



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΕΝΔΡΟΚΟΜΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**«Μελέτη της απόκρισης της καρυδιάς ποικιλίας ‘Chandler’ στην
άρδευση»**

Πλακανδάρας Πάυλος

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Περσεφόνη Μαλέτσικα

Βόλος, 2025

Τίτλος πτυχιακής εργασίας: «Μελέτη της απόκρισης της καρυδιάς ποικιλίας
‘Chandler’ στην άρδευση»

Τίτλος στην αγγλική γλώσσα: “Response of the walnut cultivar ‘Chandler’ to
irrigation”

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

- Μαλέτσικα Περσεφόνη, Επίκουρος Καθηγήτρια Δενδροκομίας-Ελαιοκομίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (Επιβλέπουσα)
- Νάνος Γεώργιος, Καθηγητής Δενδροκομίας, Διευθυντής του Εργαστηρίου Δενδροκομίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- Κατσούλας Νικόλαος, Καθηγητής Γεωργικές Κατασκευές – θερμοκήπια, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Υπεύθυνη δήλωση

«Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό Εκπόνησης Πτυχιακής Εργασίας του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος».

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να απευθύνω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στην επιβλέπουσα καθηγήτριά μου και Επίκουρο Καθηγήτρια του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος κα. Μαλέτσικα Περσεφόνη, για την καθοδήγηση, την επιστημονική εποπτεία και τη συνεχή υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Η πολύτιμη εμπειρία και η προθυμία της να παρέχει ανατροφοδότηση συνέβαλαν καθοριστικά στην επιστημονική ολοκλήρωση της μελέτης.

Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Νάνο Γεώργιο, Διευθυντή του Εργαστηρίου Δενδροκομίας και την κα. Ευαγγελία Παναγιωτάκη, μέλος Ε.ΔΙ.Π. του Π.Θ., για τον χρόνο που διέθεσαν και την βοήθεια που μου προσέφεραν.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα Ψαρογιάννη Χαράλαμπο, για τη σημαντική συμβολή του στο πειραματικό σκέλος της εργασίας. Η επιστημονική του γνώση, η υπομονή και η συνεχής διάθεση για βοήθεια υπήρξαν καταλυτικοί παράγοντες στην ομαλή διεξαγωγή του πειράματος και στη συλλογή των δεδομένων.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την αδιάκοπη στήριξη, την κατανόηση και την ενθάρρυνση σε κάθε στάδιο των σπουδών μου. Η ψυχολογική τους παρουσία και η εμπιστοσύνη τους στις δυνατότητές μου αποτέλεσαν για εμένα πολύτιμο στήριγμα.

Περίληψη

Η περιορισμένη διαθεσιμότητα αρδευτικού νερού, σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, αναδεικνύει την ανάγκη για πιο αποδοτική και βιώσιμη χρήση των υδατικών πόρων στη γεωργική παραγωγή. Ιδιαίτερα σε μεσογειακές περιοχές, όπου η διαθεσιμότητα νερού είναι περιορισμένη κατά την κρίσιμη θερινή περίοδο, η ανάγκη για μεθόδους εξοικονόμησης νερού είναι επιτακτική. Η παρούσα εργασία διερεύνησε την επίδραση της ελλειμματικής άρδευσης στα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φύλλων, στην ανάπτυξη βλαστών και καρπών, καθώς και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καρπών καρυδιάς (*Juglans regia* L., ποικιλία Chandler). Πραγματοποιήθηκε πειραματική εφαρμογή δύο αρδευτικών μεταχειρίσεων, πλήρους (μάρτυρας) και ελλειμματικής άρδευσης (75% της ETc), με παρακολούθηση και αξιολόγηση δεδομένων καθόλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η ελλειμματική άρδευση προκάλεσε μερικές διαφοροποιήσεις, κυρίως στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του καρπού και σε αναπτυξιακές παραμέτρους των βλαστών. Συγκεκριμένα, στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, στους βλαστούς, καταγράφηκε μείωση του μήκους του καρποφόρου τμήματος και του αριθμού μικτών οφθαλμών, αλλά αύξηση του αριθμού αρσενικών οφθαλμών ανά μονάδα μήκους βλαστού, χωρίς όμως να περιοριστεί το συνολικό μήκος βλαστού. Βρέθηκε επίσης χαμηλότερο ποσοστό ξηράς ουσίας στους μικτούς και τους αρσενικούς οφθαλμούς στην ελλειμματική άρδευση σε σχέση με τον μάρτυρα. Σε επίπεδο φυσιολογικών χαρακτηριστικών των φύλλων, δεν παρατηρήθηκαν αξιοσημείωτες μεταβολές στη συγκέντρωση των φωτοσυνθετικών χρωστικών ως απόρροια της ελλειμματικής άρδευσης. Αναφορικά με την ποιότητα του καρπού, καταγράφηκαν ενδείξεις μειωμένης πλήρωσης του σπέρματος και πιο συγκεκριμένα μειώσεις στο πλάτος και το βάρος του σπέρματος, καθώς και σε δείκτες όπως η φωτεινότητα της ψίχας και το μειωμένο ποσοστό ξηράς ουσίας στο περικάρπιο. Συνολικά, η παρούσα μελέτη κατέδειξε ότι η καρυδιά εμφανίζει αξιοσημείωτη προσαρμοστικότητα σε ήπιο υδατικό περιορισμό, διατηρώντας τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φύλλων σε παρόμοια επίπεδα με τον μάρτυρα. Ωστόσο, υπάρχει ανάγκη για προσεκτικό σχεδιασμό της ελλειμματικής άρδευσης για να διατηρηθεί η ποιότητα των καρπών όσο πιο κοντά γίνεται στα επίπεδα της πλήρους άρδευσης και να μην επηρεαστεί η βλαστική ανάπτυξη της επόμενης χρονιάς. Γενικά, η στρατηγική

αυτή μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην ανάπτυξη πιο βιώσιμων αρδευτικών πρακτικών σε περιοχές με περιορισμένη διαθεσιμότητα υδάτινων πόρων.

Λέξεις κλειδιά: *Juglans regia*, ελλειμματική άρδευση, χλωροφύλλη, οφθαλμοί, ποιότητα καρπού

Abstract

The limited availability of irrigation water, combined with the impacts of climate change, highlights the need for more efficient and sustainable use of water resources in agricultural production. Particularly in Mediterranean regions, where water availability is scarce during the critical summer period, the need for water-saving methods is crucial. The present study investigated the effect of deficit irrigation on the physiological characteristics of leaves, shoot and fruit growth, and the quality characteristics of walnut fruits (*Juglans regia* L., cultivar Chandler). An experimental application of two irrigation treatments was conducted: full irrigation (control) and deficit irrigation (75% of ET_c), with data monitoring and evaluation throughout the growing season. The results indicated that deficit irrigation caused some variations, primarily in the qualitative characteristics of the fruit and in developmental parameters of the shoots. Specifically, at the end of the growing season, the shoots exhibited a reduction in the length of the fruit-bearing section and the number of mixed buds, but an increase in the number of male buds per unit shoot length, without, however, limiting the total shoot length. A lower dry matter was also found in the mixed and male buds under deficit irrigation compared to the control. As concern the leaf physiological characteristics, no notable changes were observed in the concentration of photosynthetic pigments, as a consequence of deficit irrigation. Regarding fruit quality, indications of reduced kernel fill were recorded, more specifically reductions in kernel width and weight, as well as in indicators such as kernel lightness and a reduced dry matter percentage in the hull. Overall, the present study demonstrated that the walnut tree exhibits notable adaptability to mild water stress, maintaining leaf physiological characteristics at levels similar to the control. However, there is a need for careful planning of deficit irrigation to maintain fruit quality as close as possible to full irrigation levels and to avoid affecting the following year's shoot growth. In general, this strategy can contribute significantly to the development of more sustainable irrigation practices in areas with limited water resource availability.

Keywords: *Juglans regia*, deficit irrigation, chlorophyll, buds, kernel

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract	vii
1. Εισαγωγή	1
1.1 Σημαντικότητα και εξάπλωση της καλλιέργειας της καρυδιάς.....	1
1.2 Ποικιλία ‘Chandler’	2
1.3 Εδαφοκλιματικές συνθήκες για την καλλιέργεια της καρυδιάς.....	3
1.4 Φυσιολογία της καρυδιάς.....	4
1.5 Φαινολογικά στάδια.....	5
1.6 Εγκατάσταση και καλλιεργητικές πρακτικές καρυδεώνα.....	6
1.7 Διαχείριση της άρδευσης στην καρυδιά.....	9
1.8 Δείκτες υδατικής κατάστασης δέντρων καρυδιάς και συστήματα άρδευσης	10
1.9 Ελλειμματική άρδευση	13
1.10 Επίδραση της ελλειμματικής άρδευσης στη φυσιολογία και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καρπών της καρυδιάς	14
1.11 Σκοπός εργασίας	16
2. Υλικά και μέθοδοι.....	17
2.1 Περιγραφή πειραματικού αγρού και μεταχειρίσεων.....	17
2.2 Μετρήσεις	19
2.2.1 Αναπτυξιακές μετρήσεις βλαστών	19
2.2.2 Διαστάσεις και ξηρά ουσία ανώριμων καρπών	20
2.2.3 Χαρακτηριστικά φύλλου.....	21
2.2.4 Ποσοστό Ξηράς Ουσίας και Ειδικό Βάρος Φύλλου	21
2.2.5 Προσδιορισμός φωτοσυνθετικών χρωστικών στα φύλλα.....	22
2.2.7 Ανάπτυξη καρπού και ποιοτικά χαρακτηριστικά	23
2.2.8 Στατιστική επεξεργασία	25

3. Αποτελέσματα.....	27
3.1 Μετρήσεις βλαστών.....	27
3.1.1 Αναπτυξιακά χαρακτηριστικά ετήσιων βλαστών και καρποφόρου τμήματος	27
3.1.2. Αριθμός οφθαλμών και διάμετρος ετήσιων βλαστών.....	28
3.1.3 Ποσοστά ξηράς ουσίας οφθαλμών και μεσογονατίων	29
3.1.4 Αναπτυξιακά χαρακτηριστικά ετήσιων βλαστών και καρποφόρου τμήματος της επόμενης καλλιεργητικής περιόδου (2025)	30
3.2 Διαστάσεις και βάρος ανώριμου καρπού	31
3.3 Φυσιολογικά χαρακτηριστικά φύλλων	32
3.3.1 Ποσοστό ξηράς ουσίας και ειδικό βάρος φύλλων	32
3.3.2 Συγκέντρωση των φύλλων σε χλωροφύλλη	33
3.3.3 Συγκέντρωση ολικών καροτενοειδών	36
3.4 Ανάπτυξη και ποιοτικά χαρακτηριστικά ώριμου καρπού	38
3.4.1 Διαστάσεις καρπού.....	38
3.4.2 Νωπό-ξηρό βάρος και ποσοστό % ξηράς ουσίας περικαρπίου και ενδοκαρπίου	38
3.4.3 Διαστάσεις ενδοκαρπίου και σπέρματος.....	39
3.4.4 Παράμετροι χρώματος και βάρος ψίχας	40
4. Συζήτηση.....	42
4.1 Επίδραση της ελλειμματικής άρδευσης στα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά ετήσιων βλαστών	42
4.2 Επίδραση της ελλειμματικής άρδευσης στα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φύλλων.....	43
4.3 Επίδραση της ελλειμματικής άρδευσης στα αναπτυξιακά και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του καρπού	44
5. Συμπεράσματα	46
6. Βιβλιογραφία	47

6.1 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία	47
6.3 Πηγές Διαδικτύου	55

1. Εισαγωγή

1.1 Σημαντικότητα και εξάπλωση της καλλιέργειας της καρυδιάς

Η καρυδιά (*Juglans regia* L.) είναι ο πιο διαδεδομένος ξηρός καρπός στον κόσμο. Το δέντρο είναι ευρέως γνωστό με τις ονομασίες Περσική καρυδιά, λευκή καρυδιά, αγγλική καρυδιά ή κοινή καρυδιά. Η φυσική της κατανομή εκτείνεται από τα ανατολικά Βαλκάνια μέχρι την οροσειρά των δυτικών Ιμαλαΐων και καλλιεργήθηκε στην Ευρώπη ήδη από το 1000 π.Χ. (Fernández-López et al., 2001). Η εξημέρωσή της υπολογίζεται ότι ξεκίνησε στην περιοχή της Ευρασίας, μεταξύ του Καυκάσου και της Βορειοδυτικής Κίνας (Pollegioni et al., 2017). Η εισαγωγή και εξάπλωση της καλλιέργειας πραγματοποιήθηκε από τον άνθρωπο μέσω του «Δρόμου του Μεταξιού» πριν από περίπου 5000 χρόνια (Vahdati, 2014).

Οι καρυδιές καλλιεργούνται παραδοσιακά στις παράκτιες περιοχές που χαρακτηρίζονται από Μεσογειακό κλίμα όπου επικρατούν βροχοπτώσεις κυρίως το χειμώνα (Bernard et al., 2018). Σήμερα, η καρυδιά καλλιεργείται εμπορικά σε πολλές περιοχές, όπως στη νότια Ευρώπη, τη βόρεια Αφρική, την ανατολική Ασία, τις Ηνωμένες Πολιτείες και τη δυτική Νότια Αμερική (Nael Abu Taha, 2011).

Το καρύδι χρησιμοποιείται παγκοσμίως στη διατροφή του ανθρώπου διαχρονικά. Η υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες και έλαια των καρπών της *Juglans regia* L. τον καθιστούν απαραίτητο για την ανθρώπινη διατροφή. Γι' αυτό, η καρυδιά ταξινομείται ως ένα στρατηγικής σημασίας είδος για τη διατροφή και περιλαμβάνεται στη λίστα προτεραιότητας φυτών του FAO.

Το βρώσιμο μέρος του καρπού (ψίχα) καταναλώνεται φρέσκο ή καβουρδισμένο, και αποτελεί μια τροφή πλούσια σε θρεπτικά συστατικά λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε λιπαρά, πρωτεΐνες, βιταμίνες και ανόργανα συστατικά. Επιπλέον, είναι καλή πηγή φλαβονοειδών, στερολών και πηκτινών. Τα καρύδια περιέχουν υψηλά επίπεδα καλίου, φωσφόρου και μαγνησίου, ενώ έχουν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε νάτριο. Αυτά τα στοιχεία παίζουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργία πολλών ενζύμων (Nael Abu Taha, 2011).

Η καλλιέργεια της καρυδιάς παρουσιάζει σημαντική αύξηση κατά το πέρασμα του χρόνου, με την παγκόσμια καλλιεργούμενη έκταση το 2022 να έχει διπλασιαστεί από το 2004 και να ανέρχεται στα 1.247.938 εκτάρια. Η παγκόσμια παραγωγή καρυδιών το 2022 ανήλθε στους 3.874.024 τόνους, με πρωτοπόρες χώρες παραγωγής να είναι η Κίνα, οι ΗΠΑ, το Ιράν και στη συνέχεια η Τουρκία. Η Ελλάδα έχει αυξήσει την παραγωγή της από το 2004 έως το 2022 κατά 205% και καταμετρά 60.680 τόνους, έχοντας καλλιεργούμενη έκταση 16.710 εκτάρια (FAOSTAT Database Results, 2022). Στη χώρα μας η έκταση της καλλιέργειας κατανέμεται κυρίως στους νομούς Λάρισας, Φθιώτιδας, Αρκαδίας, Κορινθίας, Αιτωλοακαρνανίας, Πιερίας, Τρικάλων και Εύβοιας (ΕΛΣΤΑΤ, 2022).

1.2 Ποικιλία ‘Chandler’

Η φύτευση καρυδεώνων γίνεται με εμβολιασμένα δέντρα, έχοντας σκοπό την καλύτερη συμβατότητα στις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν και τη μέγιστη παραγωγή. Στην Ελλάδα, οι εμβολιασμοί δέντρων καρυδιάς ξεκίνησαν από το 1980 (Ρούσκας, 2013). Η επιλογή ποικιλίας καρυδιάς είναι μια από τις πιο σημαντικές αποφάσεις που πρέπει να λάβει ένας καλλιεργητής. Υπάρχουν ποικιλίες ακρόκαρπες όπως οι ‘Franquette’, ‘Hartley’ και ‘Ronde De Montignac’, οι οποίες δεν προτιμώνται πλέον ή χρησιμοποιούνται ως επικονιάστριες πλαγιοκαρπων, και πλαγιοκαρπες όπως οι ‘Chandler’, ‘Lara’ και ‘Pedro’, που είναι πολύ παραγωγικές αλλά απαιτούν ιδιαίτερα εντατική διαχείριση και τις καλύτερες συνθήκες καλλιέργειας (Ramos, 1998).

Η ποικιλία ‘Chandler’ είναι η πιο κοινή καλλιεργούμενη παγκοσμίως, με πλάγια ανθοφορία, υψηλή απόδοση και ανοιχτόχρωμη ψίχα (Tulecke et al., 1994). Προέρχεται από τη διασταύρωση ‘Pedro’ x ‘UC 56-224’, έχει μέσο-όψιμη άνθιση και παρουσιάζει αντοχή σε προβλήματα βακτηριακού καψίματος και ανθράκωσης (Ramos, 1998). Το σχήμα του καρυδιού είναι ωοειδές έως επίμηκες με πολύ ελκυστική εμφάνιση και μεγάλο μέγεθος. Υπερτερεί των άλλων ποικιλιών στον ανοιχτόχρωμο χρωματισμό της επιδερμίδας της ψίχας. Καλλιεργείται ιδανικά σε ημιορεινές και πολλές ορεινές περιοχές και δεν επηρεάζεται από τους όψιμους παγετούς της άνοιξης (Ρούσκας, 2013). Ένα μειονέκτημα της ‘Chandler’ είναι πως παρατηρείται συρρίκνωση στην άκρη του ενδοκαρπίου, η οποία ποικίλλει ανά έτος, χωρίς όμως να αποτελεί σημαντικό πρόβλημα για την εμπορική διάθεση (Ramos, 1998).

