυση

Για τη σύγκριση των φυσιολογικών παραμέτρων, μεταξύ των επεμβάσεων, εφαρμόστηκε Ανάλυση Διακύμανσης κατά ένα παράγοντα (one-way ANOVA). Η ανάλυση έγινε στο περιβάλλον RStudio (“Download RStudio | The Popular Open-Source IDE from Posit” n.d.) το στατιστικό λογισμικό R (R Development Core Team 2017) κάνοντας χρήση των πακέτων *dplyr* (Hadley *et al.* 2023), *multcompView* (Graves *et al.* 2023) και *ggplot2* (Wickham 2016). Για την απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης χρησιμοποιήθηκε το όριο 0.05 για την τιμή της *p* ενώ, όταν η ANOVA εντόπιζε στατιστικά σημαντικές διαφορές, γινόταν εφαρμογή της δοκιμής Tukey Honesty Significance Difference.

4 Αποτελέσματα

4.1 Υπολογισμός άρδευσης

Ο υπολογισμός της άρδευσης έγινε βάση τη μέθοδο διπλού συντελεστή, σε υπολογιστικό φύλλο excel. Διαμορφώθηκε στα 316 mm σε 4 δόσεις των 78mm και μία των 3.6 στο σύνολο για όλη τη περίοδο καλλιέργειας και με τις πραγματικές συνθήκες που είχαν καταγραφεί κατά τη διάρκεια του πειράματος. Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του εδάφους με βάση τις τιμές που δείχνει ο Πίνακας 4, όπως υπολογίστηκαν από το λογισμικό ROSSETA.



Εικόνα 12: Υδραυλικά χαρακτηριστικά του εδάφους με βάση τις τιμές που δείχνει ο Πίνακας 4, όπως υπολογίστηκαν από το λογισμικό ROSSETA.

4.2 Ανάλυση ευαισθησίας

4.2.1 Συντελεστές ευαισθησίας

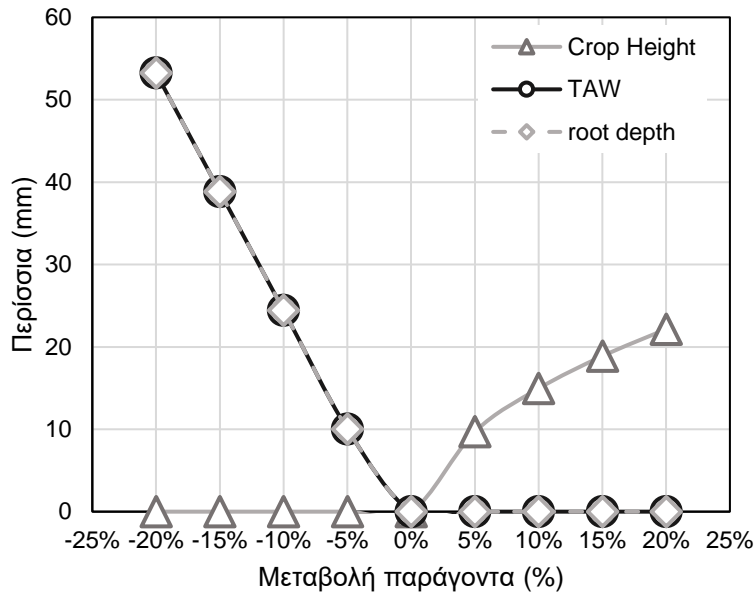
Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τους μέσους όρους των συντελεστών ευαισθησίας για κάθε παράγοντα που εξετάστηκε. Στην στήλη με κεφαλίδα « S_{vi} » παρουσιάζονται για την ανάλυση ευαισθησίας στην άρδευση, ενώ σε εκείνη με κεφαλίδα « Y_{under} » αυτά για την ανάλυση ευαισθησίας στην παραγωγή σύμφωνα με τις εξισώσεις 2 και 3 αντίστοιχα.

Πίνακας 5: Μέσος όρος συντελεστών ευαισθησίας.

Parameter	S_{vi}	Y_{under}
Crop Height	-0.014	0.064
Total Available Water	0.000	0.058
Root Depth	0.000	0.058
Kcb ini	0.157	-0.022
Kcb mid	0.690	-0.272
Kcb end	0.713	-0.099
Temp	0.529	-0.042
Wind	0.050	0.000
Humidity	-0.814	-0.154
Precipitation	-0.036	0.000

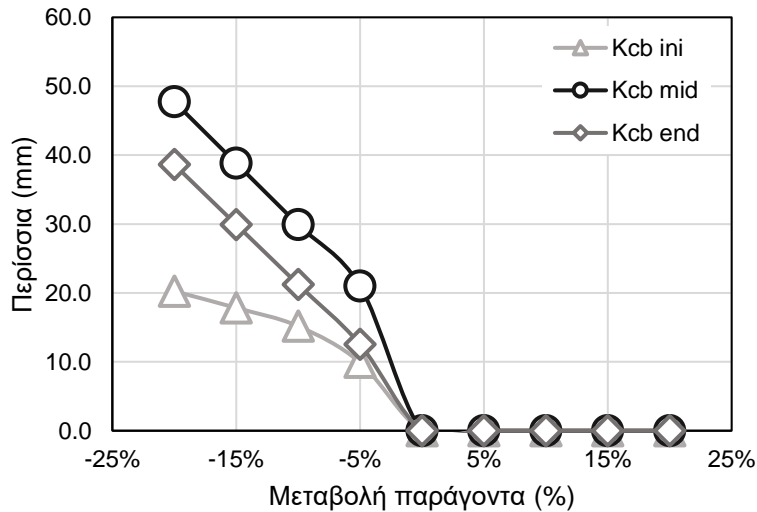
4.2.2 Πληθωρική άρδευση

Στην πληθωρική άρδευση για το σύστημα του εδάφους (Εικόνα 13), το crop height (ύψος φυτού) δεν παρουσιάζει περίσσια άρδευσης στις αρνητικές τιμές μεταβολής του. Αντίθετα, για τις θετικές, η μεταβολή του κατά +5% αντιστοιχεί σε 9.7mm περίσσιας και φτάνει στα 22.2 mm για μεταβολή +20%. Το TAW (ολικό διαθέσιμο νερό) δεν παρουσιάζει περίσσια άρδευσης στις θετικές τιμές μεταβολής του. Αντίθετα, για τις αρνητικές, η μεταβολή του κατά -5% αντιστοιχεί σε 10mm περίσσιας και φτάνει στα 53.2 mm για μεταβολή -20%. Το root depth (βάθος ρίζας) δεν παρουσιάζει περίσσια άρδευσης στις θετικές τιμές μεταβολής του. Αντίθετα, για τις αρνητικές, η μεταβολή του κατά -5% αντιστοιχεί σε 10mm περίσσιας και φτάνει στα 53.2 mm για μεταβολή -20%.



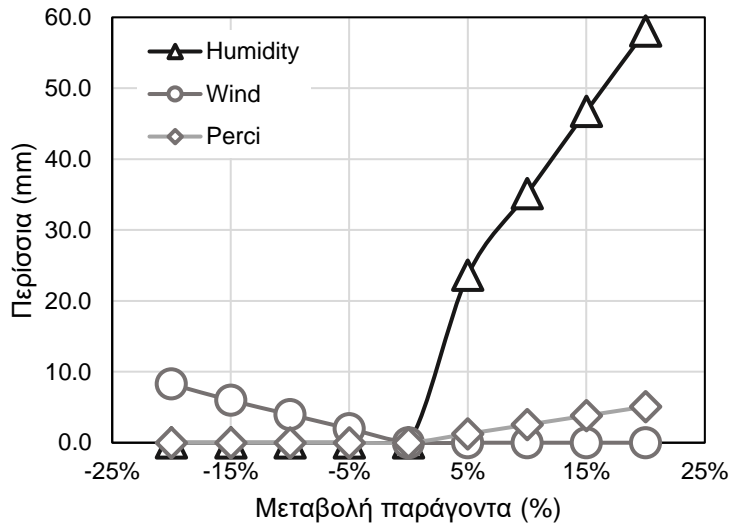
Εικόνα 13: Περίσσια άρδευσης σύμφωνα με τη μεταβολή παραγόντων στο σύστημα εδάφους

Στην πληθωρική άρδευση για το σύστημα του φυτού (Εικόνα 14), το $K_{cb\ ini}$ (φυτικός συντελεστής για την αρχή της καλλιεργητικής περιόδου) δεν παρουσιάζει περίσσια άρδευσης στις θετικές τιμές μεταβολής του. Αντίθετα, για τις αρνητικές, η μεταβολή του κατά -5% αντιστοιχεί σε 9.9 mm περίσσιας και φτάνει στα 20,2 mm για μεταβολή -20%. Το $K_{cb\ mid}$ (φυτικός συντελεστής για τα μέσα της καλλιεργητικής περιόδου) δεν παρουσιάζει περίσσια άρδευσης στις θετικές τιμές μεταβολής του. Αντίθετα, για τις αρνητικές, η μεταβολή του κατά -5% αντιστοιχεί σε 21.0 mm περίσσιας και φτάνει στα 47.7 για μεταβολή -20%. Το $K_{cb\ end}$ (φυτικός συντελεστής για τα μέσα της καλλιεργητικής περιόδου) δεν παρουσιάζει περίσσια άρδευσης στις θετικές τιμές μεταβολής του. Αντίθετα, για τις αρνητικές, η μεταβολή του κατά -5% αντιστοιχεί σε 12.5 mm περίσσιας και φτάνει στα 38.6mm για μεταβολή -20%.

