

Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας

Εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας

Διπλωματική Εργασία



« Η επίδραση της άρδευσης στην ποιότητα ελαιολάδου με τη χρήση εργαλείων γεωργίας ακριβείας στην ελαιοκαλλιέργεια. »

Κούνας - Μαχαίρας Θεόδωρος

Επιβλέπων καθηγητής: Πατάκας Άγγελος

Πάτρα, Ιούνιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

« Η επίδραση της άρδευσης στην ποιότητα ελαιολάδου με τη χρήση εργαλείων γεωργίας ακριβείας στην ελαιοκαλλιέργεια. »

Κούνας - Μαχαίρας Θεόδωρος

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Άγγελος Πατάκας Καθηγητής του
Τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας
Τροφίμων του Πανεπιστημίου Πατρών και
Δ/ντής του Εργαστηρίου Φυτικής
Παραγωγής

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Βασίλης Τριανταφυλλίδης Επίκουρος
Καθηγητής στο Τμήμα Επιστήμης &
Τεχνολογίας Τροφίμων και είναι μέλος
του Εργαστηρίου PlantLab του
Πανεπιστημίου Πατρών

Πάτρα, Ιούνιος 2026

Περίληψη

Το φαινολικό προφίλ του ελαιολάδου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τόσο τη θρεπτική και αντιοξειδωτική του αξία όσο και την εμπορική του ταυτότητα, ενώ συνδέεται στενά με την υδατική κατάσταση του ελαιόδεντρου κατά την καρποφορία. Η παρούσα διπλωματική εργασία, μέσω συστηματικής ανασκόπησης της διεθνούς βιβλιογραφίας, εξετάζει την επίδραση της άρδευσης στην ποιότητα του ελαιολάδου και αποτιμά τη συμβολή των εργαλείων γεωργίας ακριβείας στη βελτιστοποίηση της σχέσης άρδευσης–ποιότητας. Από την κριτική σύνθεση των δεδομένων προκύπτει ότι η ελεγχόμενη ελλειμματική άρδευση αυξάνει με συνέπεια τη συγκέντρωση των φαινολικών ενώσεων, χωρίς να υποβαθμίζει τις παραμέτρους ποιότητας του εξαιρετικού παρθένου ελαιολάδου, το εύρημα επιβεβαιώνεται διασταυρωτικά σε διαφορετικές ποικιλίες, κλίματα και συστήματα καλλιέργειας και ερμηνεύεται από την επαγωγή βιοσύνθεσης φαινολικών ενώσεων υπό υδατική καταπόνηση. Καθοριστικότερη του μεγέθους του ελλείμματος αναδεικνύεται η χρονική του τοποθέτηση ως προς το φαινολογικό στάδιο, με το διάστημα πριν τη σκλήρυνση του ενδοκαρπίου να θεωρείται βέλτιστο για την ισορροπία ποιότητας και παραγωγής. Η έντονη όμως εξάρτηση των αποτελεσμάτων από ποικιλία, κλίμα και έδαφος αποκλείει την ύπαρξη καθολικού πρωτοκόλλου και επιβάλλει τοπικά προσαρμοσμένες στρατηγικές. Στο πλαίσιο αυτό, η γεωργία ακριβείας λειτουργεί ως ο αναγκαίος συνδετικός κρίκος μεταξύ πειραματικής γνώσης και πρακτικής εφαρμογής: αξιοποιώντας αισθητήρες υδατικού δυναμικού βλαστού, θερμικής τηλεπισκόπησης από μη επανδρωμένα αεροσκάφη και δορυφορικούς δείκτες, επιτρέποντας τη διαχείριση της εγγενούς χωρικής ετερογένειας του ελαιώνα μέσω χωρικά και χρονικά διαφοροποιημένης άρδευσης. Τα οφέλη της προσέγγισης αυτής είναι πολυεπίπεδα, καλύπτοντας την ποιοτική αναβάθμιση, την εξοικονόμηση υδατικών και ενεργειακών πόρων, τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και την οικονομική υπεραξία που απορρέει από το υψηλό φαινολικό περιεχόμενο και την ιχνηλασιμότητα. Συμπερασματικά, η ελλειμματική άρδευση βασισμένη σε αισθητήρες συνιστά ολοκληρωμένη στρατηγική που συνδυάζει ποιότητα, αειφορία και ανθεκτικότητα στην κλιματική αλλαγή.