1.3 Εδαφοκλιματικές συνθήκες για την καλλιέργεια της καρυδιάς

Η Περσική Καρυδιά καλλιεργείται κυρίως στο Βόρειο Ημισφαίριο, μεταξύ των 30° και 50° γεωγραφικού πλάτους. Μέσα σε αυτή τη μεγάλη γεωγραφική έκταση, η φυσική επιλογή και η ανθρώπινη παρέμβαση έχουν οδηγήσει στη δημιουργία ποικιλιών ή πληθυσμών που είναι καλά προσαρμοσμένοι στις κλιματικές συνθήκες των διαφόρων ζωνών παραγωγής. Σε περιοχές με πολύ ψυχρούς χειμώνες προτιμώνται ποικιλίες με υψηλή αντοχή στο κρύο, η οποία σχετίζεται συχνά με είσοδο στον λήθαργο κατά τις αρχές του χειμώνα, πρόωπη ωρίμανση των καρπών, πρόωπη πτώση των φύλλων (Germain, 1997).

Οι καρυδιές είναι ιδιαίτερα απαιτητικές όσον αφορά το έδαφος. Αναπτύσσονται καλύτερα σε βαθιά, καλά στραγγιζόμενα, αμμοπηλώδη, σχεδόν ουδέτερου pH εδάφη που είναι γόνιμα και υγρά, αλλά όχι κορεσμένα με νερό (Malhotra, 2008). Η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος και η αποθήκευση νερού ευνοούνται σε βάθος εδάφους 150 cm. Υπερβολικά στραγγιζόμενα ή κακώς στραγγιζόμενα εδάφη είναι ακατάλληλα για την καλλιέργεια, καθώς περιορίζουν την κυκλοφορία του αέρα, εμποδίζουν την ανάπτυξη των ριζών και μειώνουν το ύψος και τη διάμετρο του δέντρου (Jones et al., 1998). Οι πιο ευνοϊκές τοποθεσίες για την καλλιέργεια της καρυδιάς είναι σε καλά στραγγιζόμενα εδάφη κοντά σε ρέματα (Losche, 1973). Συνιστάται το επιφανειακό έδαφος να έχει περιεκτικότητα σε οργανική ουσία περίπου 3,5% και επαρκή αποθέματα θρεπτικών στοιχείων (Jones et al., 1998).

Η θερμοκρασία αέρα αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη συγκεκριμένη καλλιέργεια. Η παραγωγή και η ποιότητα των καρυδιών επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις ακραίες θερμοκρασίες. Οι παγετοί την άνοιξη, όταν τα δέντρα βρίσκονται στην άνθιση ή όταν σχηματίζονται οι καρποί, μπορεί να καταστρέψουν ολοκληρωτικά την παραγωγή της συγκεκριμένης χρονιάς. Από την άλλη, οι υψηλές καλοκαιρινές θερμοκρασίες άνω των 38 °C μπορεί να προκαλέσουν ηλιακό έγκαυμα στους αναπτυσσόμενους καρπούς και αφυδάτωση της ψίχας (Wilkinson, 2005). Περιοχές με χαμηλό υψόμετρο, όπου ο ψυχρός αέρας συσσωρεύεται κοντά στο έδαφος κατά τη διάρκεια της νύχτας και μπορεί να προκαλέσει παγετό στα τέλη της άνοιξης ή στις αρχές του φθινοπώρου δεν είναι επιθυμητές. Τα δενδρύλλια που φυτεύονται σε επίπεδα, εκτεθειμένα σε ανέμους χωράφια είναι λιγότερο ζωνηρά, έχουν μικρότερη επιφάνεια φύλλων και υφίστανται μεγαλύτερη ζημιά (Jones et al., 1998).

Ακόμη, πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι ανάγκες σε ώρες ψύχους. Οι απαιτήσεις σε ώρες ψύχους διαφέρουν ελαφρώς μεταξύ των ποικιλιών, αλλά γενικά οι καρυδιές χρειάζονται 800 ώρες κάτω από 7 °C τον χειμώνα για να επιτευχθεί ομοιόμορφη έκπτυξη των οφθαλμών και καλή καρπόδεση. Όταν οι θερμοκρασίες ημέρας/νύχτας παρουσιάζουν απότομες διακυμάνσεις τον χειμώνα ή όταν οι χειμώνες είναι ασυνήθιστα ήπιοι, η έκπτυξη των οφθαλμών την άνοιξη καθυστερεί μερικώς ή πλήρως, η ανθοφορία και η καρπόδεση γίνονται ακανόνιστα και οι αποδόσεις μειώνονται (Wilkinson, 2005).

1.4 Φυσιολογία της καρυδιάς

Η καρυδιά (*Juglans* spp.) είναι ανεμόγαμο, μόνονικο δένδρο και δικλινές και παρουσιάζει το φαινόμενο της διχογαμίας. Αν και είναι αυτογόνιμη, η αυτογονιμοποίηση περιορίζεται λόγω της διχογαμίας, δηλαδή η ανθοφορία των αρσενικών ανθέων δεν συμπίπτει χρονικά με την ανθοφορία των θηλυκών, καθιστώντας συχνά απαραίτητη την παρουσία επικονιαστριών ποικιλιών στους καρυδεώνες (Germain et al., 1999). Οι αρσενικές ταξιανθίες αποτελούνται από 100 έως 160 άνθη, τα οποία παράγουν έως και δύο εκατομμύρια κόκκους γύρης. Τα θηλυκά άνθη αναπτύσσονται μεμονωμένα ή σε ομάδες δύο έως τριών ανθέων ανά ταξιανθία (Bernard et al., 2018).

Η επικονίαση είναι βασικός παράγοντας για την καρποφορία της καρυδιάς. Η διασταυρούμενη επικονίαση, κυρίως μέσω του ανέμου, είναι περιορισμένη λόγω της χρονικής ασυμβατότητας μεταξύ της απελευθέρωσης γύρης των αρσενικών και της δεκτικότητας των θηλυκών ανθέων (Krueger, 2000). Τα τελευταία χρόνια, η μείωση των φυσικών επικονιαστών και οι ασταθείς καιρικές συνθήκες έχουν προκαλέσει δυσκολίες στην επικονίαση, ιδιαίτερα στα πρώτα έτη ανάπτυξης των καρυδιών, όπου τα αρσενικά άνθη είναι λιγοστά (Mazinani et al., 2023). Για την εξασφάλιση επαρκούς επικονίασης, προτείνεται η φύτευση επικονιαστριών ποικιλιών σε όλες τις σειρές του καρυδεώνα (Sedgley και Griffin, 1989).

Η καρυδιά εμφανίζει δύο βασικούς τύπους καρποφορίας, διακρίνοντας έτσι τις ποικιλίες σε ακρόκαρπες, που έχουν μικτούς οφθαλμούς μόνο επάκρια, και πλαγιόκαρπες, που έχουν μικτούς οφθαλμούς και στα πλάγια των περσινών βλαστών. Ο καρπός αποτελείται από το περικάρπιο, ένα σαρκώδες πράσινο περίβλημα που

περιβάλλει τον πυρήνα του καρυδιού, ο οποίος αποτελείται από το ενδοκάρπιο (ξύλινο κέλυφος) και το βρώσιμο σπέρμα, δηλαδή την ψίχα (Bernard et al., 2018).

1.5 Φαινολογικά στάδια

Ο βιολογικός κύκλος της καρυδιάς περιλαμβάνει διακριτά φαινολογικά στάδια. Οι οφθαλμοί εισέρχονται στον λήθαργο από τα μέσα Αυγούστου έως τις αρχές Οκτωβρίου, ενώ οι απαιτήσεις σε ώρες ψύχους για τη διακοπή του λήθαργου ικανοποιούνται έως τον Ιανουάριο (Germain et al., 1999). Η έκπτυξη των φύλλων και των οφθαλμών ποικίλλει ανάλογα με τον γονότυπο και τις κλιματολογικές συνθήκες, αλλά στην Ελλάδα καταγράφεται μεταξύ Μαρτίου και Απριλίου (Ρούσκας, 2013), με την ωρίμανση των καρπών να πραγματοποιείται τον Σεπτέμβριο και τον Οκτώβριο (Charrier et al., 2011).

Στην καρυδιά διακρίνονται τρία είδη οφθαλμών: βλαστοφόροι (ξύλοφόροι), μικτοί καρποφόροι και άρρενες ανθοφόροι. Η βλαστική περίοδος ξεκινά με την εκβλάστηση των βλαστοφόρων και μικτών οφθαλμών, ακολουθούμενη από ταχεία ανάπτυξη που διαρκεί περίπου έναν μήνα. Η διαφοροποίηση των οφθαλμών που θα δώσουν τα θηλυκά άνθη της επόμενης χρονιάς ξεκινά περίπου 75 ημέρες μετά την εκβλάστηση (Ρούσκας, 2013).

Κατά τα πρώτα στάδια ανάπτυξης του καρπού, το έμβρυο εμφανίζει βραδύ ρυθμό αύξησης στις πρώτες 50 ημέρες από τη γονιμοποίηση, ενώ το σπέρμα αυξάνεται ταχύτατα (Ρούσκας, 2013). Περίπου επτά εβδομάδες μετά την άνθιση, το περικάρπιο και το σπέρμα έχουν φτάσει σε πλήρες μέγεθος. Στη συνέχεια, ξεκινά η σκλήρυνση του ενδοκαρπίου, ενώ η συσσώρευση ελαίων και η αύξηση του ξηρού βάρους της ψίχας συνεχίζεται έως τη συγκομιδή, καθώς και ο σχηματισμός των οφθαλμών για τις αρσενικές ταξιανθίες της επόμενης περιόδου. Οι οφθαλμοί για τις θηλυκές ταξιανθίες σχηματίζονται αφού ολοκληρωθεί η σκλήρυνση του κελύφους, ανάλογα με την ποικιλία (Integrated Pest Management for Walnuts, 2003). Η ταχεία ανάπτυξη του σπέρματος (ψίχας) ξεκινά την 9η εβδομάδα μετά την ανθοφορία και ολοκληρώνεται 19-22 εβδομάδες μετά την ανθοφορία, όταν ο καρπός φτάνει στο μέγιστο βάρος του.

Κατά τη μετασυλλεκτική περίοδο, το δέντρο προετοιμάζεται για τον λήθαργο. Τα σάκχαρα που παράγονται από τη φωτοσύνθεση μεταφέρονται στους οφθαλμούς,

στους κλάδους και στις ρίζες για αποθήκευση, ενώ τα θρεπτικά στοιχεία ανακατανέμονται στους βλαστούς. Το φθινόπωρο, το άμυλο μετατρέπεται σε διαλυτούς υδατάνθρακες και τα φύλλα πέφτουν (Way, 2011).

1.6 Εγκατάσταση και καλλιεργητικές πρακτικές καρυδεώνα

Η εγκατάσταση ενός παραγωγικού και βιώσιμου καρυδεώνα προϋποθέτει τον ενδελεχή σχεδιασμό και την ορθή εφαρμογή καλλιεργητικών πρακτικών, αρχής γενομένης από την κατάλληλη προετοιμασία του εδάφους. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει εδαφολογική δειγματοληψία και ανάλυση, μέσω των οποίων προσδιορίζονται κρίσιμες παράμετροι όπως η περιεκτικότητα σε θρεπτικά στοιχεία, η οργανική ουσία και το pH. Η βασική κατεργασία του εδάφους περιλαμβάνει όργωμα σε βάθος 30–40 cm, με σκοπό την καταστροφή των πολυετών ζιζανίων, τη βελτίωση της εδαφικής δομής και τη διευκόλυνση της έκπτυξης των ριζών των δενδρυλλίων. Παράλληλα, η ενσωμάτωση χωνεμένης κοπριάς, σε ποσότητα 2–3 τόνων ανά στρέμμα, δύναται να ενισχύσει σημαντικά τη γονιμότητα του εδάφους και να βελτιώσει τα φυσικοχημικά και βιολογικά του χαρακτηριστικά (Ποντίκης, 1996).

Οι αποστάσεις φύτευσης αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για τη μακροχρόνια βιωσιμότητα της φυτείας και εξαρτώνται από την ποικιλία, το υποκείμενο, τη γονιμότητα του εδάφους και το καλλιεργητικό σύστημα. Σε εντατικά σχήματα καλλιέργειας, χρησιμοποιούνται αποστάσεις της τάξεως των 6×6 m, ενώ σε εκτατικά συστήματα οι αποστάσεις δύνανται να φτάσουν έως και τα 11×11 m. Ο πολλαπλασιασμός της καρυδιάς στην Ελλάδα πραγματοποιείται κυρίως με εμβολιασμό πλακίτη, ο οποίος εφαρμόζεται σε σπορόφυτα ηλικίας ενός έτους. Ως υποκείμενο στη χώρα μας χρησιμοποιείται η *Juglans regia*. Σε περιπτώσεις πυκνών φυτεύσεων, και εφόσον παρατηρηθούν συμπτώματα αλληλεσκίασης και μείωσης της καρποφορίας, προτείνεται σταδιακή αραίωση των δένδρων (Ποντίκης, 1996).

Η εγκατάσταση φυτών κάλυψης αποτελεί μία εξαιρετικά χρήσιμη πρακτική για τη διατήρηση και τη βελτίωση της εδαφικής υφής και της δομής. Συμβάλλει στη βελτίωση της διηθητικότητας του εδάφους και ενισχύει την ικανότητα συγκράτησης του νερού, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιοχές με περιορισμένα αποθέματα εδαφικής υγρασίας. Παράλληλα, περιορίζεται ο κίνδυνος διάβρωσης τόσο

σε επικλινή όσο και σε πεδινά εδάφη, όπου παρατηρούνται συχνές υπερχειλίσσεις χειμάρρων (Μαντάλου, 1983).

Ο έλεγχος των ζιζανίων γίνεται με συνδυασμό χημικών και μηχανικών μεθόδων (χορτοκοπή). Όσον αφορά στη χημική καταπολέμηση των ζιζανίων, παρόλο που ορισμένα ζιζανιοκτόνα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ήδη από τον πρώτο χρόνο της εγκατάστασης, είναι προτιμότερο η ζιζανιοκτονία να ξεκινάει μετά το τρίτο έτος. Στο στάδιο αυτό, τα δέντρα έχουν αναπτύξει ικανό ριζικό σύστημα και είναι πιο ανθεκτικά στις χημικές παρεμβάσεις. Η εφαρμογή των ζιζανιοκτόνων μπορεί να γίνει με τρεις διαφορετικούς τρόπους: κυκλικά γύρω από τον κορμό σε απόσταση ανάλογη της κόμης, κατά μήκος της γραμμής φύτευσης σε λωρίδα πλάτους 2–3 μέτρων. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται κυρίως από την ηλικία των δέντρων, το κόστος εφαρμογής και τις επιμέρους καλλιεργητικές ανάγκες (Μαντάλου, 1983). Τα ζιζάνια που εμφανίζονται νωρίς το φθινόπωρο ελέγχονται με επιφανειακό ψεκασμό ζιζανιοκτόνου στη γραμμή των δέντρων. Ανθεκτικά ζιζάνια που δεν ελέγχονται με τον φθινοπωρινό ψεκασμό μπορεί να χρειαστούν επιπλέον τοπικούς ψεκασμούς με ζιζανιοκτόνο επαφής. Η κοπή της βλάστησης τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο προσφέρει επιπλέον προστασία από τον παγετό (Malhotra, 2008).

Η λίπανση της καρυδιάς αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την επίτευξη ικανοποιητικής βλάστησης και παραγωγής. Το δέντρο παρουσιάζει υψηλές απαιτήσεις σε άζωτο, ειδικά κατά τα πρώτα στάδια ανάπτυξης και την περίοδο μετά την καρπόδεση (Ποντίκης, 1996). Η χρήση αναλύσεων εδάφους και φύλλων, καθώς και η εφαρμογή λιπάνσεων βάσει των αποτελεσμάτων τους, αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για την παραγωγικότητα και τη βιωσιμότητα της καρυδιάς. Επιπλέον, η ποσότητα των θρεπτικών στοιχείων που απομακρύνεται από το έδαφος με τη συγκομιδή των καρπών αποτελεί έναν από τους βασικούς δείκτες για τον υπολογισμό των αναγκαίων ποσοτήτων λίπανσης. Σε πολλές μελέτες έχει αξιολογηθεί ότι η καρυδιά, σε πλήρη καρποφορία, απαιτεί θρεπτικά στοιχεία σε ευρύ φάσμα, περίπου 400–800 g N, 250–450 g P₂O₅ και 350–600 g K₂O ανά φυτό, ανάλογα με τις εδαφικές συνθήκες και την ποικιλία (Torcuoglu, 2021). Το άζωτο εφαρμόζεται σε δύο δόσεις: η πρώτη, στο τέλος του Φεβρουαρίου, καλύπτει τα δύο τρίτα της συνολικής απαιτούμενης ποσότητας, ενώ η δεύτερη χορηγείται αμέσως μετά την καρπόδεση και αντιστοιχεί στο υπόλοιπο τρίτο. Η λίπανση με φώσφορο και κάλιο προτείνεται να γίνεται ανά διετία, εκτός εάν τα αποτελέσματα της εδαφολογικής ανάλυσης

υποδεικνύουν διαφορετικά. Η επιλογή του τύπου του αζωτούχου λιπάσματος γίνεται με βάση την αντίδραση pH του εδάφους και την παρουσία ανεπιθύμητων ιόντων, όπως το νάτριο και το χλώριο. Η εφαρμογή κοπριάς είναι ωφέλιμη, όμως πρέπει να γίνεται εγκαίρως την άνοιξη για την αποφυγή καθυστερημένης βλάστησης, η οποία ενδέχεται να ζημιωθεί από πρώιμους χειμερινούς παγετούς (Ποντίκης, 1996).

Το κλάδεμα διαμόρφωσης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη σωστή εκμετάλλευση των καρυδεώνων, καθώς επηρεάζει άμεσα την παραγωγικότητα του δέντρου, την ποιότητα των καρπών, τις αποστάσεις φύτευσης, τη δυνατότητα μηχανικής συγκομιδής και τις καλλιεργητικές φροντίδες. Παρά τη σημαντικότητά του, σε πολλές χώρες παραγωγής καρυδιών, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, το κλάδεμα διαμόρφωσης συχνά παραβλέπεται ή δεν εφαρμόζεται με τη δέουσα σοβαρότητα, με αποτέλεσμα τα δέντρα να μην αποδίδουν την πλήρη παραγωγική τους ικανότητα. Συνεπώς, η επιλογή του κατάλληλου σχήματος διαμόρφωσης πρέπει να βασίζεται σε συγκεκριμένα κριτήρια, όπως η δυναμική βλάστησης της ποικιλίας, ο τρόπος καρποφορίας της, η γονιμότητα του εδάφους, οι αποστάσεις φύτευσης, το κόστος της διαμόρφωσης, οι οικονομικές δυνατότητες της εκμετάλλευσης και η τεχνογνωσία του υπεύθυνου προσωπικού (Ρούσκας, 2013).