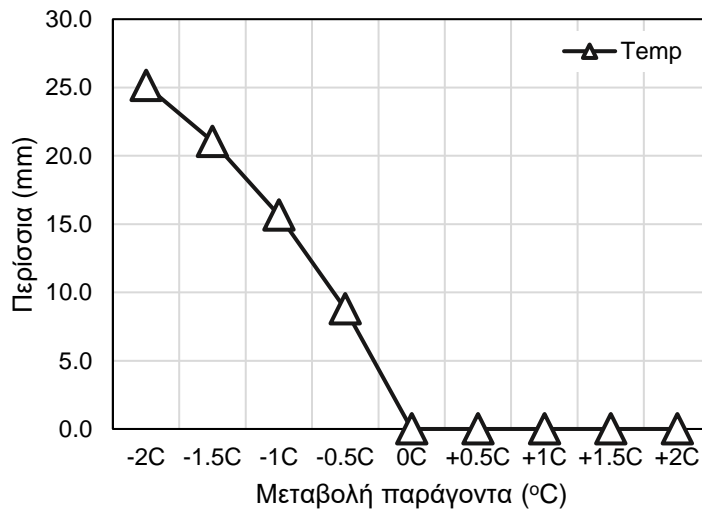


Εικόνα 14: Περίσσια άρδευσης σύμφωνα με τη μεταβολή παραγόντων στο σύστημα φυτού

Στην πληθωρική άρδευση για το σύστημα του περιβάλλοντος (Εικόνα 15 (α)). Ο μέσος όρος σχετικής υγρασίας (Humidity) δεν παρουσιάζει περίσσια άρδευσης στις αρνητικές τιμές μεταβολής της. Αντίθετα, για τις θετικές, η μεταβολή της κατά +5% αντιστοιχεί σε 23.6 mm περίσσιας και φτάνει στα 58.1 mm για μεταβολή +20%. Η μέση ταχύτητα ανέμου (Wind) δεν παρουσιάζει περίσσια άρδευσης στις θετικές τιμές μεταβολής της. Αντίθετα, για τις αρνητικές, η μεταβολή της κατά -5% αντιστοιχεί σε 2 mm περίσσιας και φτάνει στα 8.3mm για μεταβολή -20%. Το σύνολο των κατακρημνίσεων (Perci) δεν παρουσιάζει περίσσια άρδευσης στις αρνητικές τιμές μεταβολής τους. Αντίθετα, για τις θετικές, η μεταβολή τους κατά +5% αντιστοιχεί σε 1.3mm περίσσιας και φτάνει στα 5.1mm για μεταβολή +20%. Η μέση θερμοκρασία που παρουσιάζεται στην Εικόνα 15(β), δεν παρουσιάζει περίσσια άρδευσης στις θετικές τιμές μεταβολής της. Αντίθετα, για τις αρνητικές, η μεταβολή της κατά -0.5 °C αντιστοιχεί σε 8.8 mm περίσσιας και φτάνει στα 25.1 mm για μεταβολή +2 °C.



(α)



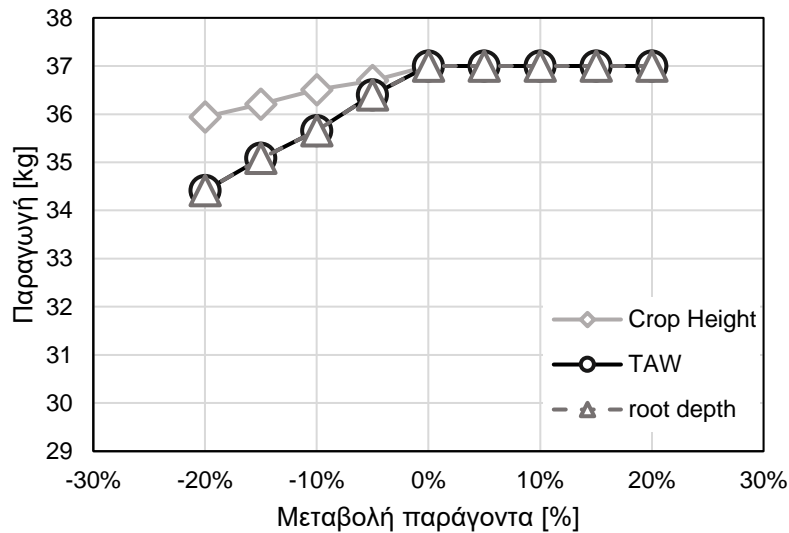
(β)

Εικόνα 15: Περίσσια άρδευσης σύμφωνα με τη μεταβολή παραγόντων στο σύστημα περιβάλλοντος

4.2.3 Ελλειμματική άρδευση

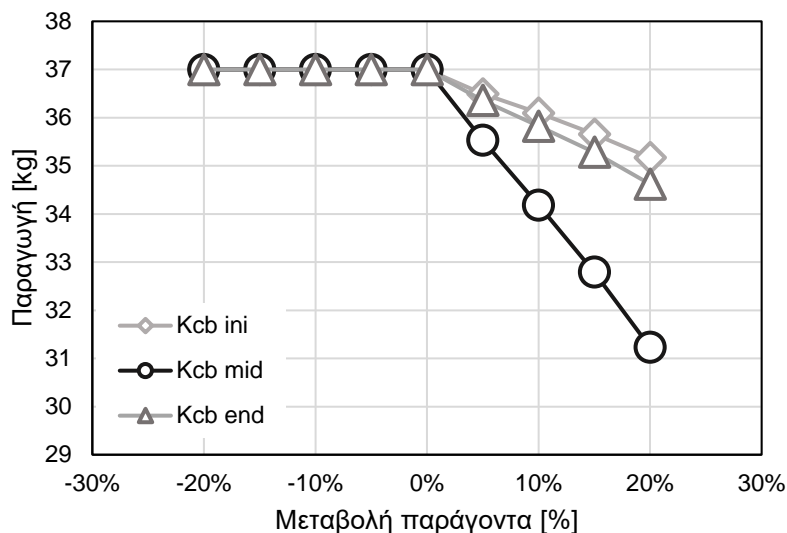
Στην ελλειμματική άρδευση για το σύστημα του εδάφους (Εικόνα 16), το Crop Height δεν παρουσιάζει μείωση της παραγωγής στις θετικές τιμές μεταβολής του. Αντίθετα, για τις αρνητικές, η μεταβολή του κατά -5% αντιστοιχεί σε μείωση 0.3 kg παραγωγής και φτάνει στο 1.0 kg για -20% μεταβολή. Το TAW δεν παρουσιάζει μείωση της παραγωγής στις θετικές τιμές μεταβολής του. Αντίθετα, για τις αρνητικές, η μεταβολή κατά -5% αντιστοιχεί σε μείωση 0.59 kg παραγωγής και φτάνει στα 2.58kg για μεταβολή -20%. Το root depth δεν παρουσιάζει μείωση της παραγωγής στις θετικές τιμές μεταβολής του. Αντίθετα, για τις αρνητικές, η μεταβολή του κατά -5% αντιστοιχεί

σε μείωση 0.59kg παραγωγής και φτάνει στα 2.58 kg για μεταβολή -20%, ακριβώς όσο και της TAW.



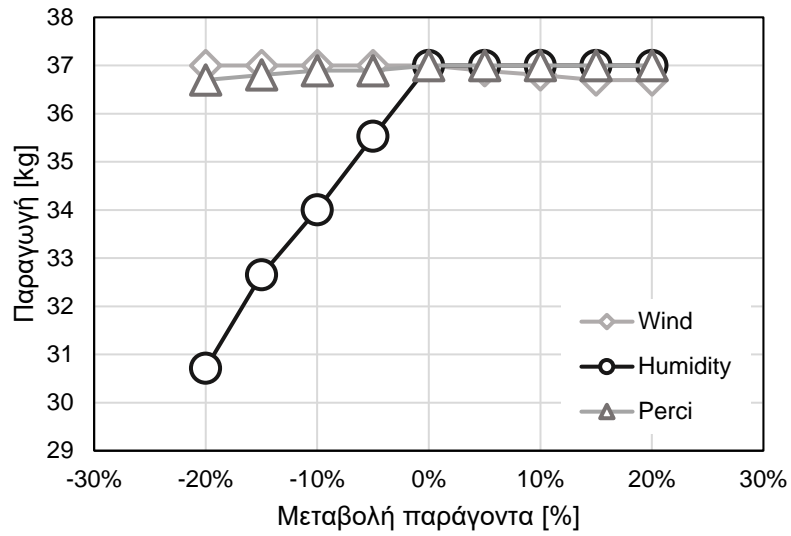
Εικόνα 16: Μείωση παραγωγής σύμφωνα με τη μεταβολή παραγόντων στο σύστημα του εδάφους

Στην ελλειμματική άρδευση για το σύστημα του φυτού (Εικόνα 17), το Kcb ini (φυτικός συντελεστής για την αρχή της καλλιεργητικής περιόδου) δεν παρουσιάζει μείωση της παραγωγής για τις αρνητικές τιμές μεταβολής του. Αντίθετα, για τις θετικές, η μεταβολή του κατά +5% αντιστοιχεί σε μείωση 0.50 kg παραγωγής και φτάνει στα 1.83 kg για μεταβολή +20%. Το Kcb mid (φυτικός συντελεστής για τα μέσα της καλλιεργητικής περιόδου) δεν παρουσιάζει μείωση της παραγωγής για τις αρνητικές τιμές μεταβολής του. Αντίθετα, για τις θετικές, η μεταβολή του κατά +5% αντιστοιχεί σε μείωση 1.47 kg παραγωγής και φτάνει στα 5.76 kg για μεταβολή +20%. Το Kcb end (φυτικός συντελεστής για τα τέλη της καλλιεργητικής περιόδου) δεν παρουσιάζει μείωση της παραγωγής για τις αρνητικές τιμές μεταβολής του. Αντίθετα, για τις θετικές, η μεταβολή του κατά +5% αντιστοιχεί σε μείωση 0.64 kg παραγωγής και φτάνει στα 2.38 kg για μεταβολή +20%.