Λέξεις – Κλειδιά

Ελαιόλαδο, φαινολικές ενώσεις, ποιότητα, ελλειμματική άρδευση, γεωργία ακριβείας, υδατικό στρες.

« The impact of irrigation on olive oil quality through the use of precision agriculture tools in olive cultivation. »

Kounas – Machairas Theodoros

Abstract

The phenolic profile of olive oil largely determines both its nutritional and antioxidant value and its commercial identity, and is closely linked to the water status of the olive tree during fruit development. Through a systematic review of the international literature, this diploma thesis examines the effect of irrigation on olive oil quality and assesses the contribution of precision agriculture tools to optimising the irrigation–quality relationship. The critical synthesis of the evidence shows that controlled deficit irrigation consistently increases the concentration of phenolic compounds without degrading the quality parameters of extra virgin olive oil, this finding is cross-validated across different cultivars, climates and cropping systems and is explained by the stress-induced biosynthesis of phenolics. The timing of the deficit relative to the phenological stage proves more decisive than its magnitude, with the period before pit hardening being critical for the balance between quality and yield. However, the strong dependence of outcomes on cultivar, climate and soil precludes any universal protocol and necessitates locally adapted strategies. In this context, precision agriculture acts as the essential link between experimental knowledge and practical application: using stem water potential sensors, thermal remote sensing from unmanned aerial vehicles and satellite indices, it enables the management of the orchard's inherent spatial heterogeneity through spatially and temporally differentiated irrigation. The benefits of this approach are multilevel, encompassing quality enhancement, conservation of water and energy resources, reduction of the environmental footprint, and the economic added value arising from high phenolic content and traceability. In conclusion, sensor-driven deficit irrigation constitutes an integrated strategy that combines quality, sustainability and resilience to climate change.

Keywords

Olive oil, phenolic compound, quality, deficit irrigation, precision agriculture, water stress

Περιεχόμενα

Περίληψη	iv
Abstract	v
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	x
Κατάλογος Πινάκων	xi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΗΣ ΕΛΙΑΣ	1
1.1 Η σημασία της ελαιοκαλλιέργειας στην Ελλάδα και παγκοσμίως	1
1.2 Οικονομική και διατροφική αξία του ελαιολάδου	2
1.3 Προβλήματα και προκλήσεις στην ελαιοκαλλιέργεια	3
1.4 Η ανάγκη ορθολογικής διαχείρισης του νερού	4
1.5 Η έννοια της γεωργίας ακριβείας	5
1.6 Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής εργασίας	5
1.7 Δομή της διπλωματικής εργασίας	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΕΛΑΙΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΕΛΑΙΟΛΑΔΟ	7
2.1 Βοτανικά χαρακτηριστικά της ελιάς	7
2.2 Κλιματικές και εδαφικές απαιτήσεις της καλλιέργειας	8
2.3 Συστήματα καλλιέργειας ελιάς	8
2.4 Παραγωγή και κατηγορίες ελαιολάδου	9
2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα ελαιολάδου	10
2.5.1 Ποικιλία ελιάς	10
2.5.2 Κλιματικές συνθήκες	10
2.5.3 Συγκομιδή και αποθήκευση	11
2.5.4 Επεξεργασία στον ελαιώνα και στο ελαιοτριβείο	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΡΔΕΥΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΑΙΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	11
3.1 Υδατικές ανάγκες της ελιάς	11
3.2 Μέθοδοι άρδευσης στην ελαιοκαλλιέργεια	13
3.2.1 Στάγδην άρδευση	13
3.2.2 Καταιονισμός	13
3.2.3 Υπόγεια άρδευση	14
3.3 Υδατικό στρες και φυσιολογία της ελιάς	14
3.4 Επίδραση της άρδευσης στην παραγωγικότητα	14
3.5 Επίδραση της άρδευσης στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ελαιολάδου	15
3.5.1 Οξύτητα	15
3.5.2 Φαινολικές ενώσεις	15
3.5.3 Αρωματικά χαρακτηριστικά	16
3.5.4 Οξειδωτική σταθερότητα	17
3.6 Ελλειμματική άρδευση και βιώσιμη διαχείριση νερού	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΑΙΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	18
4.1 Ορισμός και βασικές αρχές της γεωργίας ακριβείας	18
4.2 Τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας	19
4.2.1 Αισθητήρες εδάφους και υγρασίας	19
4.2.2 Συστήματα GPS και GIS	20
4.2.3 Τηλεπισκόπηση και δορυφορικά δεδομένα	21