Δύο είναι τα επικρατέστερα σχήματα διαμόρφωσης στην καλλιέργεια της καρυδιάς: το κυπελλοειδές και ο κεντρικός άξονας. Στο κυπελλοειδές σχήμα, η κόμη απαρτίζεται από τρεις έως τέσσερις πρωτεύοντες βραχίονες που σχηματίζουν γωνία 50° – 60° ως προς τον κορμό. Ο κάθε βραχίονας φέρει δύο σκελετικούς κλάδους, εκ των οποίων ο πρώτος τοποθετείται σε ύψος 40–50 cm από τη βάση του και ο δεύτερος σε 60–80 cm, διατεταγμένοι αντικριστά. Η διαμόρφωση ολοκληρώνεται σταδιακά, με ήπιες παρεμβάσεις, ώστε να ενισχυθεί η πρόωρη είσοδος του δένδρου σε καρποφορία. Στον κεντρικό άξονα, ο κύριος κορμός παραμένει κυρίαρχος και 3–5 πλευρικοί βραχίονες που αναπτύσσονται σε κατάλληλες θέσεις για να σχηματίσουν μια ισχυρή και ισχυρά διακλαδισμένη κόμη. Οι πρώτοι πλευρικοί βραχίονες τοποθετούνται σε ύψος περίπου 70–80 εκατοστών από το έδαφος, διευκολύνοντας έτσι τη μηχανική συγκομιδή (Ποντίκης, 1996).

Οι σκοποί του κλαδέματος διαμόρφωσης περιλαμβάνουν την ανάπτυξη ενός ισχυρού σκελετού του δένδρου, ο οποίος να είναι ικανός να στηρίζει και να παράγει μεγάλες ποσότητες καρπών. Επιπλέον, ο σκελετός πρέπει να διαμορφώνεται με τέτοιο

τρόπο ώστε να επιτρέπει την επαρκή είσοδο ηλιακού φωτός στα κατώτερα μέρη της κόμης, διασφαλίζοντας έτσι τη μέγιστη φωτοσύνθεση και την ανάπτυξη του φυτού. Το σχήμα του δέντρου θα πρέπει επίσης να διευκολύνει τη μηχανική συγκομιδή των καρπών, ενώ εξίσου σημαντικό είναι να εξασφαλίζεται η ταχύτερη δυνατή είσοδος του δέντρου στην καρποφορία, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η παραγωγή από τα πρώτα έτη της ανάπτυξης (Ρούσκας, 2013).

1.7 Διαχείριση της άρδευσης στην καρυδιά

Η άρδευση αποτελεί θεμελιώδη συνιστώσα της καλλιέργειας της καρυδιάς και καθοριστικό παράγοντα για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων και την παραγωγή καρπών εξαιρετικής ποιότητας, ιδιαίτερα σε εμπορικούς καρυδεώνες, όπως αποδεικνύεται από τη συστηματική της χρήση σε χώρες όπως οι ΗΠΑ (Malhotra, 2008). Πρόκειται για φυλλοβόλο δέντρο μεγάλου μεγέθους, με έντονη φυλλική επιφάνεια και εκτεταμένο ριζικό σύστημα, γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα απαιτητικό σε νερό, κυρίως κατά την περίοδο της ενεργού βλάστησης. Στις μεσογειακές κλιματικές συνθήκες της Ελλάδας, οι οποίες χαρακτηρίζονται από περιορισμένες βροχοπτώσεις κατά τους θερινούς μήνες, η άρδευση είναι απαραίτητη όχι μόνο για τη βιωσιμότητα αλλά και για την οικονομική απόδοση της καλλιέργειας. Οι μεγαλύτερες ανάγκες σε νερό εντοπίζονται τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο, ενώ σε περιοχές με χαμηλή ετήσια βροχόπτωση ή κατά τις ξηρές χρονιές, η άρδευση πρέπει να ξεκινά νωρίς την άνοιξη και να συνεχίζεται μέχρι αργά το φθινόπωρο (Ρούσκας, 2013). Η διαχείριση της άρδευσης πρέπει να βασίζεται σε επιστημονικά δεδομένα που λαμβάνουν υπόψη το φαινολογικό στάδιο του φυτού, τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του εδάφους.

Η εκτίμηση των υδατικών αναγκών βασίζεται κυρίως στην εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (E_T), η οποία υπολογίζεται από το γινόμενο της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (E_{To}) και του συντελεστή καλλιέργειας (K_c) (Calvo et al., 2023). Ο K_c μεταβάλλεται ανάλογα με την ανάπτυξη του φυτού, από χαμηλός την άνοιξη μέχρι τη μέγιστη τιμή του στα τέλη του καλοκαιριού και τα τελικά στάδια ανάπτυξης του καρπού (Allen et al., 1998). Η καρυδιά και το πεκάν παρουσιάζουν τον υψηλότερο μέσο K_c ($K_c = 0,9$) καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, ενώ ακολουθούν άλλες καλλιέργειες όπως η αμυγδαλιά και το φιστίκι ($K_c = 0,8$), και στη

συνέχεια η φουντουκιά ($K_c = 0,7$), κυρίως επειδή καλλιεργείται σε πιο υγρά κλίματα με χαμηλότερη ΕΤο. Η καρυδιά και η φουντουκιά θεωρούνται πιο ευαίσθητες στην υδατική καταπόνηση, και ως εκ τούτου απαιτείται προγραμματισμός άρδευσης που να καλύπτει τη μέγιστη ζήτηση (Liu et al., 2019; Mahmoudian et al., 2021).

Η ΕΤο μπορεί να εκτιμηθεί μέσω μετεωρολογικών δεδομένων και εμπειρικών εξισώσεων. Οι τιμές της ΕΤο εκφράζουν την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς από μία θεωρητική επιφάνεια γλοοτάπητα. Μία επιπλέον μέθοδος μέτρησης της εξατμισοδιαπνοής είναι με τη χρήση εξατμισίμετρου (Epan). Η διαπνοή ρυθμίζεται, όμως, και από τα στόματα των φύλλων, το οποίο δεν υπολογίζεται από το εξατμισίμετρο, καθιστώντας την μέτρηση του ΕΤο μέσω της ΕΤc πιο αξιόπιστη. (Ramos, 1998). Στην περίπτωση της καρυδιάς, έχει υπολογιστεί ότι η ετήσια ΕΤc κυμαίνεται από 1050 έως 1200 mm ανά εκτάριο, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες (Calvo et al., 2023). Η εφαρμογή των συντελεστών K_c που έχουν προταθεί για την Καλιφόρνια μπορεί να είναι χρήσιμοι και στην Ελλάδα, λόγω των παρόμοιων αγροκλιματικών χαρακτηριστικών (Ramos, 1998).

Επιπλέον, είναι σημαντική η παρακολούθηση της αλατότητας τόσο του αρδευτικού νερού όσο και του εδάφους, καθώς η καρυδιά είναι ευαίσθητη στην παρουσία αλάτων. Έρευνες στην Καλιφόρνια δείχνουν ότι η ανάπτυξη και η παραγωγή επηρεάζονται όταν η αλατότητα του αρδευτικού νερού υπερβαίνει τα $1,1 \text{ dS m}^{-1}$ και του εδάφους τα $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ (Wilkinson, 2005). Η ποικιλία 'Chandler' έχει αποδειχθεί πιο ευαίσθητη στην αλατότητα συγκριτικά με τη 'Serr' (Akca και Sahin, 2022; Caprile και Grattan, 2006).

1.8 Δείκτες υδατικής κατάστασης δέντρων καρυδιάς και συστήματα άρδευσης

Για τη διαχείριση της άρδευσης η παρακολούθηση της υδατικής κατάστασης του φυτού είναι κρίσιμη. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι προσδιορισμού της υδατικής κατάστασης των δέντρων.

Μία από τις πιο διαδεδομένες παραμέτρους είναι το υδατικό δυναμικό, το οποίο μετρείται είτε σε φύλλα είτε στο βλαστό (McCutchan και Shackel, 1992; Scholander et al., 1965). Στην καρυδιά, ενώ αρχικά χρησιμοποιούνταν το υδατικό δυναμικό φύλλου

πριν την ανατολή του ηλίου, πλέον επικρατεί το υδατικό δυναμικό βλαστού το μεσημέρι ως ο πιο αξιόπιστος δείκτης (Fulton et al., 2017). Η μέτρηση του υδατικού δυναμικού πραγματοποιείται με προσωρινή κάλυψη φύλλου με αδιαπέραστο στο φως και ανακλαστικό σακουλάκι για περίπου 30 λεπτά, με σκοπό την παύση της διαπνοής. Τιμές χαμηλότερες από $-0,8$ MPa έχουν συσχετιστεί με μείωση της βλαστικής ανάπτυξης και της παραγωγής. Παρά την αξιοπιστία της, η μέθοδος απαιτεί καταστροφή ιστού, εξειδικευμένο εξοπλισμό (θάλαμο πίεσης) και εντατική εργασία, γεγονός που καθιστά δύσκολη την αυτοματοποίηση της (Fulton et al., 2001).

Η στοματική αγωγιμότητα (g_s), η οποία αντανakλά το άνοιγμα των στομάτων, χρησιμοποιείται επίσης ως δείκτης υδατικής κατάστασης. Τιμές μεγαλύτερες από $0,2 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ θεωρούνται ενδεικτικές καλής υδατικής κατάστασης (Rosati et al., 2006). Εναλλακτικά, η μέτρηση της θερμοκρασίας φύλλου παρέχει μία μη καταστροφική προσέγγιση ανίχνευσης της υδατικής καταπόνησης. Η θερμοκρασία του φύλλου επηρεάζεται κυρίως από τη θερμοκρασία του αέρα και, δευτερευόντως, από τον ρυθμό διαπνοής, ο οποίος σχετίζεται με τη στοματική αγωγιμότητα (g_s) (Jackson et al., 1981; Jones et al., 2009). Η μέθοδος αυτή προσφέρει τη δυνατότητα χωροχρονικής απεικόνισης της καταπόνησης σε επίπεδο αγρού (Jones, 2004).

Ένας ακόμη έμμεσος δείκτης της φυσιολογικής και υδατικής κατάστασης των δέντρων είναι η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη. Η χλωροφύλλη είναι απαραίτητη στη φωτοσύνθεση και έχει τη δυνατότητα να αντανakλά τη θρεπτική κατάσταση και τη φυσιολογική κατάσταση των φυτών. Η ακριβής εκτίμησή της είναι σημαντική για την παρακολούθηση της βλάστησης, την πρόβλεψη της παραγωγής και τη λήψη αποφάσεων για τη διαχείριση του αγρού. Η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη μετριέται είτε μέσω χημικών αναλύσεων είτε με τη χρήση φορητών μετρητών, όπως το SPAD-502. Οι μετρήσεις SPAD επιτρέπουν μη καταστροφική, γρήγορη εκτίμηση των επιπέδων χλωροφύλλης αν και απαιτούν επαναλαμβανόμενες χειροκίνητες μετρήσεις για την αποφυγή σφαλμάτων και δυσχεραίνουν την εφαρμογή σε ευρεία κλίμακα (Wang et al., 2024).

Πρόσθετες μέθοδοι περιλαμβάνουν την παρακολούθηση των διακυμάνσεων στη διάμετρο του κορμού και τη μέτρηση της ροής χυμού (sap flow). Οι παράμετροι αυτοί παρουσιάζουν ισχυρή συσχέτιση με δείκτες φυσιολογικής λειτουργίας, όπως το υδατικό δυναμικό, τη στοματική αγωγιμότητα και την υγρασία του εδάφους. Σε

σχετική μελέτη, έχει αναπτυχθεί γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης για την πρόβλεψη του υδατικού δυναμικού με βάση τις μεταβολές της διαμέτρου του κορμού (Archer et al., 2001).

Όσον αφορά την επιλογή του κατάλληλου συστήματος άρδευσης για την καλλιέργεια της καρυδιάς καθορίζεται από πληθώρα παραμέτρων, όπως οι φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, η ποιότητα και διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων, το κόστος ενέργειας και εργασίας, καθώς και οι ιδιαίτερες ανάγκες της καλλιέργειας. Δεν υπάρχει η καλύτερη μέθοδος, καθώς κάθε καλλιεργητική συνθήκη απαιτεί εξατομικευμένο σχεδιασμό. Συχνά, η τελική επιλογή του συστήματος προκύπτει ως συμβιβασμός μεταξύ τεχνικών δυνατοτήτων και οικονομικών περιορισμών.

Η επιφανειακή άρδευση αποτελεί μία από τις παραδοσιακές μεθόδους του παρελθόντος. Οι βασικοί τύποι είναι η άρδευση με λωρίδες (border irrigation) και η άρδευση με αυλάκια (furrow irrigation). Η αποδοτικότητα της μεθόδου σε επίπεδο αγρού κυμαίνεται από 40% έως 80%, αναλόγως της υδροπερατότητας του εδάφους και του ρυθμού εφαρμογής του νερού. Όσο ταχύτερα το νερό φτάνει στο κάτω άκρο της αυλάκωσης ή της λεκάνης, τόσο μικρότερες είναι οι διαφορές στον χρόνο διήθησης μεταξύ των άκρων, οδηγώντας σε πιο ομοιόμορφη κατανομή. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή ενδέχεται να ευνοεί την εξάπλωση παθογόνων μικροοργανισμών ή ζιζανίων, μέσω του επιφανειακά κινούμενου νερού που δύναται να μεταφέρει σπόρους ή παράγοντες μόλυνσης (Ramos, 1998).

Η στάγδην άρδευση (drip irrigation) είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος άρδευσης. Συχνές εφαρμογές μικρών ποσοτήτων νερού μέσω σταλακτών κοντά στη ριζόσφαιρα, επιτρέπουν τη διατήρηση της υγρασίας σε κρίσιμα σημεία του ριζικού συστήματος. Το ποσοστό διαβροχής του εδάφους είναι περιορισμένο σε σχέση με άλλες μεθόδους, όμως η αποδοτικότητα εφαρμογής φτάνει το 70–90%, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες λόγω επιφανειακής απορροής και βαθιάς διήθησης (Postel, 2000). Παράλληλα, η μέθοδος μειώνει την επιφανειακή εξάτμιση και επιτρέπει την αυτοματοποίηση, γεγονός που περιορίζει σημαντικά τις απαιτήσεις σε ανθρώπινο δυναμικό (Ramos, 1998).

Η υπόγεια στάγδην άρδευση (Subsurface Drip Irrigation – SDI) αποτελεί μία εξειδικευμένη μορφή μικροάρδευσης, όπου οι γραμμές άρδευσης τοποθετούνται κάτω

από την επιφάνεια του εδάφους. Με τον τρόπο αυτό, περιορίζονται δραστικά οι απώλειες λόγω εξάτμισης και απορροής, ενώ επιτρέπεται η εφαρμογή υγρών λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων με υψηλή ακρίβεια. Επιπλέον, η υπογειοποίηση της υποδομής καθιστά την καλλιέργεια πιο ευέλικτη, καθώς ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές στις καλλιεργητικές εργασίες και περιορίζει τη βλάστηση ζιζανίων, ιδιαίτερα ανάμεσα στις γραμμές. Το σύστημα μπορεί να συνδεθεί με αισθητήρες εδάφους, διαμορφώνοντας ένα αυτοματοποιημένο κλειστό κύκλωμα ελέγχου άρδευσης, το οποίο ενισχύει την ακρίβεια και τη βιωσιμότητα της υδατικής διαχείρισης. Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η SDI έχει και μειονεκτήματα. Το σύστημα είναι μη ορατό, γεγονός που δυσχεραίνει την αξιολόγηση της λειτουργίας και της ομοιομορφίας εφαρμογής και το αυξημένο αρχικό κόστος εγκατάστασης σε σχέση με συμβατικά συστήματα (Ayars et al., 2015).

1.9 Ελλειμματική άρδευση

Η εφαρμογή εναλλακτικών στρατηγικών άρδευσης, όπως η ελλειμματική άρδευση (deficit irrigation), έχει αναδειχθεί ως μια βιώσιμη πρακτική για τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας χρήσης του νερού στις δενδρώδεις καλλιέργειες. Συγκεκριμένα, η άρδευση στο 50% της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας (ETc) έχει συσχετιστεί με αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης νερού κατά 30%, χωρίς σημαντική επίπτωση στην τελική παραγωγή (Ramos, 1998). Η περσική καρυδιά (*Juglans regia*) παρουσιάζει ευαισθησία στην υδατική καταπόνηση (Vahdati et al., 2009). Η τελική απόδοση σε καρπό σχετίζεται άμεσα με την ποσότητα του διαθέσιμου νερού καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (Ruiz-Sanchez et al., 2010).

Έχουν περιγραφεί διάφορες στρατηγικές ελλειμματικής άρδευσης με στόχο τον περιορισμό της κατανάλωσης νερού. Η σταθερή ελλειμματική άρδευση βασίζεται στην εφαρμογή μειωμένων ποσοτήτων νερού καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, ανεξάρτητα από το φαινολογικό στάδιο. Αντίθετα, η ελεγχόμενη ελλειμματική άρδευση συνίσταται στη στοχευμένη μείωση της άρδευσης κατά τη διάρκεια φαινολογικών σταδίων που είναι λιγότερο ευαίσθητα στην υδατική καταπόνηση (Calvo et al., 2023). Υπάρχει και η στρατηγική της μερικής ύγρανσης του ριζικού συστήματος, σύμφωνα με την οποία εφαρμόζεται εναλλάξ άρδευση μόνο στο μισό ριζικό σύστημα κάθε φορά. Η προσέγγιση αυτή έχει αποδειχθεί αποτελεσματική

στην αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης νερού σε καλλιέργειες όπως η μηλιά, η αχλαδιά, η ελιά και τα εσπεριδοειδή (Jovanovic και Stikic, 2018).