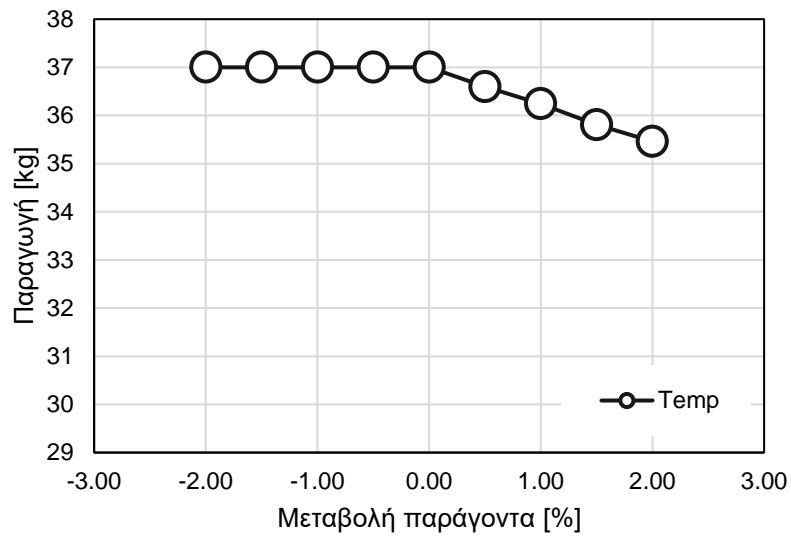


Εικόνα 17: Μείωση παραγωγής σύμφωνα με τη μεταβολή παραγόντων στο σύστημα του φυτού

Στην ελλειμματική άρδευση για το σύστημα του περιβάλλοντος (Εικόνα 18, (α)), η μέση ταχύτητα ανέμου (Wind) δεν παρουσιάζει μείωση της παραγωγής για τις αρνητικές τιμές μεταβολής της. Αντίθετα, για τις θετικές τιμές, η μεταβολή της κατά +5% αντιστοιχεί σε μείωση 0.1kg παραγωγής και φτάνει στα 0.3 kg για μεταβολή +20%. Ο μέσος όρος σχετικής υγρασίας (Humidity) δεν παρουσιάζει μείωση της παραγωγής στις θετικές τιμές μεταβολής του. Αντίθετα, για τις αρνητικές, η μεταβολή του κατά -5% αντιστοιχεί σε μείωση 1.47kg παραγωγής και φτάνει στα 6.28kg για μεταβολή -20%. Το σύνολο των κατακρημνίσεων (Perc1) δεν παρουσιάζει μείωση της παραγωγής στις θετικές τιμές μεταβολής τους. Αντίθετα, για τις αρνητικές, η μεταβολή τους κατά -5% αντιστοιχεί σε μείωση 0.1 kg παραγωγής και φτάνει στα 0.3 kg για μεταβολή στο -20%. Η μέση θερμοκρασία (Temp), που παρουσιάζεται στην Εικόνα 18 (β), δεν παρουσιάζει μείωση της παραγωγής για τις αρνητικές τιμές μεταβολής της. Αντίθετα, για τις θετικές τιμές, η μεταβολή της κατά +0.5C αντιστοιχεί σε μείωση 0.4kg παραγωγής και φτάνει στα 1.53 kg για μεταβολή +2C.



(α)



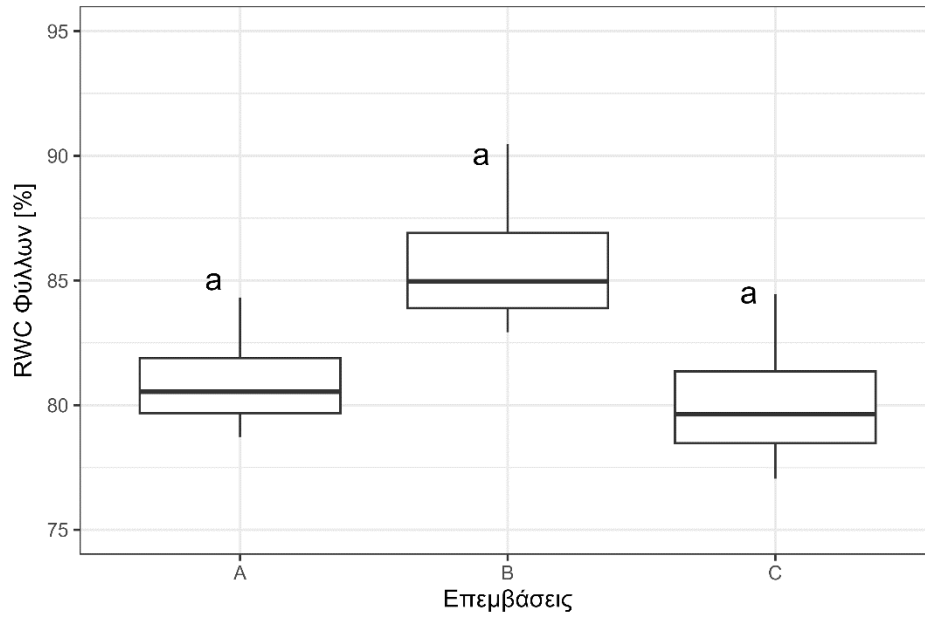
(β)

Εικόνα 18: Μείωση παραγωγής σύμφωνα με τη μεταβολή παραγόντων στο σύστημα του περιβάλλοντος

4.3 Μετρήσεις φυσιολογικών παραμέτρων

4.3.1 Σχετικό υδατικό περιεχόμενο

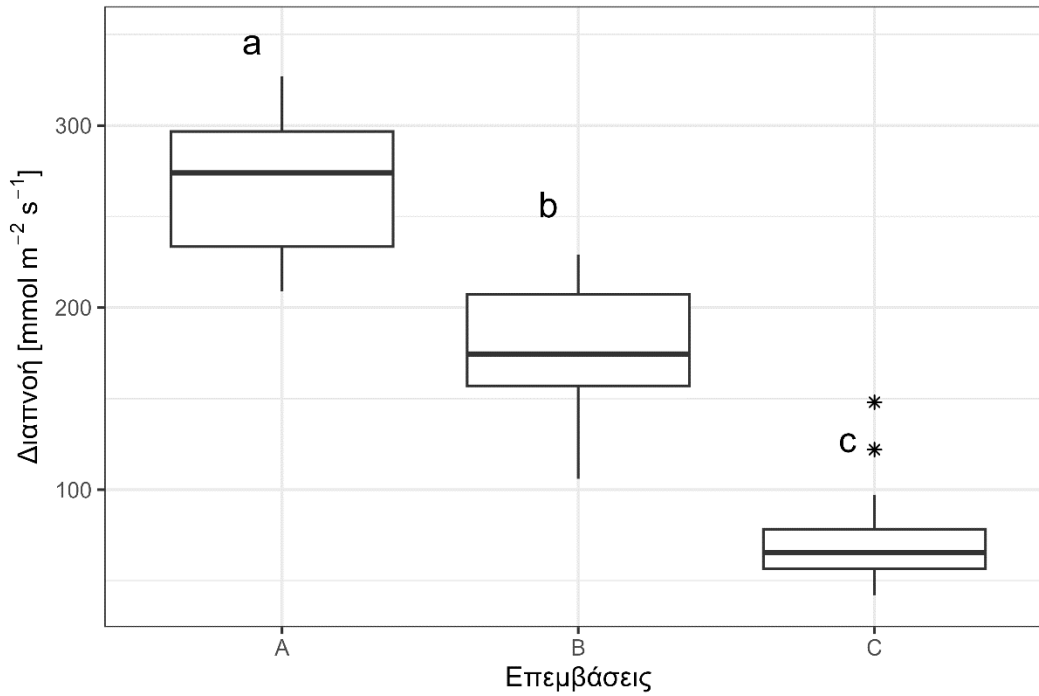
Αναφορικά με το σχετικό υδατικό περιεχόμενο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 19, οι τιμές στα φύλλα ήταν $81\% \pm 2.3\%$, $85.8\% \pm 3.2\%$, $80.1\% \pm 3.1\%$, για τις επεμβάσεις A, B, C, αντίστοιχα. Οι διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων δεν ήταν στατιστικά σημαντικές.



Εικόνα 19: Σχετικό Υδατικό περιεχόμενο φύλλων πριν τη συγκομιδή. Τα όμοια γράμματα επισημαίνουν διαφορές που δεν είναι στατιστικά σημαντικές με $p < 0.05$.

4.3.2 Στοματική αγωγιμότητα

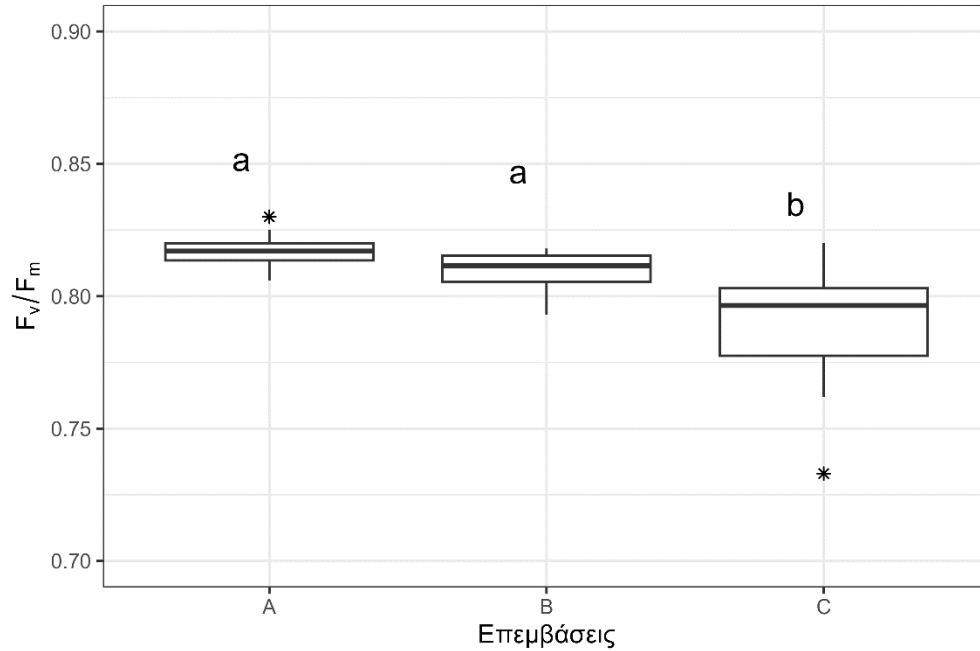
Αναφορικά με τη στοματική αγωγιμότητα, όπως μπορεί να φανεί στην Εικόνα 20, οι τιμές στα φύλλα ήταν 268.2 ± 38 , 176.0 ± 39.8 , 74.7 ± 32 , για τις επεμβάσεις A, B, C, αντίστοιχα. Οι διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων ήταν στατιστικά σημαντικές για όλες τις σύγκρισης ανάμεσα στις επεμβάσεις.