4.2.5 Internet of Things (IoT) στην αγροτική παραγωγή	23
4.3 Εφαρμογές γεωργίας ακριβείας στην άρδευση	23
4.4 Έξυπνα συστήματα διαχείρισης νερού	24
4.5 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί εφαρμογής	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΛΑΙΟΛΑΔΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ	26
5.1 Συσχέτιση άρδευσης και ποιοτικών χαρακτηριστικών υπό το πρίσμα της γεωργίας ακριβείας	26
5.2 Βελτιστοποίηση άρδευσης μέσω αισθητήρων: μηχανισμοί και αποτελέσματα	27
5.2.1 Αισθητηριοκατευθυνόμενη ελλειμματική άρδευση και φαινολικό προφίλ	27
5.2.2 Βελτιστοποίηση χρονισμού άρδευσης μέσω φαινολογικής παρακολούθησης	28
5.3 Χρήση δορυφορικών δεδομένων και drones για παρακολούθηση καλλιέργειας και ποιοτική διαχείριση	28
5.3.1 Χαρτογράφηση χωρικής μεταβλητότητας υδατικού στρες	28
5.3.2 Δορυφορική τηλεπισκόπηση και διαχρονική παρακολούθηση	29
5.4 Μελέτες περίπτωσης εφαρμογής γεωργίας ακριβείας σε ελαιώνες	30
5.4.1 Μελέτη περίπτωσης I - Ελαιώνας Νότιας Ισπανίας	30
5.4.2 Μελέτη περίπτωσης II - Ελαιώνας Κρήτης	30
5.4.3 Μελέτη περίπτωσης III - Ελαιώνας Χιλής	31
5.5 Σύγκριση παραδοσιακής και ευφυούς άρδευσης (ποσοτική αξιολόγηση)	31
5.6. Περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις	33
5.6.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	33
5.6.2 Οικονομικές επιπτώσεις	35
5.7 Προοπτικές εξέλιξης των τεχνολογιών στην ελαιοκαλλιέργεια	36
5.7.1 Τεχνητή νοημοσύνη Πραγμάτων (AIoT) και Γεωργία 5.0	36
5.7.2 Υπερφασματική απεικόνιση και φορητοί αισθητήρες ποιότητας	36
5.7.3 Ψηφιακοί δίδυμοι ελαιώνα και προβλεπτική μοντελοποίηση	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΖΗΤΗΣΗ	37
6.1 Ανάλυση βιβλιογραφικών δεδομένων: συνέπεια, ετερογένεια και ερμηνευτικά ζητήματα	37
6.1.1 Σημεία σύγκλισης: ο πυρήνας των ευρημάτων	38
6.1.2 Πηγές ετερογένειας : μεταβλητότητα αριθμητικών δεδομένων	38
6.1.3 Ο χρονισμός ως καθοριστικός παράγοντας της σχέσης μεταξύ άρδευσης και ποιότητας	39
6.1.4 Η γεωργία ακριβείας ως γέφυρα μεταξύ πειραματικού και πρακτικού	40
6.2 Αξιολόγηση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας	40
6.3 Πλεονεκτήματα εφαρμογής γεωργίας ακριβείας στην παραγωγή ποιοτικού ελαιολάδου	41
6.4 Περιορισμοί και δυσκολίες εφαρμογής	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	43
7.1 Βασικά συμπεράσματα	43
7.2 Συμβολή της γεωργίας ακριβείας στη βιώσιμη ελαιοκαλλιέργεια	44
7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	45
Βιβλιογραφικές Αναφορές	46

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 : Σύνοψη τάσεων των τριών μελετών περίπτωσης της ενότητας 5.4
.....43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΗΣ ΕΛΙΑΣ