Η εφαρμογή της σταθερής ελλειμματικής άρδευσης δεν έχει αποδώσει θετικά αποτελέσματα σε όλες τις ποικιλίες καρυδιάς. Ειδικότερα, οι καρυδιές ποικιλίας ‘Chandler’ δεν φαίνεται να ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στη συγκεκριμένη στρατηγική, ανεξαρτήτως του υποκειμένου που χρησιμοποιείται (Buchner et al., 2008). Σε πειραματική εφαρμογή επί τρία έτη, ώριμες καρυδιές της ποικιλίας ‘Chico’ αρδεύτηκαν σε ποσοστά 33%, 66% και 100% της ETc. Κατά το πρώτο έτος της υδατικής καταπόνησης, οι μειώσεις στις αποδόσεις ήταν οριακές. Όμως, η παρατεταμένη εφαρμογή ελλειμματικής άρδευσης τα επόμενα δύο έτη οδήγησε σε σημαντικές μειώσεις στην απόδοση. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι αποδόσεις αποκαταστάθηκαν πλήρως μετά την επαναφορά σε πλήρη άρδευση για δύο έτη (Ramos, 1998).

1.10 Επίδραση της ελλειμματικής άρδευσης στη φυσιολογία και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καρπών της καρυδιάς

Η ελλειμματική άρδευση εφαρμόζεται με σκοπό τη βελτίωση της αποδοτικότητας χρήσης νερού χωρίς σημαντική μείωση της παραγωγής. Στην περίπτωση της καρυδιάς, οι επιπτώσεις αυτής της πρακτικής ποικίλουν ανάλογα με την ένταση, τη διάρκεια και το στάδιο ανάπτυξης του δένδρου κατά το οποίο εφαρμόζεται το υδατικό έλλειμμα.

Η υδατική καταπόνηση οδηγεί σε πτώση του υδατικού δυναμικού των φύλλων, με χαρακτηριστική μείωση κατά 18,4% στο ανώτερο μέρος της κόμης σε σχέση με το κατώτερο (Chen et al., 2022). Η παρεμπόδιση της πρόσληψης νερού από το ριζικό σύστημα προκαλεί μειωμένη ροή χυμών, ειδικά κατά την περίοδο έκπτυξης των οφθαλμών, μετρημένη ως και 20% χαμηλότερη (Bárek et al., 2021). Ωστόσο, με την πάροδο των ετών παρατηρείται σχετική προσαρμογή, εν μέρει λόγω της ικανότητας του ριζικού συστήματος της καρυδιάς να διεισδύει βαθύτερα στο έδαφος (Cohen et al., 1997).

Η μείωση της στοματικής αγωγιμότητας είναι από τις πρώτες αντιδράσεις του φυτού σε υδατική καταπόνηση, ως μηχανισμός περιορισμού της διαπνοής, πράγμα που

οδηγεί σε μείωση της φωτοσυνθετικής ικανότητας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι φωτοσυνθετικές παράμετροι μειώνονται ελαφρώς, χωρίς όμως στατιστικά σημαντικές διαφορές (Munib Ur Rehman et al., 2023).

Αναφορικά με τη βλαστική ανάπτυξη, η ελλειμματική άρδευση προκαλεί διακριτή μείωση, με περιορισμό στην παραγωγή νέων καρποφόρων βλαστών και κατ' επέκταση στον αριθμό των θέσεων καρποφορίας. Το υδατικό έλλειμμα σχεδόν σε όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου μπορεί να επηρεάσει δυσμενώς τόσο την ανάπτυξη όσο και τη μελλοντική παραγωγικότητα (Calvo et al., 2023; Ramos, 1998). Η συστολή του κορμού είναι επίσης ένδειξη ελλιπούς εδαφικής υγρασίας (Bárek et al., 2021).

Η άμεση επίδραση της υδατικής καταπόνησης στην παραγωγή γίνεται συνήθως εμφανής μετά από δύο ή περισσότερα έτη συνεχούς εφαρμογής ελλειμματικής άρδευσης. Σε ώριμες καρυδιές χωρίς κλάδεμα, οι αποδόσεις μέχρι το τρίτο έτος μειώθηκαν κατά περίπου 20%. Αντίθετα, σε νεαρότερο οπωρώνα ποικιλίας 'Chandler' που είχε υποβληθεί σε μηχανικό κλάδεμα, οι επιπτώσεις ήταν εντονότερες, καθώς η μείωση της παραγωγής έφτασε το 40% μετά από τέσσερα έτη (Buchner et al., 2008).

Η ποιότητα του καρπού επηρεάζεται ποικιλοτρόπως. Υδατική καταπόνηση στην αρχή της καλλιεργητικής περιόδου μειώνει το μέγεθος και το βάρος των καρυδιών, ενώ καταπόνηση αργότερα επηρεάζει το χρώμα της ψίχας, κυρίως στο ανώτερο μέρος της κόμης του δέντρου (Ramos et al., 1978). Αν και η συγκέντρωση ελαίου δεν παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές, οι καρποί με υδατική καταπόνηση περιείχαν έως 5% λιγότερο λάδι (Calvo et al., 2022). Η περιεκτικότητα σε διαλυτά σάκχαρα στην ψίχα αυξάνεται σημαντικά σε συνθήκες ελλειμματικής άρδευσης, ενώ δεν παρατηρείται σημαντική επίδραση στη συγκέντρωση σε σάκχαρα φύλλων και ριζών (Chen et al., 2022; Guizani et al., 2019). Άλλοι ποιοτικοί δείκτες, όπως η πλήρωση του ενδοκαρπίου και το ποσοστό καρπών με συρρικνωμένη ψίχα, επηρεάζονται ελαφρώς, με τις σημαντικότερες διαφοροποιήσεις να παρατηρούνται μόνο σε σοβαρά επίπεδα υδατικής καταπόνησης (π.χ. κάτω από 50% ETc) (Calvo et al., 2022; Perulli et al., 2025).

Αξιοσημείωτο είναι ότι σε μελέτες τετραετούς διάρκειας σε ώριμους καρυδεώνες, η εφαρμογή στρατηγικών ελλειμματικής άρδευσης στο 50% και 75% της

ΕΤς δεν προκάλεσε σημαντική μείωση στη φυσιολογική λειτουργία, την ποιότητα ή την τελική απόδοση, παρά μόνο κατά τα δύο πρώτα έτη.

1.11 Σκοπός εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποσκοπεί στη διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών στρατηγικών άρδευσης στην καλλιέργεια καρυδιάς (*Juglans regia* L.) ποικιλίας ‘Chandler’, με έμφαση στην εξοικονόμηση νερού χωρίς σημαντική απώλεια παραγωγής και υποβάθμιση ποιότητας καρπού. Συγκεκριμένα, συγκρίθηκε η εφαρμογή ορθολογικής άρδευσης, η οποία βασίστηκε στην κάλυψη των υδατικών αναγκών της καλλιέργειας υπολογίζοντας την εξατμισοδιαπνοή της, με την ελλειμματική άρδευση, μία μέθοδο κατά την οποία παρέχεται ελεγχόμενα μειωμένη ποσότητα νερού σε σχέση με την ορθολογική άρδευση. Η σύγκριση αυτή πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο μιας προσπάθειας εξεύρεσης βιώσιμων και αποδοτικών πρακτικών διαχείρισης της άρδευσης, με γνώμονα την αυξανόμενη ανάγκη για περιορισμό της κατασπατάλησης φυσικών πόρων και ιδιαίτερα του αρδευτικού νερού. Η μελέτη επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της επίδρασης των δύο μεθόδων άρδευσης στα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φύλλων, τη βλαστική ανάπτυξη, την ποιότητα των καρπών, καθώς και στην τελική παραγωγή. Μέσα από την ανάλυση αυτή, επιχειρείται να προσδιοριστεί κατά πόσο η ελλειμματική άρδευση μπορεί να εφαρμοστεί ως βιώσιμη πρακτική στη σύγχρονη καλλιέργεια της καρυδιάς, χωρίς να υποβαθμίζει την αγροτική παραγωγή, προσφέροντας παράλληλα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη.

2. Υλικά και μέθοδοι

2.1 Περιγραφή πειραματικού αγρού και μεταχειρίσεων

Η παρούσα ερευνητική εργασία πραγματοποιήθηκε σε πειραματικό αγρό συνολικής έκτασης 14 στρεμμάτων που βρίσκεται στην περιοχή της Σπερχειάδας, Φθιώτιδας (γεωγραφικές συντεταγμένες: 38°55'24"N 22°08'18"E), σε υψόμετρο 117 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Το έδαφος του αγρού χαρακτηρίζεται ως αργιλοπηλώδες, με κοκκομετρική σύσταση 39% άμμος, 35% ιλύς και 26% άργιλος και ουδέτερο pH (7,3). Τα δέντρα ήταν ηλικίας 8 ετών, φυτεμένα σε αποστάσεις 9 × 9 m (περίπου 12 δένδρα/στρέμμα), διαμορφωμένα σε σχήμα κυπέλλου, ποικιλίας 'Chandler' και εμβολιασμένα επί σποροφύτων υποκειμένων του είδους *Juglans regia*. Το πείραμα διήρκεσε από τον Μάρτιο έως και τον Οκτώβριο του 2024, καλύπτοντας το σύνολο της βλαστικής περιόδου. Πραγματοποιήθηκε και μοναδική επιπλέον μέτρηση βλαστών την επόμενη καλλιεργητική περίοδο από αυτή που εφαρμόστηκε η ελλειμματική άρδευση (Μάιος 2025), για να διαπιστωθεί η επίδραση της στη βλαστική ανάπτυξη της επόμενης χρονιάς.

Η αρδευτική διαχείριση περιλάμβανε δύο μεταχειρίσεις: 1) Μάρτυρας (Πλήρης Άρδευση) και 2) Ελλειμματική Άρδευση (Deficit Irrigation). Κάθε μεταχείριση περιλάμβανε 16 δέντρα παρόμοιας ανάπτυξης, τα οποία κατανεμήθηκαν τυχαία μέσα στον αγρό σε τέσσερις ομάδες των τεσσάρων δέντρων έκαστη. Η εφαρμογή της άρδευσης έγινε μέσω μικροεκτοξευτήρων με αρδευτικό δίκτυο πίεσης 2,5 bar. Στην ελλειμματική άρδευση χρησιμοποιήθηκαν δύο μικροεκτοξευτήρες 180°, παροχής 90 L h⁻¹ (ένας ανά πλευρά του δέντρου), ενώ στη μεταχείριση του μάρτυρα χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχοι μικροεκτοξευτήρες παροχής 120 L h⁻¹. Η συχνότητα άρδευσης ορίστηκε σε έξι ημέρες. Το επίπεδο της ελλειμματικής άρδευσης αντιστοιχούσε στο 75% της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας (ET_c).

Η ET_c μπορεί να υπολογιστεί ως το γινόμενο του συντελεστή καλλιέργειας (K_c) επί της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) (Munib Ur Rehman et al., 2023). Η ημερήσια ET_o εξαρτάται από την ενέργεια που είναι διαθέσιμη για εξάτμιση, η οποία προκύπτει από το ενεργειακό ισοζύγιο της ατμόσφαιρας, και υπολογίζεται με την εξίσωση PM-ET_o, που προέρχεται από την εξίσωση Penman–Monteith, και περιγράφει τις απαιτήσεις σε εξάτμιση της ατμόσφαιρας (Pereira et al., 1999). Δεδομένου ότι κάθε καλλιέργεια διαθέτει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, ο K_c ποικίλλει ανάλογα με το είδος.

Οι τυπικές τιμές K_c για δενδρώδεις καλλιέργειες διαφοροποιούνται ανάλογα με την ηλικία του δένδρου, τις καλλιεργητικές πρακτικές, το σύστημα διαμόρφωσης της κόμης, το ποσοστό κάλυψης εδάφους και το ύψος (Munib Ur Rehman et al., 2023). Η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας καθώς και η άρδευση της καρπικής περιόδου 2024 πραγματοποιήθηκε βάσει τεσσάρων φυτικών συντελεστών καλλιέργειας K_c , αναλόγως του φαινολογικού σταδίου της καλλιέργειας (Ramos, 1998). Συγκριμένα, 15/5 έως 30/5: $K_c=0,86$, 1/6 έως 15/6: $K_c=0,94$, 15/6 έως 30/6: $K_c=1,00$ και 1/7 έως 30/8: $K_c=1,14$. Συνολικά εφαρμόστηκαν 746 m^3 αρδευτικού νερού στη μεταχείριση του μάρτυρα και $559,5 \text{ m}^3$ νερού στην μεταχείριση της ελλειμματικής άρδευσης.

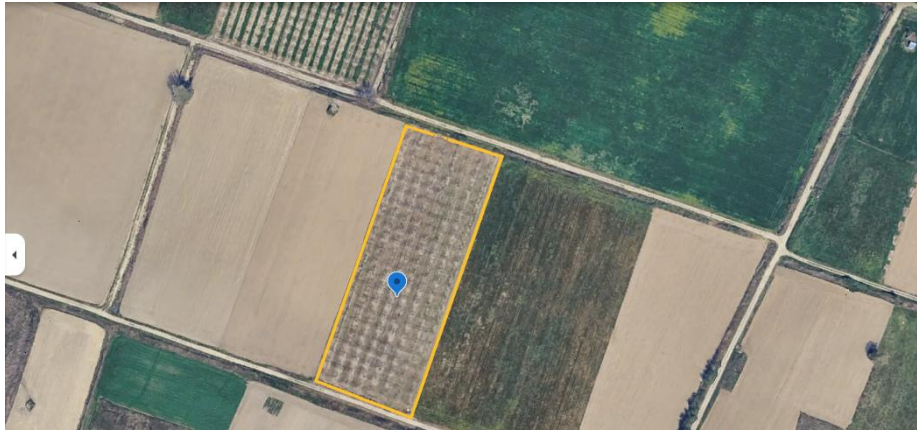
Η λίπανση σχεδιάστηκε με βάση τα αποτελέσματα εδαφολογικής ανάλυσης και εφαρμόστηκε τμηματικά κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (Μάρτιο έως Αύγουστο), προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες της καρυδιάς σε μακροστοιχεία και να υποστηριχθεί η ομοιόμορφη ανάπτυξη των δένδρων. Συνολικά, η λίπανση ανά στρέμμα αντιστοιχούσε σε 7 kg φωσφορικού μονοαμμωνίου, 9 kg ουροθεϊκής αμμωνίας, 20 kg νιτρικής αμμωνίας και 30 kg νιτρικού καλίου, κατανεμημένα στα κρίσιμα στάδια ανάπτυξης των δένδρων. Η βασική οργανική λίπανση πραγματοποιήθηκε τον Μάρτιο με την ενσωμάτωση 300 kg κοπριάς ανά στρέμμα.

Η διαχείριση των ζιζανίων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας καταστροφέα την άνοιξη (Μάρτιος 2024), παράλληλα με τον θρυμματισμό των κλαδευτικών υπολειμμάτων, τα οποία προήλθαν από το κλάδεμα των δέντρων κατά το διάστημα Φεβρουαρίου–Μαρτίου. Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου εφαρμόστηκαν επιπλέον κοπές για τον περιορισμό των ζιζανίων.

Ο πειραματικός αγρός ακολούθησε κοινό πρόγραμμα φυτοπροστασίας και λίπανσης για όλα τα δέντρα, προκειμένου να μην διαφοροποιηθούν οι εξωτερικοί παράγοντες που θα επηρέαζαν τα αποτελέσματα.

Στις 26/3/2024 και στις 22/5/2025 πραγματοποιήθηκε συλλογή βλαστών από τη νοτιοδυτική πλευρά του δένδρου και το κατώτερο τρίτο τμήμα της κόμης, οι οποίοι μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο για φυσιολογικές και αναπτυξιακές μετρήσεις.

Στις 26/6/2024 πραγματοποιήθηκε επίσης συλλογή ανώριμων καρπών με στόχο την παρακολούθηση της ανάπτυξης των καρπών.



Εικόνα 2.1 Εικόνα από τον πειραματικό αγρό μέσω Google Earth, με συντεταγμένες 38°55'24"N 22°08'18"E.

2.2 Μετρήσεις

2.2.1 Αναπτυξιακές μετρήσεις βλαστών

Για κάθε μεταχείριση συλλέχθηκαν τέσσερις επαναλήψεις, με έξι βλαστούς ανά επανάληψη. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν περιλάμβαναν: συνολικό μήκος ετήσιου βλαστού, μήκος καρποφόρου τμήματος, αριθμό φύλλων, αριθμό μεσογονατίων διαστημάτων, αριθμό μικτών οφθαλμών, αριθμό αρσενικών ανθοφόρων οφθαλμών, διάμετρο ετήσιων βλαστών. Για την καταγραφή των διαστάσεων χρησιμοποιήθηκε μεζούρα και παχύμετρο ακριβείας.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ποσοστού ξηράς ουσίας των αρσενικών και μικτών οφθαλμών, και των μεσογονατίων διαστημάτων. Για τον σκοπό αυτό, ζυγίστηκε το νωπό και ξηρό βάρος 10 αρσενικών οφθαλμών, 10 μικτών οφθαλμών και 10 μεσογονατίων διαστημάτων. Η ξήρανση των δειγμάτων έγινε σε φούρνο στους 80 °C μέχρι σταθεροποίησης του βάρους. Οι ζυγίσεις πραγματοποιήθηκαν με ηλεκτρονικό ζυγό ακριβείας δύο δεκαδικών ψηφίων (Kern EW 600-ZM, Balingen, Germany).



Εικόνα 2.2.1 Μέτρηση βλαστών και διαχωρισμός οφθαλμών και μεσογονατίων διαστημάτων.

2.2.2 Διαστάσεις και ξηρά ουσία ανώριμων καρπών

Στις 26/6/2024 συλλέχθηκαν ανώριμοι καρποί και καταγράφηκαν οι διαστάσεις τους (μήκος και πλάτος) με παχύμετρο. Έπειτα ακολούθησε η μέτρηση του ποσοστού ξηράς ουσίας των καρπών (ζύγιση νωπού βάρους, ξήρανση στους 80°C, ζύγιση ξηρού βάρους και υπολογισμός ποσοστού ξηράς ουσίας). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερις επαναλήψεις των πέντε καρπών για κάθε μεταχείριση.