Εικόνα 20: Στοματική αγωγιμότητα. Τα όμοια γράμματα επισημαίνουν διαφορές που δεν είναι στατιστικά σημαντικές με $p < 0.05$

4.3.3 Φθορισμός χλωροφύλλης

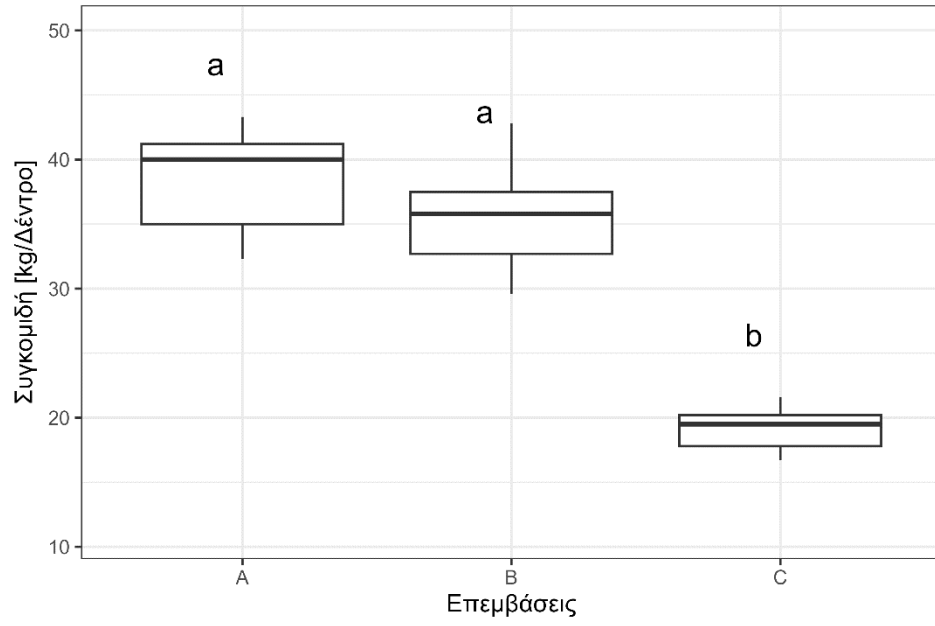
Όπως μπορεί να φανεί στην Εικόνα 20, ο φθορισμός της χλωροφύλλης, έδωσε τιμές απόδοσης της φωτοσύνθεσης της τάξεως του $81.7\% \pm 0.6\%$, $80.9\% \pm 8.1\%$, $78.9\% \pm 2\%$, για τις επεμβάσεις A, B, C, αντίστοιχα. Οι διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων ήταν στατιστικά σημαντικές μόνο σε σχέση με την επέμβαση C.



Εικόνα 21: Φθορισμός χλωροφύλλης. Τα όμοια γράμματα επισημαίνουν διαφορές που δεν είναι στατιστικά σημαντικές με $p < 0.05$

4.3.4 Συγκομιδή

Αναφορικά με τη συγκομιδή, όπως μπορεί να φανεί στην Εικόνα 8, η απόδοση των δέντρων, κατά μέσο όρο, ήταν $38.36 \text{ kg} \pm 4.5 \text{ kg}$, $35.68 \text{ kg} \pm 4.9 \text{ kg}$, $19.16 \text{ kg} \pm 1.9 \text{ kg}$, για τις επεμβάσεις A, B, C, αντίστοιχα. Οι διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων ήταν στατιστικά σημαντικές για μόνο σε σύγκριση με την επέμβαση C.



Εικόνα 22: Συγκομιδή (kg). Τα όμοια γράμματα επισημαίνουν διαφορές που δεν είναι στατιστικά σημαντικές με $p < 0.05$

5 Συζήτηση

5.1 Αποτελέσματα RWC

Σχετικά με την RWC, φαίνεται να μην υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των επεμβάσεων (Εικόνα 19). Η επέμβαση C, αν και ξερική, φαίνεται να μην επηρεάζεται σε αρκετά μεγάλο βαθμό για να διαφοροποιηθεί από τις A (200%) και B (100%). Τα αποτελέσματα μας δεν συμφωνούν με άλλες έρευνες οι οποίες έδειξαν ότι τα ελαιόδεντρα μειώνουν το σχετικό υδατικό περιεχόμενο στα φύλλα για να αυξήσουν τη μύζηση σε σχέση με το έδαφος (Ben Ahmed *et al.* 2007; Iniesta *et al.* 2009a; Rouina *et al.* 2007). Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα τόσο της στοματικής αγωγιμότητας (Εικόνα 20) όσο και της συγκομιδής (Εικόνα 22), δείχνουν ότι η ξερική επέμβαση δεν υπέστη τα σοβαρά επίπεδα καταπόνηση στα οποία αναφέρεται η παραπάνω βιβλιογραφία. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην υπόθεση πως τα ελαιόδεντρα μπόρεσαν να διατηρήσουν την υγρασία τους μέσω της προσαρμοστικότητας που επιτρέπει το αποτελεσματικό κλείσιμο των στομάτων στα φύλλα τους (Fernández *et al.* 1997a; Moriana *et al.* 2003).

5.2 Αποτελέσματα πορόμετρου

Το κλείσιμο των στομάτων είναι ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους αποφυγής ακραίων τιμών υδατικού δυναμικού (B Choat 2012). Έτσι, τα ελαιόδεντρα, ελαχιστοποιούν τις υδατικές απώλειες ρυθμίζοντας τα στόματα (Boughalleb & Hajlaoui 2011; Fernández *et al.* 1997b; Tognetti *et al.* 2009). Η στοματική αγωγιμότητα, στο πείραμα μας, είναι με μεγάλη βεβαιότητα διαφορετική ανάμεσα στις επεμβάσεις (Εικόνα 20) καθώς οι τιμές p για όλες τις συγκρίσεις είναι μικρότερες του 0.01. Στην επέμβαση B (100%), αν και οι τιμές είναι κοντά στις τιμές που άλλες έρευνες δείχνουν ως ελαφρύ καταπόνηση σε ελαιόδεντρα ίδιου είδους (Boussadia *et al.* 2008a), οι τιμές της παραγωγής (Εικόνα 22) δεν διαφέρουν σημαντικά από την A (200%), πράγμα που υποδεικνύει ότι το εύρος τιμών της παρούσας εργασίας δεν κυμαίνεται εντός του εύρους υδατικού καταπόνηση.

5.3 Αποτελέσματα φθορισμού

Οι αρνητικές επιπτώσεις της ξηρασίας είναι γνωστές, με την δέσμευση άνθρακα να μειώνεται προοδευτικά και ανάλογα με την έλλειψη νερού, ως αποτέλεσμα του κλεισίματος των στομάτων και των μεταβολικών περιορισμών (Cornic 2000; Galmés *et al.* 2007). Υπό συνθήκες καταπόνηση, η πιθανότητα υπερδιέγερσης του φωτοσυστήματος II αυξάνεται, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της φωτοσύνθεσης και αύξηση της ενέργειας που διαχέεται σε άλλες οδούς (Baker 2008). Διάφορες μελέτες δείχνουν τη φωτοσυνθετική ικανότητα να μειώνεται σε συνθήκες καταπόνηση (BRENNAN & JEFFERIES 1990; Hakam *et al.* 2000; Smillie & Hetherington 1983; Yamada *et al.* 1996). Εδώ, οι τιμές του φθορισμού χλωροφύλλης, δείχνουν ότι μόνο η επέμβαση

C (ξερική) διαφέρει από τις άλλες δύο, έχοντας χαμηλότερη απόδοση, χωρίς ωστόσο να βρίσκεται σε επίπεδα ακραίου καταπόνηση αλλά σε αυτά που χαρακτηρίζονται ως μέτρια από άλλες έρευνες (Boussadia *et al.* 2008a). Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να εξηγήσει τη σχετικά υψηλή παραγωγικότητα της ξερικής επέμβασης στο προκειμένο πείραμα.

5.4 Αποτελέσματα συγκομιδής

Εδώ, η ξερική επέμβαση (C) έδωσε τη μικρότερη παραγωγή από τις άλλες 2 με μέσο όρο 19.16 kg/δέντρο και με στατιστικά σημαντική διαφορά. Τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα με αντίστοιχες έρευνες, παραμένοντας όμως στα υψηλότερα μεγέθη κατανομής για τις ξερικές επεμβάσεις (Aïachi Mezghani *et al.* 2012; Chartzoulakis 2005), αναδεικνύοντας την προσαρμογή της ποικιλίας στην περιοχή της Κρήτης. Περεταίρω, ενώ η ελιά είναι ανθεκτική στην ξηρασία (Connor & Fereres 2010), δείχνει να είναι πιο ευαίσθητη χωρίς στην καλλιεργητική περίοδο, πριν και κατά το δέσιμο των καρπών (Goldhamer *et al.* 1999). Η συνθήκη αυτή, φαίνεται να καλύπτεται από τις κατακρημνίσεις που σημειώθηκαν κατά την περίοδο του πειράματος.