1.1 Η σημασία της ελαιοκαλλιέργειας στην Ελλάδα και παγκοσμίως

Η ελιά (*Olea europaea L.*) συγκαταλέγεται στα αρχαιότερα καλλιεργούμενα είδη της λεκάνης της Μεσογείου και θεωρείται εμβληματικό φυτό για τους πολιτισμούς που αναπτύχθηκαν στην περιοχή (Rugini et al., 2016). Η εξημέρωσή της, τοποθετείται στην Ανατολική Μεσόγειο, με γενετικές και αρχαιολογικές μελέτες να συγκλίνουν στην άποψη ότι οι πρώτες καλλιεργούμενες μορφές προέκυψαν από τον άγριο πρόγονο (oleaster) στην περιοχή του Νότιου Λεβάντε (Langgut et al., 2019; Barazani et al., 2023). Η μακρά αυτή συμπόρευση με τον άνθρωπο έχει καταστήσει το ελαιόδεντρο όχι μόνο γεωργικό πόρο αλλά και στοιχείο πολιτισμικής ταυτότητας της Μεσογείου.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η ελαιοκαλλιέργεια παραμένει γεωγραφικά συγκεντρωμένη: εκτιμάται ότι καλλιεργούνται περισσότερα από 10 εκατομμύρια εκτάρια διεθνώς, εκ των οποίων περίπου το 95% εντοπίζεται στη μεσογειακή λεκάνη (Fraga et al., 2020). Η κυριαρχία της Μεσογείου στην παγκόσμια παραγωγή ελαιολάδου αποδίδεται τόσο στις ευνοϊκές κλιματικές συνθήκες όσο και στη μακρά παράδοση της καλλιέργειας, αν και τις τελευταίες δεκαετίες η καλλιέργεια επεκτείνεται σταδιακά σε νέες περιοχές με ανάλογες αγροκλιματικές συνθήκες, όπως η Νότια Αμερική και η Αυστραλία (Torres et al., 2017).

Η παραγωγή ελαιολάδου παρουσιάζει διαχρονικά ανοδική τάση, έχοντας ουσιαστικά τριπλασιαστεί κατά τις τελευταίες δεκαετίες, αλλά χαρακτηρίζεται από έντονη διετική παραλλακτικότητα λόγω του φαινομένου της παρενιαντοφορίας και από υψηλή ευαισθησία στις κλιματικές διακυμάνσεις (International Olive Council, 2025). Η συγκέντρωση αυτή καθιστά τη διαθεσιμότητα και την τιμή του προϊόντος ιδιαίτερα ευάλωτες σε τοπικές κλιματικές κρίσεις.

Η Ελλάδα κατέχει σημαντική θέση στον παγκόσμιο χάρτη της ελαιοκομίας, με την ελαιοκαλλιέργεια να αποτελεί έναν από τους βασικούς πυλώνες του πρωτογενούς τομέα και να συνδέεται στενά με την αγροτική οικονομία και την πολιτισμική κληρονομιά της χώρας. Η χώρα παράγει μεγάλο ποσοστό εξαιρετικού παρθένου ελαιολάδου, γεγονός που της προσδίδει συγκριτικό ποιοτικό πλεονέκτημα. Επιπλέον, η καλλιέργεια διατηρεί έντονο κοινωνικό και οικονομικό χαρακτήρα, καθώς στηρίζει ένα ευρύ δίκτυο μικρών οικογενειακών εκμεταλλεύσεων σε αγροτικές και ημιορεινές περιοχές. Ωστόσο, ο πολυτεμαχισμός του κλήρου και η διάθεση μέρους της παραγωγής σε χύμα μορφή αποτελούν προκλήσεις που περιορίζουν την προστιθέμενη αξία για τους Έλληνες παραγωγούς.

Παρά τη βαρύνουσα σημασία της, η ελαιοκαλλιέργεια αντιμετωπίζει αυξανόμενες πιέσεις, κυρίως από την κλιματική αλλαγή, η οποία εντείνει τα φαινόμενα ξηρασίας και θερμικού στρες και απειλεί τόσο την ποσότητα όσο και την ποιότητα της παραγωγής. Η ανάγκη για ορθολογική διαχείριση των φυσικών πόρων, με έμφαση στο νερό άρδευσης, καθιστά τη γεωργία ακριβείας ένα ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο. Η εφαρμογή της συμβάλλει τόσο στη βιωσιμότητα της καλλιέργειας όσο και στη διατήρηση της ποιότητας του ελαιολάδου, ζητήματα που εξετάζονται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.