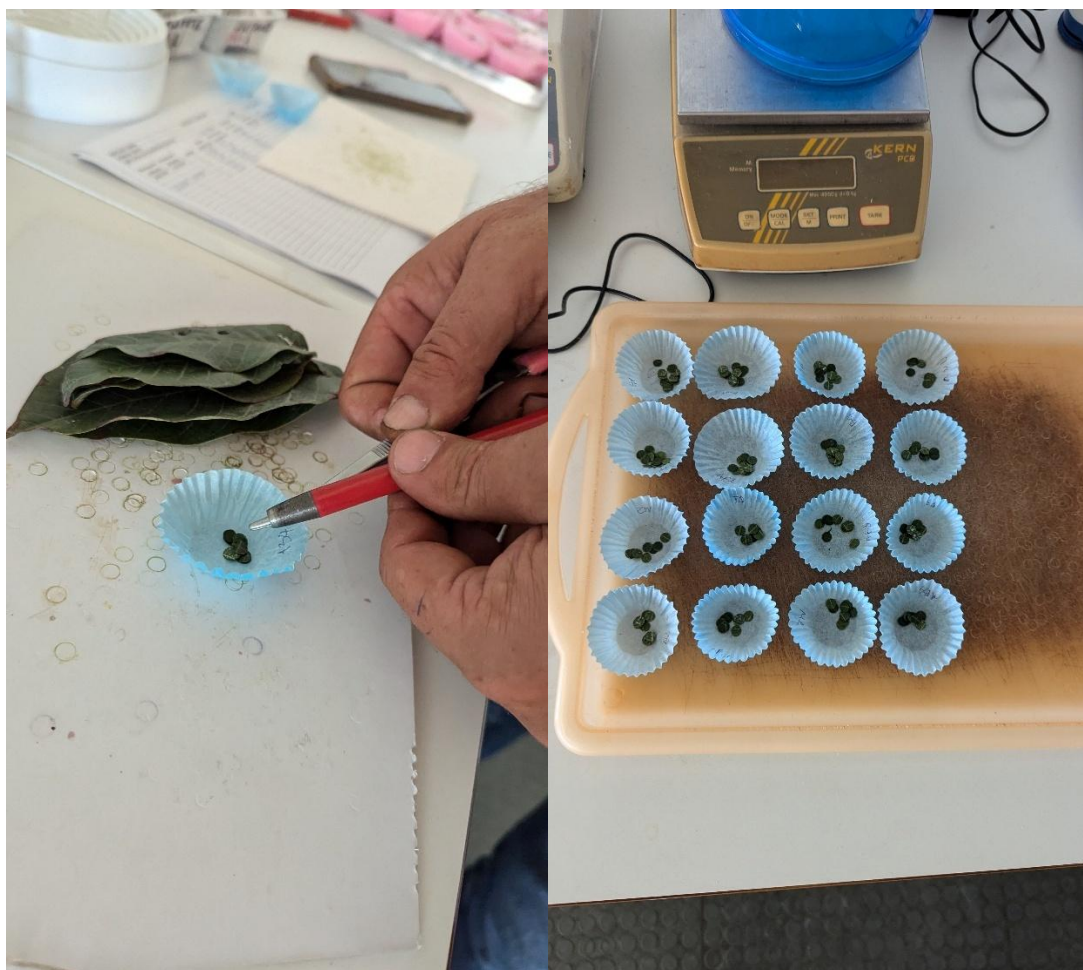
Εικόνα 2.2.2 Μέτρηση των διαστάσεων ανώριμου καρπού.

2.2.3 Χαρακτηριστικά φύλλου

Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 2024 (στις 25/6, 26/7, 27/8 και 3/10), πραγματοποιήθηκε συλλογή φύλλων από το μέσο των βλαστών και περιμετρικά της κόμης. Ανά μεταχείριση συλλέχθηκαν τέσσερις επαναλήψεις των δέκα φύλλων η κάθε μία, τα οποία τοποθετήθηκαν σε πλαστικά σακουλάκια και μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο.

2.2.4 Ποσοστό Ξηράς Ουσίας και Ειδικό Βάρος Φύλλου

Από τα δείγματα των φύλλων ελήφθησαν δώδεκα δίσκοι ανά επανάληψη, διαμέτρου 9,3 mm με διακορευτή. Ζυγίστηκαν νωπό βάρος (NB) σε ζυγό ακρίβειας 4 δεκαδικών και ξηράθηκαν σε φούρνο στους 80°C μέχρι πλήρους θρυμματισμού. Οι ξηροί δίσκοι ζυγίζονταν και λαμβανόταν το ξηρό βάρος (ΞΒ). Το ποσοστό ξηράς ουσίας (% ΞΟ) υπολογίστηκε από τη σχέση: $\% \Xi\text{O} = [(\Xi\text{B})/(\text{NB})] \times 100$. Το ειδικό βάρος φύλλου (ΕΒΦ) υπολογίστηκε από τον τύπο $\text{ΕΒ}\Phi = (\Xi\text{B})/(\text{επιφάνεια } 12 \text{ δίσκων})$ και εκφράστηκε σε g m^{-2} .



Εικόνα 2.2.3 και 2.2.4 Λήψη 12 δίσκων ελάσματος φύλλων καρυδιάς κάθε επανάληψης για την μέτρηση ξηράς ουσίας και του ειδικού βάρους φύλλων.

2.2.5 Προσδιορισμός φωτοσυνθετικών χρωστικών στα φύλλα

Για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας των φύλλων σε χλωροφύλλη α (Chla), χλωροφύλλη β (Chlb), ολική χλωροφύλλη (Chla + Chlb) και ολικά καροτενοειδή, εφαρμόστηκε η φασματοφωτομετρική μέθοδος εξαγωγής με αιθανόλη 95%, όπως περιγράφεται από τον Lichtenthaler (1987). Από κάθε επανάληψη συλλέχθηκαν έξι πλήρως αναπτυγμένα φύλλα, από τα οποία απομονώθηκαν έξι δίσκοι ελάσματος φύλλου διαμέτρου 6 mm, χρησιμοποιώντας διακορευτή σταθερής διαμέτρου. Οι δίσκοι τοποθετήθηκαν σε δοκιμαστικούς σωλήνες screw-top που περιείχαν 15 mL αιθανόλης 95%. Οι σωλήνες τοποθετήθηκαν σε υδατόλουτρο στους 80 °C για 60 λεπτά, έως ότου οι ιστοί αποχρωματιστούν πλήρως. Μετά τον αποχρωματισμό, τα δείγματα μεταφέρθηκαν σε σκοτεινό περιβάλλον ώστε να επιτευχθεί πλήρης ψύξη και σταθεροποίηση του εκχυλίσματος. Στη συνέχεια, κάθε

σωλήνας ανακινήθηκε με vortex για την ομογενοποίηση του δείγματος. Η απορρόφηση των εκχυλισμάτων μετρήθηκε σε φασματοφωτόμετρο υπεριώδους/ορατού φάσματος (UV/VIS) (μοντέλο OPTIZEN POP, Mecasys Co., Ltd.) στα μήκη κύματος 665 nm και 649 nm, τα οποία αντιστοιχούν στις απορροφήσεις της χλωροφύλλης α και χλωροφύλλης β και στα 470 nm που αντιστοιχούν στη μέγιστη απορρόφηση των καροτενοειδών. Για τη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε κρυσταλλική κυψελίδα 1 cm. Η απορρόφηση των εκχυλισμάτων στα 470 nm αποδίδεται κυρίως στην παρουσία ξανθοφυλλών και καροτενίων, ενώ σε μικρότερο βαθμό επηρεάζεται από την παρουσία χλωροφυλλών.

Οι συγκεντρώσεις των χλωροφυλλών και των ολικών καροτενοειδών υπολογίστηκαν με τις ακόλουθες εξισώσεις:

Chla - chlorophyll a = $13,36 \times A_{665} - 5,19 \times A_{649}$

Chlb - chlorophyll b = $27,43 \times A_{649} - 8,12 \times A_{665}$

Total Chlorophyll (Chla+Chlb) = $5,24 \times A_{665} + 22,24 \times A_{649}$

Total Carotenoids (Cx+c) = $(1000 \times A_{470} - 2,13 \times Ca - 97,64 \times Cb) / 209$

Η συγκέντρωση των φωτοσυνθετικών χρωστικών εκφράστηκε σε $\mu\text{g mL}^{-1}$ αιθανόλης και έπειτα υπολογίστηκε σε mg ανά m^2 φύλλου. Επιπρόσθετα, υπολογίστηκε ο λόγος Chla / Chlb.

2.2.7 Ανάπτυξη καρπού και ποιοτικά χαρακτηριστικά

Στη συγκομιδή, έγινε δειγματοληψία καρπών, σε πέντε επαναλήψεις των 10 καρπών ανά μεταχείριση, και μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο για μέτρηση των αναπτυξιακών και ποιοτικών τους χαρακτηριστικών. Αρχικά μετρήθηκαν οι διαστάσεις των καρπών και το βάρος τους με το περικάρπιο. Στη συνέχεια έγινε διαχωρισμός του περικαρπίου και ακολούθησε η μέτρηση των διαστάσεων και του βάρους των καρπών με το ενδοκάρπιο (κέλυφος). Έπειτα, διαχωρίστηκε το ενδοκάρπιο από το σπέρμα (ψίχα) και ακολούθησε η μέτρηση των διαστάσεων και του βάρους του σπέρματος. Για τις διαστάσεις χρησιμοποιήθηκε παχύμετρο ακριβείας και για τα βάρη ηλεκτρονικός ζυγός ακριβείας δύο δεκαδικών ψηφίων (Kern EW 600-ZM, Balingen, Germany). Από τα επιμέρους τμήματα του καρπού λήφθηκαν δείγματα για τον υπόλογοισμό του ποσοστού ξηράς ουσίας. Τα δείγματα ζυγίστηκαν για παραλαβή του νωπού τους βάρους, ακολούθησε η ξήρανση σε φούρνο στους 80°C και η ζύγιση του

ξηρού βάρους και έπειτα υπολογίστηκε το ποσοστό ξηράς ουσίας του περικαρπίου, του ενδοκαρπίου και του σπέρματος.



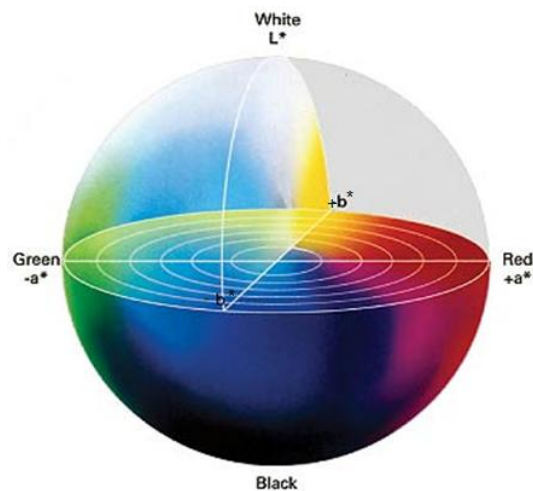
Εικόνα 2.2.5 Διαχωρισμός ενδοκαρπίου και περικαρπίου για μετρήσεις ποιοτικών χαρακτηριστικών.

Ο προσδιορισμός του χρώματος του σπέρματος των καρπών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση χρωματόμετρου Minolta (Model CR-400, Minolta Ltd, Osaka, Ιαπωνία). Η αξιολόγηση του χρώματος βασίστηκε στο πρότυπο σύστημα CIELAB (CIE 1976, L^* , a^* , b^*). Το σύστημα αυτό εκφράζει το χρώμα με τρεις διαστάσεις: τη φωτεινότητα (L^*), τη χρωματική συνιστώσα (a^*) και τη συνιστώσα (b^*). Το L^* είναι κάθετο στο επίπεδο που σχηματίζουν τα a^* και b^* . Η παράμετρος φωτεινότητας L^* κυμαίνεται από μαύρο ($L^*=0$) έως λευκό ($L^*=100$). Το a^* τοποθετείται στον οριζόντιο άξονα και το b^* στον κατακόρυφο. Στον οριζόντιο άξονα, $a^*>0$ δείχνει χρώμα κόκκινο-μωβ και $a^*<0$ μπλε-πράσινο. Στον κατακόρυφο άξονα,

$b^* > 0$ δείχνει χρώμα κίτρινο και $b^* < 0$ μπλε (Εικόνα 2.2.7). Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε σταθερό σημείο του σπέρματος κάθε καρπού. Ο αριθμός των επαναλήψεων ήταν πέντε, ενώ για κάθε πειραματική επανάληψη καταγραφόταν ο μέσος όρος δέκα επιμέρους μετρήσεων σε δέκα διαφορετικούς καρπούς (McGuire 1992).



Εικόνα 2.2.6 Διαχωρισμός του σπέρματος από το ενδοκάρπιο για να μετρηθούν οι διαστάσεις και το χρώμα του.



Εικόνα 2.2.7 Ο τρισδιάστατος ομοιόμορφος χρωματικός κύκλος CIELAB.

2.2.8 Στατιστική επεξεργασία

Η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού SPSS (Version 20.0, IBM Corporation, Armonk, NY, USA). Η σύγκριση

των μέσων όρων έγινε με τα κριτήρια student t-test και ΕΣΔ, για επίπεδο σημαντικότητας $p \leq 0,05$.

3. Αποτελέσματα

3.1 Μετρήσεις βλαστών

3.1.1 Αναπτυξιακά χαρακτηριστικά ετήσιων βλαστών και καρποφόρου τμήματος

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται το συνολικό μήκος του ετήσιου βλαστού, το μήκος του καρποφόρου τμήματος (Πίνακας 3.1.1), ο αριθμός φύλλων και μεσογονατίων στο καρποφόρο τμήμα, και το μήκος των μεσογονατίων στο καρποφόρο τμήμα του ετήσιου βλαστού (Πίνακας 3.1.2). Η ελλειμματική άρδευση εμφάνισε ελαφρώς μεγαλύτερο συνολικό μήκος ετήσιου βλαστού σε σχέση με τον μάρτυρα. Ωστόσο, το μήκος του καρποφόρου τμήματος μειώθηκε σημαντικά υπό ελλειμματική άρδευση (Πίνακας 3.1.1).

Πίνακας 3.1.1 Συνολικό μήκος ετήσιου βλαστού και μήκος καρποφόρου τμήματος βλαστού καρδιάς των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

Μεταχείριση	Συνολικό μήκος ετήσιου βλαστού (cm)	Μήκος καρποφόρου τμήματος βλαστού (cm)
Μάρτυρας	42,5	18,0
Ελλειμματική άρδευση	45,7	12,0
Σημαντικότητα		
Μεταχείριση	NS	*

Σημαντικότητα: NS μη σημαντική διαφορά, * επίπεδο σημαντικότητας 0,05.

Ο αριθμός φύλλων στο καρποφόρο τμήμα ήταν ελαφρώς μικρότερος στην ελλειμματική μεταχείριση, χωρίς όμως να καταγράφεται στατιστική σημαντικότητα. Επιπλέον, ο αριθμός των μεσογονατίων στο καρποφόρο τμήμα ήταν μικρότερος στην ελλειμματική άρδευση σε σχέση με τον μάρτυρα. Όσον αφορά το μήκος των μεσογονατίων, αυτό ήταν μικρότερο στην ελλειμματική άρδευση συγκριτικά με τον μάρτυρα, χωρίς όμως να είναι σημαντική η διαφορά (Πίνακας 3.1.2).

Πίνακας 3.1.2 Αριθμός φύλλων και μεσογονατίων στο καρποφόρο τμήμα και μήκος μεσογονατίων στο καρποφόρο τμήμα βλαστού καρυδιάς των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

Μεταχείριση	Αριθμός φύλλων στο καρποφόρο τμήμα	Αριθμός μεσογονατίων στο καρποφόρο τμήμα	Μήκος μεσογονατίων στο καρποφόρο τμήμα
Μάρτυρας	7,81	6,81	2,91
Ελλειμματική άρδευση	6,54	5,54	2,06
Σημαντικότητα			
Μεταχείριση	NS	*	NS

Σημαντικότητα: NS μη σημαντική διαφορά, * επίπεδο σημαντικότητας 0,05.

3.1.2. Αριθμός οφθαλμών και διάμετρος ετήσιων βλαστών

Ο αριθμός μικτών οφθαλμών ήταν υψηλότερος στον μάρτυρα και η διαφορά αυτή κρίθηκε στατιστικά σημαντική. Αντίθετα, ο αριθμός μικτών οφθαλμών ανά cm βλαστού δεν εμφάνισε σημαντική διαφορά. Η ελλειμματική άρδευση παρουσίασε παρόμοιο αριθμό αρσενικών οφθαλμών με τον μάρτυρα. Ωστόσο, όταν ο αριθμός των αρσενικών οφθαλμών εκφράστηκε ανά μονάδα μήκους βλαστού, βρέθηκε ότι η ελλειμματική άρδευση είχε μεγαλύτερο αριθμό αρσενικών οφθαλμών σε σχέση με τον μάρτυρα. Η διάμετρος των ετήσιων βλαστών δεν παρουσίασε στατιστικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων, αν και παρατηρείται ελαφρώς μικρότερη στην ελλειμματική άρδευση (Πίνακας 3.1.3).

Πίνακας 3.1.3 Αριθμός μικτών και αρσενικών οφθαλμών, αριθμός μικτών και αρσενικών οφθαλμών/cm και διάμετρος ετήσιων βλαστών των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

Μεταχείριση	Αριθμός μικτών οφθαλμών	Αριθμός μικτών οφθαλμών/cm	Αριθμός αρσενικών οφθαλμών	Αριθμός αρσενικών οφθαλμών/ cm	Διάμετρος ετήσιων βλαστών (mm)
-------------	-------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	---	---

Μάρτυρας	8,63	0,59	3,19	0,186	13,0
Ελλειμματική άρδευση	6,66	0,67	3,55	0,368	12,0
Σημαντ.					
Μεταχείριση	*	NS	NS	*	NS

Σημαντικότητα: NS μη σημαντική διαφορά, * επίπεδο σημαντικότητας 0,05.

3.1.3 Ποσοστά ξηράς ουσίας οφθαλμών και μεσογονατίων

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται το ποσοστό ξηράς ουσίας των μικτών και αρσενικών οφθαλμών καθώς και των μεσογονατίων του καρποφόρου τμήματος. Το ποσοστό ξηράς ουσίας των μικτών και αρσενικών οφθαλμών παρουσίασε χαμηλότερες τιμές στην ελλειμματική άρδευση σε σχέση με τον μάρτυρα, ενώ το ποσοστό ξηράς ουσίας των μεσογονατίων ήταν παρόμοιο μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων (Πίνακας 3.1.4).