5.5 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας στη παραγωγή

Με τη πλειοψηφία των καλλιεργήσιμων εδαφών να ποτίζονται μόνο από τις βροχοπτώσεις (Kourgialas, 2021), η χρονική μετατόπιση των βροχοπτώσεων λόγω κλιματικής αλλαγής (Jacob *et al.* 2014) έχει ιδιαίτερη σημασία. Οι ατμοσφαιρικοί παράγοντες, γενικά, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την παραγωγικότητα της ελιάς. Για παράδειγμα, σε περιοχές οι οποίες πλήττονται από ψυχρούς ανέμους υψηλής υγρασίας κατά την περίοδο της άνοιξης, έχει παρατηρηθεί μείωση γονιμοποίησης και ανάπτυξης καρπών (Therios 2009). Αντίστοιχα, οι άνεμοι υψηλής θερμοκρασίας μπορούν να προκαλέσουν καρπόπτωση, ενώ η χαμηλή σχετική υγρασία αέρα να προκαλέσει πρωίμιση και συρρίκνωση καρπών (Therios 2009). Στην ποσοτικοποίησή μας δεν υπάρχει μείωση της παραγωγής εντός του εύρους εξέτασης για τη βροχόπτωση. Το ίδιο ισχύει και για τη μέση ταχύτητα ανέμου. Αντίθετα, για την υγρασία, παρατηρείται μείωση της παραγωγής που έφτασε το 13.26%, η οποία ήταν και η μεγαλύτερη μείωση που παρατηρήθηκε για τους ατμοσφαιρικούς παράγοντες. Στην ίδια ανάλυση, η θερμοκρασία προξενεί μέγιστη πτώση παραγωγής κατά 1.83% για το σενάριο των +2 βαθμών. Τα παραπάνω αποτελέσματα τοποθετούν την παρούσα ανάλυση εντός του εύρους των θερμοκρασιών που άλλων πειραμάτων που δείχνουν ότι η ποικιλία Κορωνέικη είναι ανθεκτική σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, μειώνοντας την ανάπτυξη της χωρίς όμως να την σταματούν (BOUDJABI *et al.* 2019).

5.6 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας στην ET

Παρά την ανθεκτικότητα της ελιάς στις υψηλές θερμοκρασίες και την ξηρασία (Villalobos *et al.* 2006), οι Tanasijevic *et al.* (2014) δείχνουν ότι στο μέλλον, οι συχνότερες και εντονότερες ξηρασίες θα αυξήσουν τις απαιτήσεις σε άρδευση κατά 18.5% στη μεσογειακή λεκάνη και ότι η καλλιέργεια ελιάς χωρίς άρδευση δεν θα είναι πλέον βιώσιμη. Στην παρούσα ανάλυση ευαισθησίας, η μεγαλύτερη αύξηση της ET_0 (κατά +12.8%) προξενείτε από μείωση του παράγοντα της σχετικής υγρασίας κατά -20%. Επίσης, αύξηση της θερμοκρασίας κατά +2 βαθμούς προκάλεσε τη δεύτερη μεγαλύτερη μεταβολή της ET_0 (κατά 4%). Η αύξηση της μέσης ταχύτητας ανέμου κατά +20% είχε αύξηση στην ET_0 κατά 1% και τέλος η μείωση της βροχόπτωσης κατά 20% είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση στην ET_0 κατά 0.7%. Τα αποτελέσματα της ποσοτικοποίησης του ελλείμματος είναι σε συμφωνία με πειραματικές έρευνες που συγκρίνουν προγραμματισμένες με εμπειρικές μεθόδους άρδευσης (Sghaier *et al.* n.d.).

Η ελλειμματική άρδευση έχει προταθεί ως λύση προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, παρά την τάση προς ξηρότερο και θερμότερο κλίμα στη μεσόγειο (Fraga *et al.* 2020). Η λύση αυτή υποστηρίζεται και από μοντέλα, μειώνοντας τις ανάγκες άρδευσης και αυξάνοντας την αποδοτικότητα της (Mairech *et al.* 2020). Ο προγραμματισμός όμως είναι ιδιαίτερος απαραίτητος για την πραγματοποίηση της ελλειμματικής άρδευσης (Iniesta *et al.* 2009b).

5.7 Αποτελέσματα ποσοτικοποίησης πληθωρικής άρδευσης

Στην παρούσα ποσοτικοποίηση για την πληθωρική άρδευση, τα αποτελέσματα έλλειψης προγραμματισμού έδειξαν για τη σχετική υγρασία όταν αυξήθηκε κατά 20% περίσσια κατά 14.9%. Για τη μείωση της μέσης θερμοκρασίας κατά 2 °C, 6.45%. Η μείωση της μέσης ταχύτητας του ανέμου κατά 20% είχε ως αποτέλεσμα 2.1% περίσσιας και τέλος η αύξηση της βροχόπτωσης κατά 20% επέφερε περίσσια 1.3%. Τα αποτελέσματα της ποσοτικοποίησης της πληθωρικής άρδευσης είναι σε συμφωνία με πειραματικές έρευνες που συγκρίνουν προγραμματισμένες με εμπειρικές μεθόδους άρδευσης (Sghaier *et al.*, 2019), ενώ επιβεβαιώνονται και από το πείραμα της παρούσας μελέτης.

5.8 Περιορισμοί

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης υπόκεινται σε μια σειρά από περιορισμούς. Για παράδειγμα, δεν ήταν δυνατή η αποτελεσματική μέτρηση της εδαφικής υγρασίας, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να αποδειχθεί κατά κάποιο τρόπο το κατά πόσο η ξερική επέμβαση (C) βρισκόταν σε ανεκτά επίπεδα υδατικού καταπόνηση. Παράλληλα, η έλλειψη δυνατότητας μέτρησης ροής χυμών των δέντρων δεν επέτρεψε στα αποτελέσματα να συγκριθούν άμεσα με τις έρευνες οι οποίες παραπάνω αναφέρονται ως αντίστοιχες σε σχέση με την καταπόνηση (Boughalleb & Hajlaoui 2011; Boussadia *et al.* 2008b; Thomas Fernandez *et al.* 1997; Tognetti *et al.* 2009). Επίσης, η ανάλυση ευαισθησίας έγινε σε υπολογιστικά φύλλα με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εφαρμοστεί πλήρης ανάλυση τύπου Monte Carlo. Επίσης, για τον ίδιο λόγο δεν ήταν παραγωγικό να δοκιμαστεί ένας μεγάλος αριθμός μετεωρολογικών και άλλων σεναρίων.

6 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν ο προσδιορισμός του βαθμού κατά τον οποίο ο σημερινός, συνήθως εμπειρικός τρόπος άρδευσης, είναι αποτελεσματικός ή προξενεί απώλειες, είτε αυτές αφορούν υδατικούς πόρους είτε την απόδοση της παραγωγής. Η βαθμονόμηση του μοντέλου FAO-56 στις συνθήκες άρδευσης ενός πειραματικού ελαιώνα της Κρήτης, έδειξε ότι το μοντέλο του διπλού συντελεστή είναι ικανοποιητικό για τις συνθήκες που επικρατούν στη Κρήτη.

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε κατά την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου, έδειξε ότι οι αισθητήρες σχετικής υγρασίας είναι απαραίτητοι για τη βέλτιστη άρδευση καθώς, τουλάχιστον για το εύρος που εξετάστηκε, η άρδευση μπορεί να είναι έως και 12.8% εκτός των πραγματικών αναγκών.

Για την ακριβέστερη ποσοτικοποίηση των συνολικών απωλειών λόγω της μη-βέλτιστης άρδευσης, αξιολογήθηκε αφενός η απώλεια ύδατος κατά την πληθωρική άρδευσης και αφετέρου η απώλεια παραγωγής κατά την ελλειμματική άρδευση. Με την καινοτόμα αυτή μέθοδο αναδείξαμε κάθε πλευρά του προβλήματος της μη-βέλτιστης άρδευσης στις πραγματικές του διαστάσεις. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο αυτή, η απώλεια ύδατος ή παραγωγής μπορεί εύκολα να κοστολογηθεί και να οδηγήσει σε καλύτερη λήψη απόφασης κατά τον προγραμματισμό άρδευσης.

Το πείραμα και μετρήσεις πεδίου που έλαβαν χώρα στον πειραματικό ελαιώνα του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου έδειξαν ότι ως προς το μοντέλο, η μέθοδος του διπλού φυτικού συντελεστή στο μοντέλο Blaney-Criddle, ότι μπορεί να εξυπηρετήσει τις ανάγκες της Κρήτης. Παράλληλα, αναδείχθηκε το αποτέλεσμα που μπορεί να έχει η έλλειψη προγραμματισμού, υποτιμώντας τις αρδευτικές ανάγκες. Η υποτίμηση αυτή έδειξε ότι η παραγωγή μπορεί να μειωθεί ως και 13.26% στα πλαίσια της ανάλυσης.

Η παρούσα μελέτη έδειξε ότι η χρήση του HYPROP είναι ένας αποτελεσματικός και γρήγορος τρόπος υπολογισμού των υδραυλικών παραμέτρων του εδάφους. Η επιρροή των μετρήσεων εδάφους έγκειται στον αριθμό γεγονότων άρδευσης. Επηρεάζοντας έτσι, σημαντικά, τον προγραμματισμό.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο τρόπος με τον οποίο αρδεύονται οι ελαιώνες της Κρήτης, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά, τουλάχιστον στις συνθήκες που εξετάστηκαν, έως και κατά 15%. Στη μελέτη φαίνεται ότι η έλλειψη προγραμματισμού της άρδευσης, μπορεί η υπερεκτιμήσει την εξατμισοδιαπνοή ή και να την υποτιμήσει από μέρα σε μέρα.