Πίνακας 3.1.4 Ποσοστό % ξηράς ουσίας μικτών οφθαλμών, αρσενικών οφθαλμών και μεσογονατίων των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

Μεταχείριση	Ποσοστό Ξηράς Ουσίας μικτών οφθαλμών (%)	Ποσοστό Ξηράς Ουσίας αρσενικών οφθαλμών (%)	Ποσοστό Ξηράς Ουσίας μεσογονατίων (%)
Μάρτυρας	61,3	65,7	58,4
Ελλειμματική άρδευση	60,5	64,2	58,6
Σημαντικότητα			
Μεταχείριση	*	*	NS

Σημαντικότητα: NS μη σημαντική διαφορά, * επίπεδο σημαντικότητας 0,05.

3.1.4 Αναπτυξιακά χαρακτηριστικά ετήσιων βλαστών και καρποφόρου τμήματος της επόμενης καλλιεργητικής περιόδου (2025)

Παρουσιάζονται το συνολικό μήκος του βλαστού, το μήκος του καρποφόρου τμήματος (Πίνακας 3.1.5) και τα χαρακτηριστικά του τμήματος αυτού για την καλλιεργητική περίοδο του 2025 (Πίνακας 3.1.6). Η ελλειμματική άρδευση παρουσίασε μικρότερο συνολικό μήκος βλαστού σε σχέση με τον μάρτυρα, ενώ το μήκος του καρποφόρου τμήματος ήταν παρόμοιο μεταξύ των μεταχειρίσεων (Πίνακας 3.1.5).

Πίνακας 3.1.5 Συνολικό μήκος ετήσιου βλαστού και μήκος καρποφόρου τμήματος βλαστού καρυδιάς των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

Μεταχείριση	Συνολικό μήκος ετήσιου βλαστού (cm)	Μήκος καρποφόρου τμήματος βλαστού (cm)
Μάρτυρας	46,8	27,8
Ελλειμματική άρδευση	41,3	27,5
Σημαντικότητα		
Μεταχείριση	*	NS

Σημαντικότητα: NS μη σημαντική διαφορά, * επίπεδο σημαντικότητας 0,05.

Ο αριθμός φύλλων, ο αριθμός μεσογονατίων, καθώς και η διάμετρος των βλαστών δεν εμφάνισαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων (Πίνακας 3.1.6).

Πίνακας 3.1.6 Αριθμός φύλλων και μεσογονατίων στο καρποφόρο τμήμα, μήκος μεσογονατίων, αριθμός φύλλων ανά εκατοστό στο καρποφόρο τμήμα και διάμετρος ετήσιων βλαστών καρυδιάς των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

Μεταχείριση	Αριθμός φύλλων στο	Αριθμός φύλλων στο	Αριθμός Μεσογο-νατίων στο	Μήκος μεσογο-νατίων στο	Διάμετρος ετήσιων βλαστών (mm)
-------------	--------------------	--------------------	---------------------------	-------------------------	--------------------------------

	καρποφόρο τμήμα	καρποφόρο τμήμα/cm	καρποφόρο τμήμα	καρποφόρο τμήμα	
Μάρτυρας	10,3	0,387	9,33	2,96	12,1
Ελλειμματική άρδευση	9,32	0,356	8,32	3,28	11,8
Σημαντ.					
Μεταχείριση	NS	NS	NS	NS	NS

3.2 Διαστάσεις και βάρος ανώριμου καρπού

Οι μετρήσεις των διαστάσεων (μήκος και πλάτος), του νωπού και ξηρού βάρους, καθώς και του ποσοστού ξηράς ουσίας ολόκληρου του ανώριμου καρπού πραγματοποιήθηκαν στις 26 Ιουνίου 2024, τρεις μήνες περίπου πριν τη συγκομιδή. Στο συγκεκριμένο στάδιο ανάπτυξης του καρπού δεν παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων σε κανένα από τα χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν (Πίνακας 3.2).

Πίνακας 3.2 Μήκος, πλάτος, νωπό βάρος, ξηρό βάρος και ποσοστό % ξηράς ουσίας ανώριμων καρπών καρυδιάς των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

Μεταχείριση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Νωπό βάρος ανώριμου καρπού (g)	Ξηρό βάρος ανώριμου καρπού (g)	Ποσοστό Ξηράς Ουσίας (%)
Μάρτυρας	44,7	40,8	38,8	5,29	13,6
Ελλειμματική άρδευση	45,2	41,8	40,3	5,61	13,9
Σημαντικότητα					
Μεταχείριση	NS	NS	NS	NS	NS

Σημαντικότητα: NS μη σημαντική διαφορά.

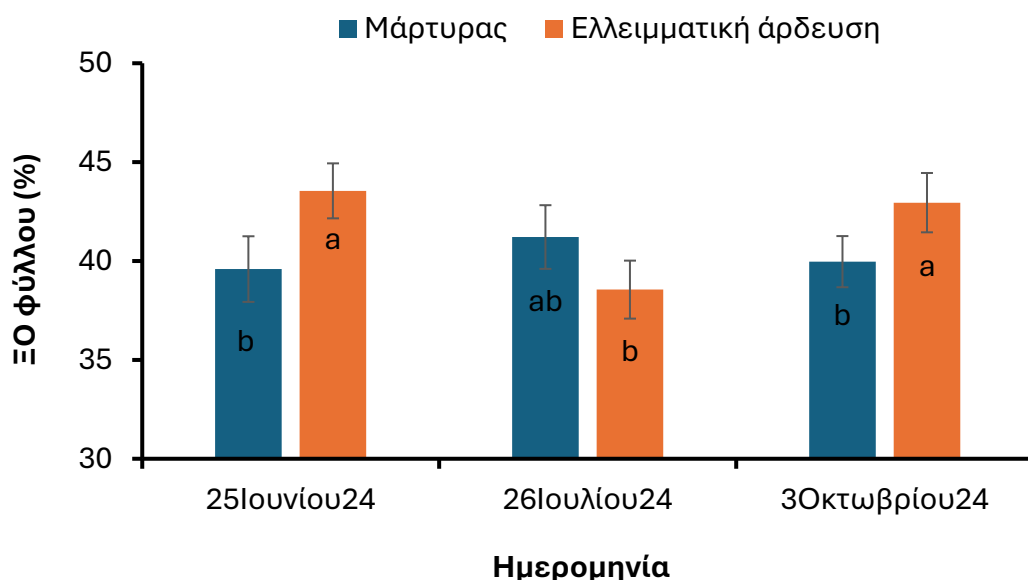
3.3 Φυσιολογικά χαρακτηριστικά φύλλων

Οι μετρήσεις των φυσιολογικών χαρακτηριστικών των φύλλων πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές ημερομηνίες, δύο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (25 Ιουνίου, 26 Ιουλίου) που παρατηρείται έντονη θερμική καταπόνηση και μία στις αρχές φθινοπώρου (3 Οκτωβρίου) με το πέρας των υψηλών θερμοκρασιών.

3.3.1 Ποσοστό ξηράς ουσίας και ειδικό βάρος φύλλων

Το ποσοστό ξηράς ουσίας φύλλου δεν παρουσίασε αξιοσημείωτες διαφορές με την εποχή μέτρησης, ενώ στην περίπτωση της ελλειμματικής άρδευσης μειώθηκε από τα τέλη Ιουνίου έως τα τέλη Ιουλίου και αυξήθηκε ξανά το φθινόπωρο.

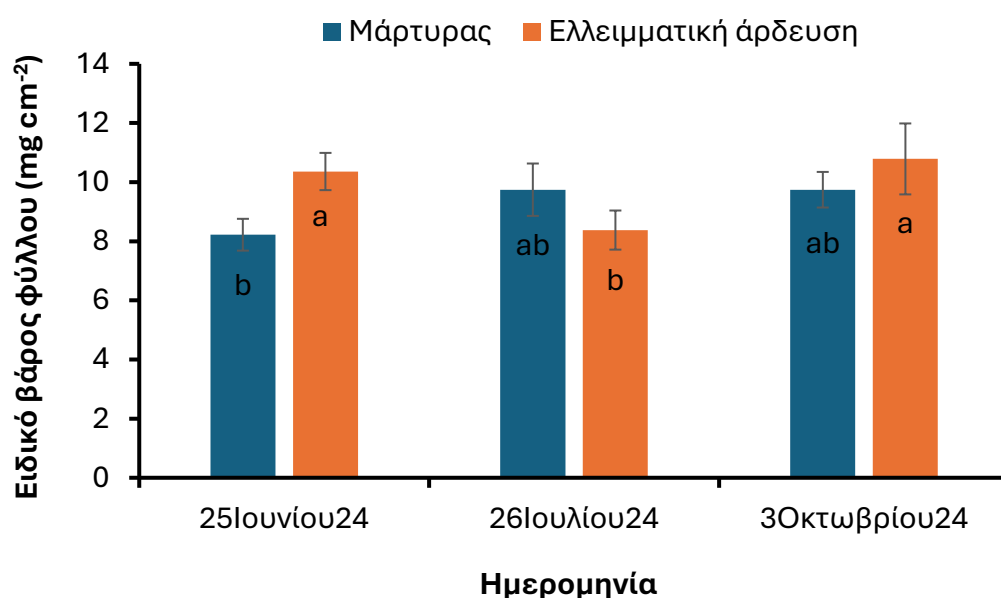
Συγκρίνοντας τις δύο μεταχειρίσεις βρέθηκε ότι τον Ιούνιο η ελλειμματική άρδευση είχε σημαντικά υψηλότερη τιμή ποσοστού ξηράς ουσίας φύλλου συγκριτικά με τον μάρτυρα. Τον Ιούλιο, παρατηρήθηκε αντιστροφή της τάσης, με τον μάρτυρα να εμφανίζει ελαφρώς υψηλότερο ποσοστό ξηράς ουσίας, ενώ τον Οκτώβριο η ελλειμματική μεταχείριση υπερείχε ξανά σε σχέση με τον μάρτυρα (Διάγραμμα 3.4.1).



Διάγραμμα 3.3.1 Ποσοστό % ξηράς ουσίας φύλλων καρδιάς των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

Όσον αφορά το ειδικό βάρος φύλλου, στον μάρτυρα αυξήθηκε ελαφρώς από τα τέλη Ιουνίου έως τα Τέλη Ιουλίου και έπειτα ήταν παρόμοιο έως τις αρχές Οκτωβρίου (Διάγραμμα 3.3.2). Στην ελλειμματική άρδευση το ειδικό βάρος φύλλου μειώθηκε από τα τέλη Ιουνίου έως τα τέλη Ιουλίου και αυξήθηκε ξανά το φθινόπωρο (Διάγραμμα 3.3.2).

Από τη σύγκριση των μεταχειρίσεων προέκυψε ότι τα φύλλα των δένδρων της ελλειμματικής άρδευσης είχαν υψηλότερη τιμή σε σχέση με τον μάρτυρα τον Ιούνιο και ελαφρώς τον Οκτώβριο, ενώ αντίθετα τον Ιούλιο ο μάρτυρας είχε ελαφρώς υψηλότερη τιμή (Διάγραμμα 3.4.2).



Διάγραμμα 3.3.2 Ειδικό βάρος φύλλων καρυδιάς των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

3.3.2 Συγκέντρωση των φύλλων σε χλωροφύλλη

Αναφορικά με τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης a, χλωροφύλλης b και συνολικής χλωροφύλλης ανά g ξ.β. φύλλου (mg g⁻¹), παρατηρήθηκαν παρόμοιες αλλαγές μεταξύ των τιμών των δύο μεταχειρίσεων. Η συγκέντρωση της χλωροφύλλης ήταν σε υψηλά επίπεδα στις πρώτες μετρήσεις, όμως στις 3 Οκτωβρίου 2024 παρατηρήθηκε σημαντική μείωση. Η ολική χλωροφύλλη παρουσίασε τη μεγαλύτερη

μείωση με την πάροδο του χρόνου. Συγκεκριμένα, στις 25 Ιουνίου, ο μάρτυρας παρουσίασε υψηλότερες τιμές χλωροφύλλης ανά g σε σχέση με τη μεταχείριση της ελλειμματικής άρδευσης, ενώ τον Ιούλιο, η ελλειμματική άρδευση εμφάνισε υψηλότερη χλωροφύλλη b και συνολική χλωροφύλλη ανά g, χωρίς να υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Τον Οκτώβριο, καταγράφηκαν μειώσεις και στις δύο μεταχειρίσεις, με την ελλειμματική να εμφανίζει μεγαλύτερες διαφορές τιμών συγκριτικά με τον χρόνο και τον μάρτυρα να έχει υψηλότερες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης σε σύγκριση με την ελλειμματική άρδευση. Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων παρατηρήθηκε στη σύγκριση των τιμών της χλωροφύλλης b.

Οι τιμές του λόγου Chla/Chlb διαφοροποιήθηκαν μεταξύ των ημερομηνιών και των μεταχειρίσεων. Τον Ιούλιο και οι δύο μεταχειρίσεις παρουσίασαν μια μικρή μείωση στις τιμές τους σε σχέση με τον Ιούνιο, με την ελλειμματική να έχει την μεγαλύτερη τιμή από τις δύο. Τον μήνα Οκτώβριο, ο λόγος Chla/Chlb στην ελλειμματική άρδευση αυξήθηκε και ήταν σημαντικά υψηλότερος σε σχέση με τον μάρτυρα, που συνέχισε την πτωτική πορεία. (Πίνακας 3.4.1).

Πίνακας 3.3.1 Συγκέντρωση σε χλωροφύλλη α (Chla), χλωροφύλλη β (Chlb) και ολική χλωροφύλλη (Total Chl) ανά g ξηρού βάρους φύλλων καρδιάς και λόγος χλωροφύλλη α/χλωροφύλλη β (Chla/Chlb) των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

Ημερομηνία	Μεταχείριση	Chla (mg/gr)	Chlb (mg/gr)	Total Chl (mg/gr)	Chla/Chlb
25 Ιουνίου 2024	Μάρτυρας	4,88a	1,86a	6,74a	2,63ab
	Ελλειμματική άρδευση	4,20ab	1,52ab	5,72ab	2,75ab
26 Ιουλίου 2024	Μάρτυρας	5,00a	1,62a	5,72ab	2,53ab
	Ελλειμματική άρδευση	4,52a	1,71a	6,24ab	2,65ab
	Μάρτυρας	3,50b	1,55a	5,04b	2,26b

3 Οκτωβρίου 2024	Ελλειμματική άρδευση	3,23b	1,12b	4,35b	2,92a
Σημαντ.					
Ημερομηνία		**	*	**	NS
Μεταχείριση		NS	*	**	*

Σημαντικότητα: NS μη σημαντική διαφορά, * επίπεδο σημαντικότητας 0,05 και ** επίπεδο σημαντικότητας 0,01.

Όσον αφορά τις τιμές χλωροφύλλης a, χλωροφύλλης b και της συνολικής χλωροφύλλης ανά μονάδα επιφανείας φύλλου (mg/m^2), η ελλειμματική άρδευση εμφάνισε υψηλότερες τιμές σε όλους τους δείκτες σε σχέση με τον μάρτυρα τον μήνα Ιούνιο. Στην επόμενη μέτρηση, καταγράφηκε μείωση της χλωροφύλλης και στις δύο μεταχειρίσεις, με τον μάρτυρα να διατηρεί ελαφρώς υψηλότερες τιμές ολικής χλωροφύλλης. Τον Οκτώβριο, παρατηρήθηκε περαιτέρω μείωση των συγκεντρώσεων, με τη χλωροφύλλη b να παρουσιάζει έντονη πτώση στην ελλειμματική άρδευση (Πίνακας 3.5.2).

Πίνακας 3.3.2 Συγκέντρωση σε χλωροφύλλη α, χλωροφύλλη β και ολική χλωροφύλλη ανά μονάδα επιφάνειας φύλλου σε δέντρα καρυδιάς των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

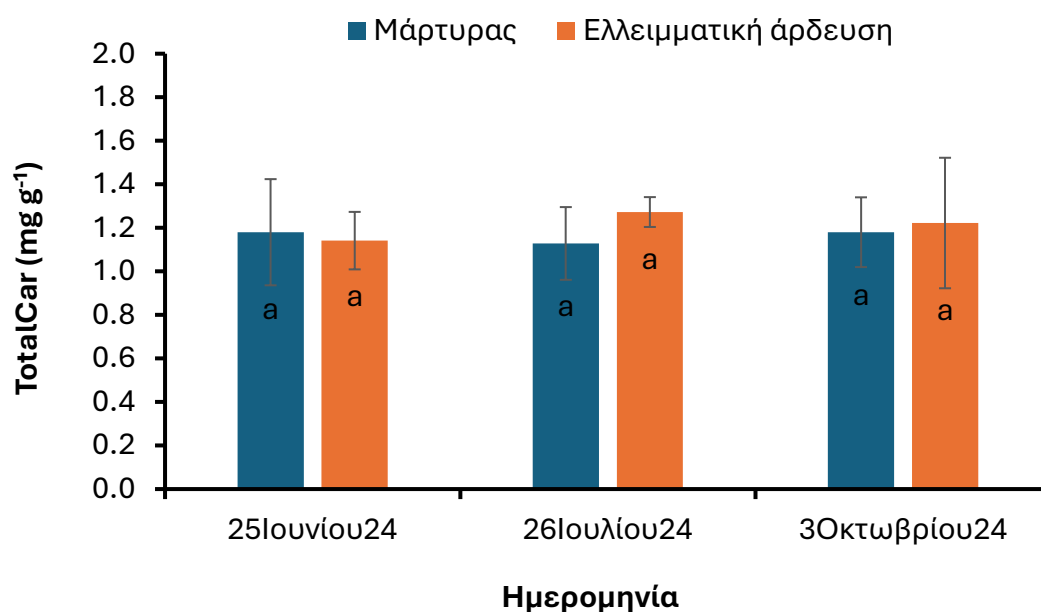
Ημερομηνία	Μεταχείριση	Chla (mg m^{-2})	Chlb (mg m^{-2})	TotalChl (mg m^{-2})
25 Ιουνίου 2024	Μάρτυρας	395ab	150	545ab
	Ελλειμματική άρδευση	421a	153	574a
26 Ιουλίου 2024	Μάρτυρας	364ab	144	508ab
	Ελλειμματική άρδευση	355b	135	490ab
3 Οκτωβρίου 2024	Μάρτυρας	336b	149	484b
	Ελλειμματική άρδευση	343b	122	464b

Σημαντικότητα				
Ημερομηνία		*	NS	*
Μεταχείριση		NS	NS	NS

Σημαντικότητα: NS μη σημαντική διαφορά, * επίπεδο σημαντικότητας 0,05.

3.3.3 Συγκέντρωση ολικών καροτενοειδών

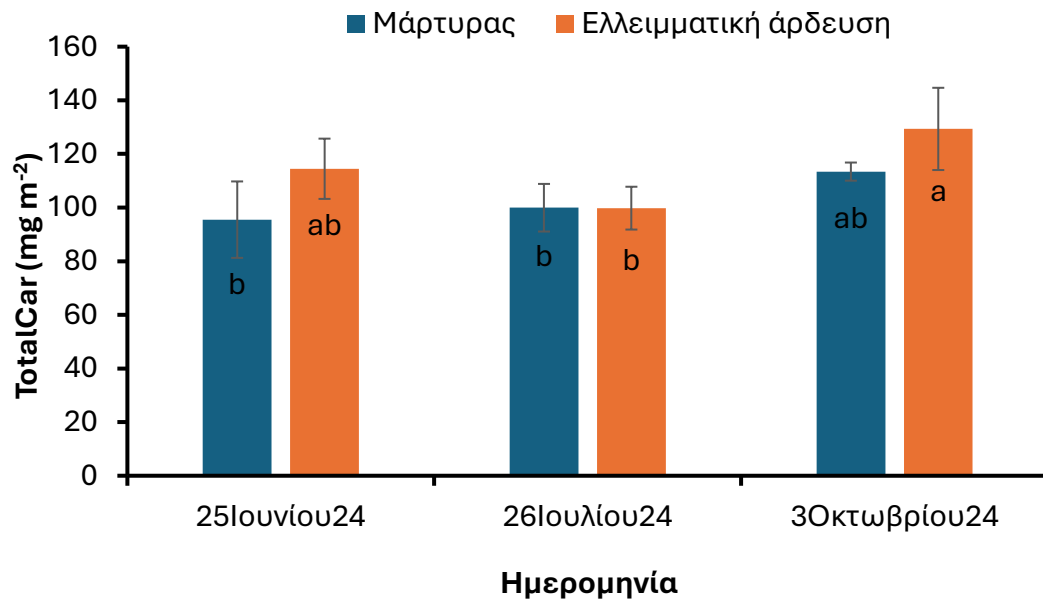
Η συγκέντρωση των ολικών καροτενοειδών ανά g ξηρού βάρους φύλλου ήταν παρόμοια μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων άρδευσης και δεν παρουσίασε αξιόλογες μεταβολές με την εποχή μέτρησης (Διάγραμμα 3.5.3).



Διάγραμμα 3.3.3 Συγκέντρωση ολικών καροτενοειδών ανά μονάδα ξηρού βάρους των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

Όταν η συγκέντρωση των ολικών καροτενοειδών εκφράστηκε ανά μονάδα επιφανείας φύλλου (mg m⁻²), βρέθηκε ότι στα τέλη Ιουνίου η συγκέντρωση καροτενοειδών ήταν σχετικά υψηλότερη στην ελλειμματική άρδευση συγκριτικά με τον μάρτυρα. Τον Ιούλιο, παρατηρήθηκε σταθεροποίηση των επιπέδων, με τις τιμές να παρουσιάζουν μείωση στην ελλειμματική άρδευση και μικρή αύξηση στον μάρτυρα. Τον Οκτώβριο,

και οι δύο μεταχειρίσεις παρουσίασαν αύξηση των ολικών καροτενοειδών, όμως στην ελλειμματική ήταν σημαντικά μεγαλύτερη (Διάγραμμα 3.5.4).



Διάγραμμα 3.3.4 Συγκέντρωση ολικών καροτενοειδών ανά μονάδα επιφανείας φύλλου των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

3.4 Ανάπτυξη και ποιοτικά χαρακτηριστικά ώριμου καρπού

3.4.1 Διαστάσεις καρπού

Ο πίνακας 3.3.1 παρουσιάζει το συνολικό μήκος και πλάτος του ώριμου καρπού στη συγκομιδή. Η ελλειμματική άρδευση παρουσίασε μικρότερο μήκος και πλάτος καρπού συγκριτικά με τον μάρτυρα (Πίνακας 3.3.1).

Πίνακας 3.3.1 Μήκος και πλάτος ώριμων καρπών καρυδιάς των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

Μεταχείριση	Μήκος καρπού (mm)	Πλάτος καρπού (mm)
Μάρτυρας	49,3	45,4
Ελλειμματική άρδευση	47,4	44,3
Σημαντικότητα		
Μεταχείριση	**	*

Σημαντικότητα: * επίπεδο σημαντικότητας 0,05 και ** επίπεδο σημαντικότητας 0,01.

3.4.2 Νωπό-ξηρό βάρος και ποσοστό % ξηράς ουσίας περικαρπίου και ενδοκαρπίου

Το νωπό και το ξηρό βάρος του περικαρπίου δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Ωστόσο, στο ποσοστό ξηράς ουσίας καταγράφηκε σημαντική μείωση στην ελλειμματική άρδευση σε σχέση με τον μάρτυρα (Πίνακας 3.3.2).

Πίνακας 3.4.2 Νωπό βάρος, ξηρό βάρος και ποσοστό % ξηράς ουσίας περικαρπίου ώριμων καρπών καρυδιάς των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

Μεταχείριση	Νωπό Βάρος περικαρπίου (g)	Ξηρό Βάρος περικαρπίου (g)	Ποσοστό Ξηράς Ουσίας περικαρπίου (%)
-------------	-------------------------------	-------------------------------	--

Μάρτυρας	27,9	3,09	11,1
Ελλειμματική άρδευση	28,8	2,98	10,3
Σημαντικότητα			
Μεταχείριση	NS	NS	*

Σημαντικότητα: NS μη σημαντική διαφορά, * επίπεδο σημαντικότητας 0,05.

Όσον αφορά το νωπό και το ξηρό βάρος του ενδοκαρπίου, καθώς και το ποσοστό ξηράς ουσίας, όλες οι παράμετροι παρουσίασαν παρόμοιες τιμές στις δύο μεταχειρίσεις και καμία διαφορά δεν κρίθηκε στατιστικά σημαντική (Πίνακας 3.3.3).

Πίνακας 3.4.3 Νωπό βάρος, ξηρό βάρος και ποσοστό % ξηράς ουσίας ενδοκαρπίου καρπών καρυδιάς των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

Μεταχείριση	Νωπό βάρος ενδοκαρπίου (g)	Ξηρό βάρος ενδοκαρπίου (g)	Ποσοστό Ξηράς Ουσίας ενδοκαρπίου (%)
Μάρτυρας	19,4	11,7	60,3
Ελλειμματική άρδευση	19,3	11,5	59,9
Σημαντικότητα			
Μεταχείριση	NS	NS	NS

Σημαντικότητα: NS μη σημαντική διαφορά.

3.4.3 Διαστάσεις ενδοκαρπίου και σπέρματος

Μετά τον διαχωρισμό του περικαρπίου από τον καρπό, μετρήθηκαν οι διαστάσεις του καρπού με το ενδοκάρπιο, δηλαδή με το κέλυφος. Από τις μετρούμενες παραμέτρους, το μήκος, το πλάτος και το πάχος, μόνο το πλάτος παρουσίασε στατιστικά σημαντική διαφορά, με την ελλειμματική άρδευση να εμφανίζει μικρότερη τιμή συγκριτικά τον μάρτυρα. Το μήκος και το πάχος του καρπού με το ενδοκάρπιο δεν επηρεάστηκαν σημαντικά από τη μεταχείριση (Πίνακας 3.3.4).

Πίνακας 3.4.4 Μήκος, πλάτος και πάχος καρπών καρυδιάς με το ενδοκάρπιο των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

Μεταχείριση	Μήκος ενδοκαρπίου (mm)	Πλάτος ενδοκαρπίου (mm)	Πάχος ενδοκαρπίου (mm)
Μάρτυρας	37,8	32,5	33,1
Ελλειμματική άρδευση	37,8	32,0	32,8
Σημαντικότητα			
Μεταχείριση	NS	*	NS

Σημαντικότητα: NS μη σημαντική διαφορά, * επίπεδο σημαντικότητας 0,05.

Αντιστοίχως και στις μετρήσεις διαστάσεων του σπέρματος (ψίχας), μόνο οι τιμές του πλάτους της μεταχείρισης της ελλειμματικής άρδευσης ήταν μικρότερες από τις τιμές του μάρτυρα. Το μήκος και το πάχος σπέρματος ήταν παρόμοια μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων άρδευσης (Πίνακας 3.3.5).

Πίνακας 3.4.5 Μήκος, πλάτος και πάχος σπέρματος καρπών καρυδιάς των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

Μεταχείριση	Μήκος σπέρματος (mm)	Πλάτος σπέρματος (mm)	Πάχος σπέρματος (mm)
Μάρτυρας	27,2	24,5	11,2
Ελλειμματική άρδευση	26,6	22,8	10,5
Σημαντικότητα			
Μεταχείριση	NS	**	NS

Σημαντικότητα: NS μη σημαντική διαφορά, ** επίπεδο σημαντικότητας 0,01.

3.4.4 Παράμετροι χρώματος και βάρους ψίχας

Η τιμή του δείκτη φωτεινότητας L* ήταν υψηλότερη στον μάρτυρα συγκριτικά με την ελλειμματική άρδευση, ενώ οι παράμετροι a* και b* δεν εμφάνισαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Το βάρος της ψίχας του καρπού ήταν μικρότερο στην ελλειμματική άρδευση σε σχέση με τη μεταχείριση του μάρτυρα (Πίνακας 3.3.6).

Πίνακας 3.4.6 Χρώμα L*, a*, b* και βάρος ψίχας καρπών καρυδιάς των μεταχειρίσεων του μάρτυρα και της ελλειμματικής άρδευσης.

Μεταχείριση	L*	a*	b*	Βάρος ψίχας καρπού (g)
Μάρτυρας	56,0	5,41	28,7	5,15
Ελλειμματική άρδευση	50,5	5,80	27,3	4,55
Σημαντικότητα				
Μεταχείριση	*	NS	NS	*

Σημαντικότητα: NS μη σημαντική διαφορά, * επίπεδο σημαντικότητας 0,05.

4. Συζήτηση

Η ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε στις διαφορετικές μεταχειρίσεις του πειράματος αντικατοπτρίζει διαφορετικά επίπεδα υδατικής επάρκειας και επέτρεψε την παρακολούθηση της φυσιολογικής προσαρμογής της καρυδιάς σε συνθήκες υδατικού περιορισμού. Η καρυδιά είναι δέντρο με υψηλές απαιτήσεις σε νερό, ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο, και η έλλειψή του μπορεί να περιορίσει τους ρυθμούς φωτοσύνθεσης, και διαπνοής, και την ανάπτυξη (McElrone et al., 2010). Τα στομάτια της καρυδιάς τείνουν να κλείνουν όταν το υδατικό δυναμικό των φύλλων φτάνει περίπου τα $-1,6$ MPa (Cochard et al., 2002). Αυτή η αντίδραση οδηγεί σε μείωση του ρυθμού διαπνοής και λειτουργεί ως μηχανισμός προστασίας απέναντι στην αφυδάτωση, ενισχύοντας παράλληλα την αποδοτικότητα χρήσης του νερού. Η ρύθμιση αυτή είναι καθοριστική για την κατανόηση της σχέσης μεταξύ παραγωγικότητας και ανθεκτικότητας στην ξηρασία (Pereira et al., 2012).

4.1 Επίδραση της ελλειμματικής άρδευσης στα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά ετήσιων βλαστών

Όσον αφορά τα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά των βλαστών, η ελλειμματική άρδευση προκάλεσε μείωση του μήκους του καρποφόρου τμήματος, του αριθμού μικτών οφθαλμών και των μεσογονατίων στο καρποφόρο τμήμα, ενώ παρατηρήθηκε ότι το συνολικό μήκος του βλαστού μειώθηκε μετά από ένα έτος χρήσης ελλειμματικής άρδευσης. Επιπλέον τα ποσοστά ξηράς ουσίας των μικτών και των αρσενικών οφθαλμών είχαν μειωθεί λόγω μειωμένης επάρκειας νερού. Αντίστοιχη παρατήρηση καταγράφεται και στη μελέτη των Calvo et al. (2023), οι οποίοι αναφέρουν ότι υπό καθεστώς ελεγχόμενης ελλειμματικής άρδευσης, η καρυδιά διατηρεί τη βλαστική της ανάπτυξη, ενώ περιορίζει τη διαφοροποίηση μικτών και αρσενικών οφθαλμών. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η στρατηγική αυτή αποτελεί τρόπο εξοικονόμησης πόρων, με τα δέντρα να επενδύουν στη συντήρηση και λιγότερο στην αναπαραγωγή. Επομένως, το φαινόμενο αυτό μπορεί να ερμηνευτεί ως προσαρμοστικός μηχανισμός του φυτού για να διατηρηθεί, εις βάρος των αναπαραγωγικών του δομών.

Επιπλέον, στην παρούσα μελέτη καταγράφηκε σημαντικά αυξημένος αριθμός αρσενικών οφθαλμών ανά cm βλαστού στη μεταχείριση της ελλειμματικής άρδευσης, εύρημα που ενισχύει την υπόθεση μετατόπισης της αναπαραγωγικής στρατηγικής του

δέντρου προς τη συντήρηση. Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω με την απουσία σημαντικών διαφορών στα ποσοστά ξηράς ουσίας, γεγονός που υποδηλώνει ότι η βασική δομική σύσταση των ιστών παρέμεινε σχετικά σταθερή ανεξαρτήτως μεταχείρισης, φαίνεται η ικανότητα του φυτού στη διατήρηση ισορροπίας ανάμεσα στις απαιτήσεις της επιβίωσης υπό μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες και στην εξασφάλιση της αναπαραγωγικής του επιτυχίας (Oddou-Muratorio et al., 2021).

4.2 Επίδραση της ελλειμματικής άρδευσης στα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φύλλων

Αναφορικά με τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φύλλων, τα αποτελέσματα έδειξαν εποχιακή πτώση των επιπέδων χλωροφύλλης τόσο στη μεταχείριση ελλειμματικής άρδευσης όσο και στον μάρτυρα, από τον Ιούνιο έως τον Οκτώβριο. Η μείωση αυτή ερμηνεύεται ως φυσιολογική φθορά των δομών των χλωροπλαστών κατά την ωρίμανση και γήρανση των φύλλων. Ωστόσο, η μεταχείριση ελλειμματικής άρδευσης παρουσίασε υψηλότερες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης *a* στην πρώτη δειγματοληψία, γεγονός που ενδέχεται να αντανakλά αντισταθμιστική φωτοσυνθετική απόκριση κατά τα αρχικά στάδια της ήπιας υδατικής καταπόνησης (Ammar et al., 2020). Προς το τέλος της περιόδου, οι τιμές της χλωροφύλλης *b* και της συνολικής χλωροφύλλης μειώθηκαν σημαντικά στη μεταχείριση της ελλειμματικής άρδευσης, υποδηλώνοντας σταδιακή αποδόμηση των φωτοσυνθετικών χρωστικών και πιθανή υποβάθμιση της φωτοχημικής ικανότητας των φύλλων (Guiqing et al., 2024). Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάστηκαν από τους Chen et al. (2022), οι οποίοι κατέγραψαν μείωση της χλωροφύλλης σε δέντρα καρδιάς υπό συνθήκες περιορισμένης άρδευσης, χωρίς όμως να διαπιστωθεί σοβαρή επίπτωση στην αποδοτικότητα της φωτοσύνθεσης. Αντίστοιχα, η έρευνα των Liu et al. (2019) επιβεβαιώνει ότι ήπια υδατική καταπόνηση μπορεί να οδηγήσει σε μικρές μεταβολές στα επίπεδα χλωροφύλλης χωρίς να επηρεάζεται ουσιαστικά ο φωτοχημικός μηχανισμός. Σε μεταγενέστερη έρευνα των Liu et al. (2022), διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή ελλειμματικής άρδευσης κατά τη διάρκεια του βιολογικού κύκλου της καρδιάς οδηγεί σε μείωση της περιεκτικότητας των φύλλων σε χλωροφύλλη, με μοναδική εξαίρεση την εφαρμογή ήπιας ελλειμματικής άρδευσης κατά την περίοδο ανθοφορίας–καρπώδεσης, η οποία, εφόσον ακολουθηθεί από κανονική άρδευση στα

επόμενα στάδια, επιτρέπει την αποκατάσταση των επιπέδων χλωροφύλλης στα κανονικά επίπεδα.

Η αυξημένη συγκέντρωση καροτενοειδών ανά m^2 που καταγράφηκε στην ελλειμματική μεταχείριση, κυρίως προς το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, ενδεχομένως αντανακλά ενεργοποίηση αμυντικών φυσιολογικών μηχανισμών του φυτού έναντι της οξειδωτικής καταπόνησης που προκαλείται από την παρατεταμένη υδατική πίεση. Η συσσώρευση καροτενοειδών σε αυτές τις συνθήκες μπορεί να λειτουργεί προστατευτικά για τις φωτοσυνθετικές δομές, όπως υποστηρίζεται και από τους Guiqing et al. (2024), αλλά και από την έρευνα των Chen et al. (2022), στην οποία παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση αυτών των χρωστικών σε καρυδιές υπό συνθήκες μέτριας υδατικής καταπόνησης.

4.3 Επίδραση της ελλειμματικής άρδευσης στα αναπτυξιακά και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του καρπού

Σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά του καρπού, η επίδραση της ελλειμματικής άρδευσης ήταν περισσότερο εμφανής στα τελικά στάδια ανάπτυξης, επηρεάζοντας κυρίως τα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Στο στάδιο του ανώριμου καρπού, αν και δεν καταγράφηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στο μήκος, το πλάτος και το βάρος του, η ελλειμματική άρδευση προκάλεσε μείωση στο τελικό πλάτος και βάρος του σπέρματος, μεταβολές που δύνανται να επηρεάσουν την εμπορική ποιότητα του προϊόντος. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στην μελέτη των Perulli et al. (2025), προσδιορίζοντας πως η μείωση της ψίχας συνδέεται άμεσα με την υδατική διαθεσιμότητα κατά την περίοδο πλήρωσης του σπέρματος και είναι κρίσιμη για την διατήρηση σταθερής ποιότητας καρπού.