Τα δεδομένα που έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα είναι αυτά της σχετικής υγρασίας, συνεπώς συστήνεται οι παραγωγοί να επενδύσουν σε κλιματικούς σταθμούς.

Όπως υποδεικνύεται από τη παρούσα μελέτη, οι καλλιεργητές θα πρέπει να προσαρμοστούν στην κλιματική αλλαγή. Επίσης, θα πρέπει να υπάρξουν προσπάθειες επέκτασης του δικτύου διαχείρισης άρδευσης από την πολιτεία καθώς οι ίδιοι δεν φαίνεται να είναι σε θέση να αποκτήσουν τον απαραίτητο εξοπλισμό.

Μελλοντικές έρευνες στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής θα πρέπει να περιλαμβάνουν ισχυρότερα υπολογιστικά εργαλεία για την συμπερίληψη περισσότερων μετεωρολογικών σεναρίων καθώς και να συμπεριλαμβάνουν σενάρια κλιματικής αλλαγής. Εξοπλισμός όπως οι μετρητές ροής φυτικών χυμών, θα επέτρεπε ακριβέστερη σύγκριση αποτελεσμάτων με μελέτες αντίστοιχου αντικειμένου. Η χρήση αισθητήρων εδάφους θα επέτρεπε την ακριβέστερη αξιολόγηση των συνθηκών και την άμεση αξιολόγηση της ασκούμενης άρδευσης. Επίσης θα έπρεπε να υπάρχουν περισσότερες μεταχειρίσεις σε ενδιάμεσες δόσης άρδευσης που θα επέτρεπε άμεσες μετρήσεις στο αποτέλεσμα της ελλειμματικής άρδευσης αλλά και της εξέτασης της ελλειμματικής άρδευσης ως λύση προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή.

Να λάβουμε υπόψη περισσότερες παραμέτρους που είναι σημαντικές στον καλλιεργητή, όπως το κόστος της παραγωγής, του αρδευτικού ύδατος, ο εξοπλισμός αλλά και των δρομολογίων που θα πρέπει να πραγματοποιήσει για να υλοποιήσει τις περισσότερες δόσεις που μπορεί να υποδεικνύει μια μη-βέλτιστα προγραμματισμένη άρδευση.

Βιβλιογραφία

- Abioye, E. A., Abidin, M. S. Z., Mahmud, M. S. A., ... Ramli, M. S. A. (2020, June 1). A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, Elsevier B.V. doi:10.1016/j.compag.2020.105441
- Agricultural land (% of land area) - Greece | Data. (n.d.). Retrieved July 14, 2023, from <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AGRI.ZS?locations=GR>
- Aïachi Mezghani, M., Masmoudi Charfi, C., Gouiaa, M., & Labidi, F. (2012). Vegetative and reproductive behaviour of some olive tree varieties (*Olea europaea* L.) under deficit irrigation regimes in semi-arid conditions of Central Tunisia. *Scientia Horticulturae*, **146**, 143–152.
- Akhter, J., Mahmood, K., Tasneem, M. A., Naqvi, M. H., & Malik, K. A. (2003). Comparative water-use efficiency of *Sporobolus arabicus* and *Leptochloa fusca* and its relation with carbon-isotope discrimination under semi-arid conditions. *Plant and Soil*, **249**(2), 263–269.
- Allen, R. G. (2000a). Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology*, **229**(1–2), 27–41.
- Allen, R. G. (2000b). Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology*, **229**(1–2), 27–41.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., & others. (1998a). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome*, **300**, 6541.
- Allen, R. G., Pruitt, W. O., Wright, J. L., ... Elliott, R. (2006a). A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*, **81**(1–2), 1–22.
- Allen, R. G., Pruitt, W. O., Wright, J. L., ... Elliott, R. (2006b). A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*, **81**(1–2), 1–22.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998b). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper, No. 56, FAO.
- An, N., Tang, C. S., Xu, S. K., Gong, X. P., Shi, B., & Inyang, H. I. (2018). Effects of soil characteristics on moisture evaporation. *Engineering Geology*, **239**, 126–135.

- Aquastat. (2016). *FAO's information system on water and agriculture*, Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nation. Retrieved from <http://www.fao.org/nr/water/aquastat>.
- Arndt, S. K., Irawan, A., & Sanders, G. J. (2015a). Apoplastic water fraction and rehydration techniques introduce significant errors in measurements of relative water content and osmotic potential in plant leaves. *Physiologia Plantarum*, **155**(4), 355–368.
- Arndt, S. K., Irawan, A., & Sanders, G. J. (2015b). Apoplastic water fraction and rehydration techniques introduce significant errors in measurements of relative water content and osmotic potential in plant leaves. *Physiologia Plantarum*, **155**(4), 355–368.
- Assouline, S., & Narkis, K. (2019). Evaporation From Multilayered Heterogeneous Bare Soil Profiles. *Water Resources Research*, **55**(7), 5770–5783.
- B Choat, S. J. T. B. H. C. S. D. (2012). Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, **491**, 752–755.
- Babajimopoulos, C., Antonopoulos, B., Grigoriadis, D., & Ilias, A. (1992). Sensitivity analysis of the Penman method. In *proceedings of 5th conference of H.Y.U.*, , pp. 132–140.
- Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, , pp. 89–113.
- Baker, N. R., & Oxborough, K. (2007). Chlorophyll Fluorescence as a Probe of Photosynthetic Productivity. In *Chlorophyll a Fluorescence*, Springer Netherlands, , pp. 65–82.
- Barrs, H., & Weatherley, P. (1962). A Re-Examination of the Relative Turgidity Technique for Estimating Water Deficits in Leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, **15**(3), 413.
- Ben Ahmed, C., Ben Rouina, B., & Boukhris, M. (2007). Effects of water deficit on olive trees cv. Chemlali under field conditions in arid region in Tunisia. *Scientia Horticulturae*, **113**(3), 267–277.
- Ben Baaziz, K., Lopez, D., Rabot, A., ... Venisse, J. S. (2012). Light-mediated Kleaf induction and contribution of both the PIP1s and PIP2s aquaporins in five tree species: Walnut (*Juglans regia*) case study. *Tree Physiology*, **32**(4), 423–434.
- Berbel, J., Expósito, A., Gutiérrez-Martín, C., & Mateos, L. (2019). Effects of the Irrigation Modernization in Spain 2002–2015. *Water Resources Management*, **33**(5), 1835–1849.

- BOUDJABI, S., KRIBAA, M., & TAMRABET, L. (2019). Contribution des boues résiduaires à la fertilité du sol et à la production d'une plante fourragère (*Hordeum vulgare* L.). *Revue Des Régions Arides*, (21), 862–867.
- Boughalleb, F., & Hajlaoui, H. (2011). Physiological and anatomical changes induced by drought in two olive cultivars (cv Zalmati and Chemlali). *Acta Physiologiae Plantarum*, **33**(1), 53–65.
- Boussadia, O., Mariem, F. Ben, Mechri, B., Boussetta, W., Braham, M., & Hadj, S. B. El. (2008a). Response to drought of two olive tree cultivars (cv Koroneki and Meski). *Scientia Horticulturae*, **116**(4), 388–393.
- Boussadia, O., Mariem, F. Ben, Mechri, B., Boussetta, W., Braham, M., & Hadj, S. B. El. (2008b). Response to drought of two olive tree cultivars (cv Koroneki and Meski). *Scientia Horticulturae*, **116**(4), 388–393.
- Bouyoucos, G. J. (1927). The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils. *Soil Science*, **23**(5), 343–353.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils 1. *Agronomy Journal*, **54**(5), 464–465.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *Instructor's Manual with Test Item File to accompany The Nature and Properties of Soils Fourteenth Edition*.
- BRENNAN, R. M., & JEFFERIES, R. A. (1990). The use of chlorophyll fluorescence in assessment of low temperature hardiness in blackcurrant (*Ribes nigrum* L.). *Annals of Applied Biology*, **117**(3), 667–672.
- Brunetti, G., Šimůnek, J., & Piro, P. (2016). A Comprehensive Analysis of the Variably Saturated Hydraulic Behavior of a Green Roof in a Mediterranean Climate. *Vadose Zone Journal*, **15**(9), vzj2016.04.0032.
- Bureau of Meteorology. (n.d.). *GOOD PRACTICE GUIDELINES FOR WATER DATA MANAGEMENT POLICY WORLD WATER DATA INITIATIVE*. Retrieved from <https://public.wmo.int/en/disclaimer>
- Bwambale, E., Abagale, F. K., & Anornu, G. K. (2022, February 1). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, Elsevier B.V., , p. 107324.

- Cantor, A., Kiparsky, M., Kennedy, R., Hubbard, S., Bales, R., & Pecharroman, L. C. (2018). DATA FOR WATER DECISION MAKING Informing the Implementation of California's Open and Transparent Water Data Act through Research and Engagement JANUARY 2018. doi:10.15779/J28H01
- Cartwright, N. (1983). *How the Laws of Physics Lie*, Oxford University Press Oxford. doi:10.1093/0198247044.001.0001
- Chapter 2 - FAO Penman-Monteith equation. (n.d.). Retrieved June 16, 2023, from <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e06.htm#TopOfPage>
- Chartzoulakis, K. S. (2005). Salinity and olive: Growth, salt tolerance, photosynthesis and yield. In *Agricultural Water Management*, Vol. 78, , pp. 108–121.
- Chartzoulakis, K. S. (2011). The use of saline water for irrigation of olives: Effects on growth, physiology, yield and oil quality. *Acta Horticulturae*, , pp. 97–108.
- Christias, P., Daliakopoulos, I. N., Manios, T., & Mocanu, M. (2020). Comparison of Three Computational Approaches for Tree Crop Irrigation Decision Support. *Mathematics*, **8**(5), 717.
- Coleman, G., & Decoursey, D. G. (1976). *WATER RESOURCES RESEARCH*, Vol. 12.
- Connor, D. J., & Fereres, E. (2010). The Physiology of Adaptation and Yield Expression in Olive. In *Horticultural Reviews*, Vol. 31, wiley, , pp. 155–229.
- Cornic, G. (2000). Drought stress inhibits photosynthesis by decreasing stomatal aperture - Not by affecting ATP synthesis. *Trends in Plant Science*, Elsevier Ltd, , pp. 187–188.
- Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, **3**(1), 52–58.
- Daliakopoulos, I. N., Panagea, I., Brocca, L., & Elsen, E. van den. (2020a). Soil Water Balance and Vegetation Dynamics in a Semi-arid Mediterranean Ecosystem, MDPI AG, , p. 76.
- Daliakopoulos, I., Papadimitriou, D., & Manios, T. (2021a). Improving the efficiency of HYPROP by controlling temperature and air flow. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, , pp. EGU21--13082.

- Daliakopoulos, I., Papadimitriou, D., & Manios, T. (2021b). Improving the efficiency of HYPROP by controlling temperature and air flow. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, , pp. EGU21--13082.
- Daliakopoulos, I., Papadimitriou, D., & Manios, T. (2021c). Improving the efficiency of HYPROP by controlling temperature and air flow. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, , pp. EGU21--13082.
- Daliakopoulos, I. N., Papadimitriou, D., Matsoukas, T., ... Manios, T. (2020b). Development and Preliminary Results from the Testbed Infrastructure of the DRIP Project. *Proceedings*, **30**(1), 64.
- Dirwai, T. L., Senzanje, A., & Mabhaudhi, T. (2021). Calibration and evaluation of the fao aquacrop model for canola (*Brassica napus*) under varied moistube irrigation regimes. *Agriculture (Switzerland)*, **11**(5). doi:10.3390/agriculture11050410
- Download RStudio | The Popular Open-Source IDE from Posit. (n.d.). Retrieved June 19, 2023, from <https://posit.co/products/open-source/rstudio/>
- Dubrovský, M., Hayes, M., Duce, P., Trnka, M., Svoboda, M., & Zara, P. (2014). Multi-GCM projections of future drought and climate variability indicators for the Mediterranean region. *Regional Environmental Change*, **14**(5), 1907–1919.
- Egea, G., Diaz-Espejo, A., & Fernández, J. E. (2016). Soil moisture dynamics in a hedgerow olive orchard under well-watered and deficit irrigation regimes: Assessment, prediction and scenario analysis. *Agricultural Water Management*, **164**, 197–211.
- Fernández, J. E., Moreno, F., Girón, I. F., & Blázquez, O. M. (1997a). Stomatal control of water use in olive tree leaves. *Plant and Soil*, **190**(2), 179–192.
- Fernández, J. E., Moreno, F., Girón, I. F., & Blázquez, O. M. (1997b). Stomatal control of water use in olive tree leaves. *Plant and Soil*, **190**(2), 179–192.
- Fraga, H., Pinto, J. G., & Santos, J. A. (2020). Olive tree irrigation as a climate change adaptation measure in Alentejo, Portugal. *Agricultural Water Management*, **237**. doi:10.1016/j.agwat.2020.106193
- Galmés, J., Medrano, H., & Flexas, J. (2007). Photosynthetic limitations in response to water stress and recovery in Mediterranean plants with different growth forms. *New Phytologist*, **175**(1), 81–93.

- Gimenez, C., Gallardo, M., & Thompson, R. B. (2004). Plant-Water Relations. In *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Vol. 4, Elsevier Inc., , pp. 231–238.
- Giménez, C., Gallardo, M., & Thompson, R. B. (2013). Plant–Water Relations. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier. doi:10.1016/b978-0-12-409548-9.05257-x
- Goldhamer, D. A., Fereres, E., Mata, M., Girona, J., & Cohen, M. (1999). Journal of the American Society for Horticultural Science. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **124**(4), 437–444.
- Graves, S., Piepho, H.-P., Selzer, L., & Dorai-Raj, S. (2023). multcompView: Visualizations of Paired Comparisons. Retrieved June 19, 2023, from <https://CRAN.R-project.org/package=multcompView>
- Hacking, I. (1983). *Representing and Intervening*, Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511814563
- Hadley, W., Romain, F., Lionel, H., Kirill, M., & Davis, V. (2023). dplyr: A Grammar of Data Manipulation. Retrieved June 19, 2023, from <https://dplyr.tidyverse.org/>
- Hájek, T., & Beckett, R. P. (2008). Effect of water content components on desiccation and recovery in Sphagnum mosses. *Annals of Botany*, **101**(1), 165–173.
- Hakam, N., Khanizadeh, S., DeEll, J. R., & Richer, C. (2000). Assessing chilling tolerance in roses using chlorophyll fluorescence. *HortScience*, **35**(2), 184–186.
- Hashemi, M., & Sepaskhah, A. R. (2020). Evaluation of artificial neural network and Penman–Monteith equation for the prediction of barley standard evapotranspiration in a semi-arid region. *Theoretical and Applied Climatology*, **139**(1–2), 275–285.
- Hassan, S. I., Alam, M. M., Illahi, U., Al Ghamdi, M. A., Almotiri, S. H., & Su’ud, M. M. (2021). A Systematic Review on Monitoring and Advanced Control Strategies in Smart Agriculture. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., , pp. 32517–32548.
- Iniesta, F., Testi, L., Orgaz, F., & Villalobos, F. J. (2009a). The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees. *European Journal of Agronomy*, **30**(4), 258–265.

- Iniesta, F., Testi, L., Orgaz, F., & Villalobos, F. J. (2009b). The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees. *European Journal of Agronomy*, **30**(4), 258–265.
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen., *Cambridge University Press*, (In Press), 3949.
- Irmak, S., Payero, J. O., Martin, D. L., Irmak, A., & Howell, T. A. (2006a). Sensitivity Analyses and Sensitivity Coefficients of Standardized Daily ASCE-Penman-Monteith Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **132**(6), 564–578.
- Irmak, S., Payero, J. O., Martin, D. L., Irmak, A., & Howell, T. A. (2006b). Sensitivity Analyses and Sensitivity Coefficients of Standardized Daily ASCE-Penman-Monteith Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **132**(6), 564–578.
- Istanbulluoglu, A. (2009). Effects of irrigation regimes on yield and water productivity of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under Mediterranean climatic conditions. *Agricultural Water Management*, **96**(12), 1792–1798.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., ... Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, **14**(2), 563–578.
- Jahanddideh-Tehrani, M., Bozorg-Haddad, O., & Daliakopoulos, I. N. (2021). The Role of Water Information and Data Bases in Water Resources Management, , pp. 59–83.
- Jeanguenin, L., Mir, A. P., & Chaumont, F. (2016). Uptake, Loss and Control. In *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, Vol. 1, Elsevier Inc., , pp. 135–140.
- Kelly, T. D., Foster, T., & Schultz, D. M. (2023, January 1). Assessing the value of adapting irrigation strategies within the season. *Agricultural Water Management*, Elsevier B.V. doi:10.1016/j.agwat.2022.107986
- Kipkorir, E. C., Raes, D., & Massawe, B. (2002). Seasonal water production functions and yield response factors for maize and onion in Perkerra, Kenya. *Agricultural Water Management*, **56**(3), 229–240.

- Koech, R., & Langat, P. (2018, December 2). Improving irrigation water use efficiency: A review of advances, challenges and opportunities in the Australian context. *Water (Switzerland)*, MDPI AG. doi:10.3390/w10121771
- 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*, **775**, 145857.
- Kourgialas, N. N., Hliaoutakis, A., Argyriou, A. V., ... Soupios, P. (2022). A web-based GIS platform supporting innovative irrigation management techniques at farm-scale for the Mediterranean island of Crete. *Science of the Total Environment*, **842**. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.156918
- Koutroulis, A. G., Grillakis, M. G., Daliakopoulos, I. N., Tsanis, I. K., & Jacob, D. (2016). Cross sectoral impacts on water availability at +2°C and +3°C for east Mediterranean island states: The case of Crete. *Journal of Hydrology*, **532**, 16–28.
- Koutroulis, A. G., Tsanis, I. K., Daliakopoulos, I. N., & Jacob, D. (2013a). Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece. *Journal of Hydrology*, **479**, 146–158.
- Koutroulis, A. G., Tsanis, I. K., Daliakopoulos, I. N., & Jacob, D. (2013b). Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece. *Journal of Hydrology*, **479**, 146–158.
- Kukul, M. S., Irmak, S., & Sharma, K. (2020). Development and application of a performance and operational feasibility guide to facilitate adoption of soil moisture sensors. *Sustainability (Switzerland)*, **12**(1). doi:10.3390/su12010321
- Laituri, M., & Sternlieb, F. (2014). Water Data Systems: Science, Practice, and Policy. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, **153**(1), 1–3.
- Latinopoulos, P. (2005). *VALUATION AND PRICING OF IRRIGATION WATER: AN ANALYSIS IN GREEK AGRICULTURAL AREAS*. *Global NEST Journal*, Vol. 7.
- Loch, A., Pérez-Blanco, C. D., Carmody, E., Felbab-Brown, V., Adamson, D., & Seidl, C. (2020). Grand theft water and the calculus of compliance. *Nature Sustainability*, **3**(12), 1012–1018.
- Loucks, D. P. (2008). Water resources management models. *The Bridge*, **Volume 38**(3), 24–30.