Επιπλέον, η μείωση της φωτεινότητας της ψίχας (L^*), υποδηλώνει μερική υποβάθμιση της εσωτερικής ποιότητας του καρπού υπό ελλειμματική άρδευση. Σύμφωνα με τους Ramos et al. (1978), παρουσία υδατικής καταπόνησης στα τέλη του καλοκαιριού, με την ανάπτυξη του εμβρύου, προκαλεί αλλοίωση του χρωματισμού της ψίχας, επιβεβαιώνοντας τα ευρήματα αυτής της μελέτης. Σε έρευνα των Durán Zuazo et al. (2025), τα καρύδια που υπέστησαν υδατική καταπόνηση εμφάνισαν υψηλότερες

τιμές φωτεινότητας (L^*) σε σχέση με τα μη στρεσαρισμένα και στα έντονα στρεσαρισμένα δέντρα παρατηρήθηκε χαμηλή τιμή της παραμέτρου a^* .

Αναφέρθηκε, επίσης, μείωση στο ποσοστό ξηράς ουσίας του περικαρπίου στη μεταχείριση της ελλειμματική άρδευσης, κάτι που υποδηλώνει καθυστέρηση στη λιγνοποίηση των κυτταρικών τοιχωμάτων. Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί με τα ευρήματα των Wu et al. (2021), οι οποίοι συσχέτισαν την περιορισμένη άρδευση με μεταβολές στην αναλογία νερού/δομικών συστατικών, επιδρώντας αρνητικά στη σκληρότητα του περικαρπίου και τη φυσιολογική λειτουργία προστασίας του καρπού.

5. Συμπεράσματα

Ως γενικό συμπέρασμα αναδεικνύεται η δυνατότητα εφαρμογής ελλειμματικής άρδευσης στην καλλιέργεια της καρυδιάς χωρίς να προκαλείται καθολική υποβάθμιση των φυσιολογικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών της. Παρότι παρατηρήθηκαν ορισμένες επιδράσεις σε επιμέρους αναπτυξιακά και ποιοτικά χαρακτηριστικά, τα φυτά επέδειξαν προσαρμοστικότητα και μηχανισμούς αντιστάθμισης που περιόρισαν τις αρνητικές συνέπειες του περιορισμένου υδατικού εφοδιασμού.

Η σημασία αυτών των ευρημάτων είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στη σημερινή πραγματικότητα, με την αυξανόμενη έλλειψη υδατικών πόρων και την ανάγκη για βιώσιμη γεωργία. Η χρήση ελλειμματικής άρδευσης ως στρατηγικής εξοικονόμησης νερού μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για τη διατήρηση της παραγωγικότητας, με παράλληλη μείωση της κατανάλωσης φυσικών πόρων.

Συνολικά, η ελλειμματική άρδευση μπορεί να ενσωματωθεί με επιτυχία σε προγράμματα ορθολογικής διαχείρισης του νερού, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα των καλλιεργειών σε συνθήκες περιβαλλοντικού στρες και συμβάλλοντας σε πιο αειφόρα γεωργικά συστήματα. Η συστηματική αξιολόγηση και η τεκμηρίωση των αποκρίσεων των φυτών σε αυτή τη στρατηγική αποτελούν κρίσιμο βήμα προς την κατεύθυνση μιας πιο υπεύθυνης χρήσης των υδατικών πόρων στη γεωργία.

Η αποτελεσματικότητα αυτής της πρακτικής χρήζει περαιτέρω έρευνας στη μακροπρόθεσμη εφαρμογή και στις επιπτώσεις της στη συνολική βιωσιμότητα της καλλιέργειας, έτσι ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη επίγνωση ως προς την κατάλληλη επιλογή του χρόνου και της έντασης του αρδευτικού περιορισμού, καθώς και από την προσαρμογή της μεθόδου στις ιδιαιτερότητες κάθε καλλιέργειας και περιοχής.

6. Βιβλιογραφία

6.1 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Akca, Y., & Sahin, U. (2022). Responses of ‘Chandler’walnut variety grafted onto different rootstocks to salt stress. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 9(1), 1–13.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., & Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ammar, A., Ben Aissa, I., Mars, M., & Gouiaa, M. (2020). Comparative physiological behavior of fig (*Ficus carica* L.) cultivars in response to water stress and recovery. *Scientia Horticulturae*, 260, 108881. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108881>
- Archer, P., Cohen, M., Améglio, T., Valancogne, C., & Antón, A. (2001). TRUNK DIAMETER VARIATIONS IN RELATION TO WALNUT WATER POTENTIAL. *Acta Horticulturae*, 562, 47–53. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.562.4>
- Ayars, J. E., Fulton, A., & Taylor, B. (2015). Subsurface drip irrigation in California—Here to stay? *Agricultural Water Management*, 157, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.001>
- Bárek, V., Kováčová, M., Kišš, V., & Paulen, O. (2021). Water Regime Monitoring of the Royal Walnut (*Juglans regia* L.) Using Sap Flow and Dendrometric Measurements. *Plants*, 10(11), 2354. <https://doi.org/10.3390/plants10112354>

- Bernard, A., Lheureux, F., & Dirlewanger, E. (2018). Walnut: Past and future of genetic improvement. *Tree Genetics & Genomes*, 14(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s11295-017-1214-0>
- Buchner, R. P., Fulton, A. E., Gilles, C. K., Lampinen, B. D., Shackel, K. A., Metcalf, S. G., Little, C. C., Prichard, T. L., & Schwankl, L. J. (2008). EFFECTS OF REGULATED DEFICIT IRRIGATION ON WALNUT GRAFTED ON “NORTHERN CALIFORNIA BLACK” OR “PARADOX” ROOTSTOCK. *Acta Horticulturae*, 792, 141–146. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.792.14>
- Calvo, F. E., Silvente, S. T., & Trentacoste, E. R. (2023). A mini review of the impacts of deficit irrigation strategies for walnut (*Juglans regia* L.) production in semiarid conditions. *Irrigation Science*, 41(4), 501–509. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00815-w>
- Calvo, F. E., Trentacoste, E. R., & Silvente, S. T. (2022). Vegetative growth, yield, and crop water productivity response to different irrigation regimes in high density walnut orchards (*Juglans regia* L.) in a semi-arid environment in Argentina. *Agricultural Water Management*, 274, 107969. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107969>
- Caprile, J., & Grattan, S. (2006). (111) Evaluation of the Salt Tolerance of Walnut Rootstocks. *HortScience*, 41, 1040A – 1040. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.4.1040A>
- Charrier, G., Bonhomme, M., Lacointe, A., & Améglio, T. (2011). Are budburst dates, dormancy and cold acclimation in walnut trees (*Juglans regia* L.) under mainly genotypic or environmental control? *International Journal of Biometeorology*, 55(6), 763–774. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0470-1>

- Chen, T., Xu, G., Li, J., & Hu, H. (2022). Hydraulic Trait Variation with Tree Height Affects Fruit Quality of Walnut Trees under Drought Stress. *Agronomy*, 12(7), 1647. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071647>
- Cochard, H., Coll, L., Le Roux, X., & Améglio, T. (2002). Unraveling the Effects of Plant Hydraulics on Stomatal Closure during Water Stress in Walnut. *Plant Physiology*, 128(1), 282–290. <https://doi.org/10.1104/pp.010400>
- Cohen, M., Valancogne, C., Dayau, S., Améglio, T., Cruiziat, P., & Archer, P. (1997). YIELD AND PHYSIOLOGICAL RESPONSES OF WALNUT TREES IN SEMI-ARID CONDITIONS: APPLICATION TO IRRIGATION SCHEDULING. *Acta Horticulturae*, 449, 273–280. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.449.39>
- Durán Zuazo, V. H., Cárceles Rodríguez, B., Sendra, E., Carbonell-Barrachina, Á. A., Lipan, L., Hernández, F., Gálvez Ruiz, B., & García-Tejero, I. F. (2025). Yield and Quality of Walnuts Subjected to Deficit Irrigation in Mountainous Water-Starved Environments. *Plants*, 14(12), 1777. <https://doi.org/10.3390/plants14121777>
- Fernández-López, J., Aletà, N., & Alía, R. (2001). *Long term conservation strategies: Juglans regia L. genetic resources conservation strategy*. Unpublished. <https://doi.org/10.13140/2.1.4202.5608>
- Fulton, A., Buchner, R., Gilles, C., Olson, B., Bertagna, N., Walton, J., Schwankl, L., & Shackel, K. (2001). Rapid Equilibration of Leaf and Stem Water Potential under Field Conditions in Almonds, Walnuts, and Prunes. *HortTechnology*, 11(4), 609–615. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.11.4.609>
- Fulton, A. E., Little, C. C., Snyder, R. L., Lampinen, B. D., & Buchner, R. P. (2017). Evaluation of Crop Coefficients and Evapotranspiration in English Walnut.

- 2017 Spokane, Washington July 16 - July 19, 2017. 2017 Spokane, Washington July 16 - July 19, 2017. <https://doi.org/10.13031/aim.201701457>
- Germain, E. (1997). GENETIC IMPROVEMENT OF THE PERSIAN WALNUT (JUGLANS REGIA L.). *Acta Horticulturae*, 442, 21–32. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.442.2>
- Germain, E., Prunet, J.-P., & Garcin, A. (1999). *Le noyer*. CTIFL.
- Guiqing, X., Jinyao, L., Haifang, H., & Tuqiang, C. (2024). Effect of deficit irrigation on physiological, morphological and fruit quality traits of six walnut tree cultivars in the inland area of Central Asia. *Scientia Horticulturae*, 329, 112951. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112951>
- Guizani, M., Dabbou, S., Maatallah, S., Montevecchi, G., Hajlaoui, H., Rezig, M., Helal, A. N., & Kilani-Jaziri, S. (2019). Physiological responses and fruit quality of four peach cultivars under sustained and cyclic deficit irrigation in center-west of Tunisia. *Agricultural Water Management*, 217, 81–97. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.021>
- Integrated pest management for walnuts* (3rd ed). (2003). University of California Statewide Integrated Pest Management Program, Agriculture and Natural Resources.
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter, P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17(4), 1133–1138. <https://doi.org/10.1029/WR017i004p01133>
- Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2427–2436. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh213>

- Jones, H. G., Serraj, R., Loveys, B. R., Xiong, L., Wheaton, A., & Price, A. H. (2009). Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology*, 36(11), 978. <https://doi.org/10.1071/FP09123>
- Jones, J. E., Mueller, R., Van Sambeek, J. W., & Southwest Missouri RC & D (U.S.). (1998). *Nut Production Handbook for Eastern Black Walnut*. Southwest Missouri Resource Conservation & Development (RD&D), Incorporated. <https://books.google.gr/books?id=ZfOSZk4t7aAC>
- Jovanovic, Z., & Stikic, R. (2018). Partial Root-Zone Drying Technique: From Water Saving to the Improvement of a Fruit Quality. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 1, 3. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2017.00003>
- Krueger, W. H. (2000). Pollination of English Walnuts: Practices and Problems. *HortTechnology*, 10(1), 127–130. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.10.1.127>
- Liu, B., Liang, J., Tang, G., Wang, X., Liu, F., & Zhao, D. (2019). Drought stress affects on growth, water use efficiency, gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Juglans* rootstocks. *Scientia Horticulturae*, 250, 230–235. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.056>
- Liu, J.-Q., Zhao, J.-H., Yang, W.-X., Liang, G.-C., & Bai, Y.-G. (2022). Effects of Regulated Deficit Irrigation on Growth, Development and Yield of Walnut Under Drip Irrigation. *Water Saving Irrigation*, 10, 72-78and85. Scopus. <https://doi.org/10.12396/jsgg.2022.155>
- Losche, C. (1973). Black walnut growth better on deep, well-drained bottomland sites. *USDA For. Serv. Res. Note NC-154*.

- Mahmoudian, M., Rahemi, M., Karimi, S., Yazdani, N., Tajdini, Z., Sarikhani, S., & Vahdati, K. (2021). Role of kaolin on drought tolerance and nut quality of Persian walnut. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(6), 409–416. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.05.002>
- Malhotra, S. P. (2008). *World edible nuts economy*. Concept Pub.
- Mazinani, M., Zarafshan, P., Dehghani, M., Vahdati, K., & Etezadi, H. (2023). Design and analysis of an aerial pollination system for walnut trees. *Biosystems Engineering*, 225, 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.12.001>
- McCutchan, H., & Shackel, K. A. (1992). Stem-water Potential as a Sensitive Indicator of Water Stress in Prune Trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(4), 607–611. <https://doi.org/10.21273/JASHS.117.4.607>
- McElrone, A. J., Grant, J. A., & Kluepfel, D. A. (2010). The role of tyloses in crown hydraulic failure of mature walnut trees afflicted by apoplexy disorder. *Tree Physiology*, 30(6), 761–772. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq026>
- Munib Ur Rehman, Gull, Y., Mir, M. M., Iqbal, U., Angmo, T., Hanief, M., Mahmood, R., Rather, Gh. H., Hassan, G. I., & Banday, S. A. (2023). Plant Water Relations and Irrigation. In M. M. Mir, M. U. Rehman, U. Iqbal, & S. A. Mir (Eds.), *Temperate Nuts* (pp. 187–208). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9497-5_8
- Nael Abu Taha. (2011). Utility and importance of walnut, *Juglans regia* Linn: A review. *African Journal of Microbiology Research*, 5(32). <https://doi.org/10.5897/AJMR11.610>
- Oddou-Muratorio, S., Petit-Cailleux, C., Journé, V., Lingrand, M., Magdalou, J.-A., Hurson, C., Garrigue, J., Davi, H., & Magnanou, E. (2021). Crown defoliation

- decreases reproduction and wood growth in a marginal European beech population. *Annals of Botany*, 128(2), 193–204.
<https://doi.org/10.1093/aob/mcab054>
- Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2012). Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management*, 108, 39–51.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.022>
- Pereira, L. S., Perrier, A., Allen, R. G., & Alves, I. (1999). Evapotranspiration: Concepts and Future Trends. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 125(2), 45–51. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1999\)125:2\(45\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1999)125:2(45))
- Perulli, G. D., Baldi, E., Toselli, M., Gentile, S. L., Solimando, D., Anconelli, S., Perez Pastor, A., Boini, A., Corelli Grappadelli, L., & Manfrini, L. (2025). Optimization of irrigation on walnut through the IRRIFRAME water balance model. *Irrigation Science*. <https://doi.org/10.1007/s00271-025-01006-z>
- Pollegioni, P., Woeste, K., Chiocchini, F., Del Lungo, S., Ciolfi, M., Olimpieri, I., Tortolano, V., Clark, J., Hemery, G. E., Mapelli, S., & Malvolti, M. E. (2017). Rethinking the history of common walnut (*Juglans regia* L.) in Europe: Its origins and human interactions. *PLOS ONE*, 12(3), e0172541.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172541>
- Postel, S. (2000). *Redesigning irrigated agriculture*.
- Ramos, D., Brown, L., Uriu, K., & Marangoni, B. (1978). Water stress affects size and quality of walnuts. *University of California Agriculture and Natural Resources*, 32, 5–8.
- Ramos, D. E. (Ed.). (1998). *Walnut production manual*. University of California, Division of Agriculture and Natural Resources.

- Rosati, A., Metcalf, S., Buchner, R., Fulton, A., & Lampinen, B. (2006). Tree water status and gas exchange in walnut under drought, high temperature and vapour pressure deficit. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 81(3), 415–420. <https://doi.org/10.1080/14620316.2006.11512082>
- Ruiz-Sanchez, M. C., Domingo, R., & Castel, J. R. (2010). Review. Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8, 5–20. <https://doi.org/10.5424/sjar/201008S2-1343>
- Scholander, P. F., Bradstreet, E. D., Hemmingsen, E. A., & Hammel, H. T. (1965). Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science*, 148(3668), 339–346. <https://doi.org/10.1126/science.148.3668.339>
- Sedgley, M., & Griffin, A. R. (1989). *Sexual Reproduction of Tree Crops*. Academic Press. <https://books.google.gr/books?id=-E3gBAAQBAJ>
- Tulecke, W., McGranahan, G., University of California (System). Genetic Resources Conservation Program, & University of California, Davis. D. of A. and N. R. (1994). *The Walnut Germplasm Collection of the University of California, Davis: A Description of the Collection and a History of the Breeding Program of Eugene F. Serr and Harold I. Forde*. Genetic Resources Conservation Program. Division of Agriculture and Natural Resources, University of California. <https://books.google.gr/books?id=5vyP7018dLQC>
- Vahdati, K. (2014). TRADITIONS AND FOLKS FOR WALNUT GROWING AROUND THE SILK ROAD. *Acta Horticulturae*, 1032, 19–24. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1032.1>
- Vahdati, K., Lotfi, N., Kholdebarin, B., Hassani, D., Amiri, R., Mozaffari, M. R., & Leslie, C. (2009). Screening for Drought-tolerant Genotypes of Persian Walnuts

- (*Juglans regia* L.) During Seed Germination. *HortScience*, 44(7), 1815–1819.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.7.1815>
- Wang, R., Tuerxun, N., & Zheng, J. (2024). Improved estimation of SPAD values in walnut leaves by combining spectral, texture, and structural information from UAV-based multispectral image. *Scientia Horticulturae*, 328, 112940.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112940>
- Way, D. A. (2011). Tree phenology responses to warming: Spring forward, fall back? *Tree Physiology*, 31(5), 469–471. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpr044>
- Wilkinson, J. (2005). *Nut Grower's Guide: The Complete Handbook for Producers and Hobbyists*. CSIRO Publishing. <https://books.google.gr/books?id=vS5NR1-v85cC>
- Wu, X., Zhang, Z., Sun, M., An, X., Qi, Y., Zhao, S., Zhang, Z., & Wang, H. (2021). Comparative transcriptome profiling provides insights into endocarp lignification of walnut (*Juglans Regia* L.). *Scientia Horticulturae*, 282, 110030.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110030>
- Μαντάλου, Ν. (1983). *Η Καρυδιά Και Η Συστηματική Καλλιέργεια Της*. Αγροτική Τράπεζα της Ελλάδας.
- Ποντίκης, Α. Κ. (1996). *Ειδική Δενδροκομία (Δεύτερος Τόμος): Ακρόδρυα, Πυρηνόκαρπα, Λοιπά Καρποφόρα*. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ.
- Ρούσκας, Δ. (2013). Ρούσκας, Δ., 2013. *Καρυδιά (Juglans regia L.)*. Εκδόσεις έμβρυο.

6.3 Πηγές Διαδικτύου

- Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ), 2022. www.statistics.gr
- FAOSTAT Database Results. 2022.