- Lovelli, S., Perniola, M., Ferrara, A., & Di Tommaso, T. (2007). Yield response factor to water (Ky) and water use efficiency of *Carthamus tinctorius* L. and *Solanum melongena* L. *Agricultural Water Management*, **92**(1–2), 73–80.
- Mairech, H., López-Bernal, Á., Moriondo, M., ... Testi, L. (2020). Is new olive farming sustainable? A spatial comparison of productive and environmental performances between traditional and new olive orchards with the model OliveCan. *Agricultural Systems*, **181**. doi:10.1016/j.agry.2020.102816
- Maxwell1, K., & Johnson2, G. N. (2000). *Chlorophyll fluorescence-a practical guide*. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 51.
- Mayer, A., & Muñoz-Hernandez, A. (2009). Integrated Water Resources Optimization Models: An Assessment of a Multidisciplinary Tool for Sustainable Water Resources Management Strategies. *Geography Compass*, **3**(3), 1176–1195.
- McCuen, R. H. (1974). A SENSITIVITY AND ERROR ANALYSIS OF PROCEDURES USED FOR ESTIMATING EVAPORATION. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, **10**(3), 486–497.
- Montesano, F. F., van Iersel, M. W., Boari, F., Cantore, V., D'Amato, G., & Parente, A. (2018). Sensor-based irrigation management of soilless basil using a new smart irrigation system: Effects of set-point on plant physiological responses and crop performance. *Agricultural Water Management*, **203**, 20–29.
- Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M., & Fereres, E. (2003). Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **128**(3), 425–431.
- Mwendwa, S. (2022). Revisiting soil texture analysis: Practices towards a more accurate Bouyoucos method. *Heliyon*, **8**(5), e09395.
- Nastos, P. T., & Zerefos, C. S. (2009). Spatial and temporal variability of consecutive dry and wet days in Greece. *Atmospheric Research*, **94**(4), 616–628.
- Ndiaye, P. M., Bodian, A., Diop, L., ... Ogilvie, A. (2020). Trend and Sensitivity Analysis of Reference Evapotranspiration in the Senegal River Basin Using NASA Meteorological Data. *Water*, **12**(7), 1957.
- Pereira, L. S., Paredes, P., & Jovanovic, N. (2020, November 1). Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the

FAO56 method and the dual Kc approach. *Agricultural Water Management*, Elsevier B.V. doi:10.1016/j.agwat.2020.106357

Petousi, I., Daliakopoulos, I. N., Matsoukas, T., Zotos, N., Mavrogiannis, I., & Manios, T. (2018). DRIP: Development of an Advanced Precision Drip Irrigation System for Tree Crops. *TERRAENVISION Abstracts*, **1**, 2018–2.

Petousi, I., Fountoulakis, M. S., Saru, M. L., ... Manios, T. (2015). Effects of reclaimed wastewater irrigation on olive (*Olea europaea* L. cv. 'Koroneiki') trees. *Agricultural Water Management*, **160**, 33–40.

Phogat, V., Skewes, M. A., Cox, J. W., Sanderson, G., Alam, J., & Šimůnek, J. (2014). Seasonal simulation of water, salinity and nitrate dynamics under drip irrigated mandarin (*Citrus reticulata*) and assessing management options for drainage and nitrate leaching. *Journal of Hydrology*, **513**, 504–516.

Popova, Z., Eneva, S., & Pereira, L. S. (2006). Model Validation, Crop Coefficients and Yield Response Factors for Maize Irrigation Scheduling based on Long-term Experiments. *Biosystems Engineering*, **95**(1), 139–149.

R Development Core Team, R. D. C. T. (2017). R: A language and environment for statistical computing. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. doi:10.1016/j.jssas.2015.06.002

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, **101**(3), 438–447.

Rodrigues, G. C., & Braga, R. P. (2021). Estimation of reference evapotranspiration during the irrigation season using nine temperature-based methods in a hot-summer mediterranean climate. *Agriculture (Switzerland)*, **11**(2), 1–15.

Rouina, B. Ben, Trigui, A., D'Andria, R., Boukhris, M., & Chaïeb, M. (2007). Effects of water stress and soil type on photosynthesis, leaf water potential and yield of olive trees (*Olea europaea* L. cv. Chemlali Sfax). *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **47**(12), 1484–1490.

- Sade, N., Galkin, E., & Moshelion, M. (2015). *Measuring Arabidopsis, Tomato and Barley Leaf Relative Water Content (RWC)*. *Iss*, Vol. 5. Retrieved from <http://www.bio-protocol.org/e1451>
- Saxton, K. E. (1975). *SENSITIVITY ANALYSES OF THE COMBINATION EVAPOTRANSPIRATION EQUATION*. *Agricultural Meteorology*, Vol. 15.
- Schaap, M. G., Leij, F. J., & Van Genuchten, M. T. (2001). rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, **251**(3–4), 163–176.
- Schindler, U., Durner, W., von Unold, G., Mueller, L., & Wieland, R. (2010). The evaporation method: Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **173**(4), 563–572.
- Schneider, J., Groh, J., Pütz, T., ... Vanderborght, J. (2021). Prediction of soil evaporation measured with weighable lysimeters using the FAO Penman–Monteith method in combination with Richards' equation. *Vadose Zone Journal*, **20**(1). doi:10.1002/vzj2.20102
- Sghaier, A., Ayed, R. B., Sghaier, N., Naggaz, K., Ouessar, M., & Boujnah, D. (2019). *EFFECT OF IRRIGATION FREQUENCY ON THE YIELD AND VEGETATIVE GROWTH OF TWO OLIVE CULTIVARS (CVS. KORONEIKI AND PICHOLINE) IN ARID LANDS*. *The J. Anim. Plant Sci*, Vol. 29.
- Sinanis, K. (2015). *ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΕΛΑΦΟΛΟΓΙΑΣ*, Athens: Kallipos. Retrieved from <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/3500>
- Smillie, R. M., & Hetherington, S. E. (1983). Stress Tolerance and Stress-Induced Injury in Crop Plants Measured by Chlorophyll Fluorescence In Vivo . *Plant Physiology*, **72**(4), 1043–1050.
- Smith, Martin., & Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1992). *CROPWAT : a computer program for irrigation planning and management*, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012.). Crop yield response to water.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, **101**(3), 426–437.

- Tanasijevic, L., Todorovic, M., Pereira, L. S., Pizzigalli, C., & Lionello, P. (2014). Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, **144**, 54–68.
- The State of Food and Agriculture 2020*. (2020). *The State of Food and Agriculture 2020*, FAO. doi:10.4060/cb1447en
- Therios, I. (2009). *CROP PRODUCTION SCIENCE IN HORTICULTURE SERIES*. Retrieved from <http://sherekashmir.informaticspublishing.com/754/1/9781845934583.pdf>
- Thomas Fernandez, R., Perry, R. L., & Flore, J. A. (1997). Drought response of young apple trees on three rootstocks. II. Gas exchange, chlorophyll fluorescence, water relations, and leaf abscisic acid. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **122**(6), 841–848.
- Tognetti, R., Giovannelli, A., Lavini, A., Morelli, G., Fragnito, F., & d’Andria, R. (2009). Assessing environmental controls over conductances through the soil-plant-atmosphere continuum in an experimental olive tree plantation of southern Italy. *Agricultural and Forest Meteorology*, **149**(8), 1229–1243.
- van den Elsen, E., Stringer, L. C., De Ita, C., ... de Ruiter, P. C. (2020). Advances in Understanding and Managing Catastrophic Ecosystem Shifts in Mediterranean Ecosystems. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **0**, 323.
- van Genuchten, M. Th. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, **44**(5), 892–898.
- Villalobos, F. J., Testi, L., Hidalgo, J., Pastor, M., & Orgaz, F. (2006). Modelling potential growth and yield of olive (*Olea europaea* L.) canopies. *European Journal of Agronomy*, **24**(4), 296–303.
- Vories, E., O’Shaughnessy, S., Sudduth, K., Evett, S., Andrade, M., & Drummond, S. (2021). Comparison of precision and conventional irrigation management of cotton and impact of soil texture. *Precision Agriculture*, **22**(2), 414–431.
- Vos, J., & Haverkort, A. J. (2007). Water availability and potato crop performance. In *Potato Biology and Biotechnology: Advances and Perspectives*, Elsevier, , pp. 333–351.
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*, New York: Springer. Retrieved from <https://ggplot2.tidyverse.org><https://ggplot2.tidyverse.org>

- WWAP. (2012). *World Water Development Report Volume 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. Water demand: What drives consumption?*, Vol. 1. doi:10.1608/FRJ-3.1.2
- Yamada, M., Hidaka, T., & Fukamachi, H. (1996). Heat tolerance in leaves of tropical fruit crops as measured by chlorophyll fluorescence. *Scientia Horticulturae*, **67**(1–2), 39–48.
- Yin, H., Cao, Y., Marelli, B., Zeng, X., Mason, A. J., & Cao, C. (2021, May 1). Soil Sensors and Plant Wearables for Smart and Precision Agriculture. *Advanced Materials*, John Wiley and Sons Inc. doi:10.1002/adma.202007764
- Young, R., Foster, T., Mieno, T., Valocchi, A., & Brozović, N. (2021). Hydrologic-Economic Trade-offs in Groundwater Allocation Policy Design. *Water Resources Research*, **57**(1). doi:10.1029/2020WR027941
- Zeinalie, M., Bozorg-Haddad, O., & Chaplot, B. (2021). Modeling and Simulation in Water Resources Management, , pp. 1–31.
- Zhao, L., Xia, J., Sobkowiak, L., & Li, Z. (2014). Climatic characteristics of reference evapotranspiration in the hai river basin and their attribution. *Water (Switzerland)*, **6**(6), 1482–1499.
- Zhao, Z., Wang, H., Wang, C., Li, W., Chen, H., & Deng, C. (2020). Changes in reference evapotranspiration over Northwest China from 1957 to 2018: Variation characteristics, cause analysis and relationships with atmospheric circulation. *Agricultural Water Management*, **231**, 105958.
- Zheng, W., Zeng, S., Bais, H., ... Jin, Y. (2018). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) Reduce Evaporation and Increase Soil Water Retention. *Water Resources Research*, **54**(5), 3673–3687.