1.2 Οικονομική και διατροφική αξία του ελαιολάδου

Το ελαιόλαδο αποτελεί εμπορεύσιμο αγαθό με εξαιρετικά υψηλή οικονομική αξία στην παγκόσμια αγορά τροφίμων. Η αξία της παγκόσμιας αγοράς ελαιολάδου εκτιμάται σε αρκετά δισεκατομμύρια δολάρια ετησίως, με ανοδική τάση λόγω της αυξανόμενης ζήτησης τόσο στις παραδοσιακά καταναλωτικές μεσογειακές χώρες όσο και σε νέες αγορές της Βόρειας Αμερικής, της Κεντρικής Ευρώπης, της Ασίας και της Αυστραλίας (IOC, 2023). Για την Ελλάδα ειδικά, το ελαιόλαδο αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους αγροτικούς εξαγωγικούς κλάδους, με ετήσια αξία εξαγωγών που κυμαίνεται μεταξύ 350 και 500 εκατομμυρίων ευρώ, αν και σημαντικό τμήμα εξάγεται χύμα σε ιταλικές ή ισπανικές εταιρίες για τυποποίηση και εμπορεύεται ως ξένο, γεγονός που μειώνει τη συνολική προστιθέμενη αξία για τον Έλληνα παραγωγό (Olive Oil Times, 2023).

Από διατροφικής και βιοχημικής άποψης, το ελαιόλαδο - και ιδιαίτερα το εξαιρετικό παρθένο (EVOO) - αποτελεί ένα από τα πιο μελετημένα και τεκμηριωμένα λειτουργικά τρόφιμα. Η εξαιρετικά πλούσια σύστασή του περιλαμβάνει:

- A. **Μονοακόρεστα λιπαρά οξέα (MUFA):** Το ελαϊκό οξύ (C18:1, ω-9) αποτελεί κατά μέσον όρο το 55-83% της συνολικής σύστασης λιπαρών οξέων, ανάλογα με την ποικιλία και τις συνθήκες καλλιέργειας. Το ελαϊκό οξύ έχει τεκμηριωθεί ότι συμβάλλει στη μείωση της LDL χοληστερόλης, στην διατήρηση των επιπέδων της HDL χοληστερόλης και στη μείωση φλεγμονωδών δεικτών (Covas, 2008).
- B. **Φαινολικές ενώσεις:** Αποτελούν την πιο βιολογικά δραστική κατηγορία βιοδραστικών ενώσεων του EVOO. Περιλαμβάνουν σεκοϊρεδοειδή (ελευρωπαΐνη, λιγκστροσίδη και τα αγλυκόνια τους), φαινυλαιθανόλες (υδροξυτυροσόλη, τυροσόλη), λιγνάνες, φλαβονοειδή και φαινολικά οξέα. Ιδιαίτερη διατροφική σημασία έχει η ολεοκανθάλη, ένα σεκοϊρεδοειδές αγλυκόνιο που παρουσιάζει αντιφλεγμονώδη δράση συγκρίσιμη με την ιβουπροφαίνη, καθώς και η ολεακίνη, με αντιυπερτασική και αντιοξειδωτική δράση (Beauchamp et al. 2005, Czerwińska et al. 2012).
- C. **Τοκοφερόλες:** Κυρίως α-τοκοφερόλη (βιταμίνη E), η οποία συμβάλλει τόσο στη διατροφική αξία όσο και στην οξειδωτική σταθερότητα του λαδιού.
- D. **Σκουαλένιο:** Τριτερπένιο που απαντά σε συγκεντρώσεις 0,3-0,7% και έχει συνδεθεί με χημειοπροστατευτικές ιδιότητες.

Ε. **Στερόλες:** Κυρίως β-σιτοστερόλη, που αποτελεί δείκτη αυθεντικότητας και γνησιότητας ελαιολάδου.

Η Ευρωπαϊκή Αρχή Ασφάλειας Τροφίμων (EFSA) έχει εγκρίνει ισχυρισμό υγείας για τις πολυφαινόλες του ελαιολάδου, αναγνωρίζοντας επίσημα την προστατευτική τους δράση έναντι της οξείδωσης των λιπιδίων (Κανονισμός ΕΕ 432/2012). Σύμφωνα με τον κανονισμό, ο ισχυρισμός επιτρέπεται μόνο για ελαιόλαδο που περιέχει τουλάχιστον 5 mg υδροξυτυροσόλης και των παραγώγων της ανά 20 g ελαιολάδου. Η αναγνώριση αυτή έχει αναβαθμίσει σημαντικά την εμπορική αξία των ΕVOO με υψηλό φαινολικό περιεχόμενο, τα οποία διατίθενται πλέον σε premium τιμές στις διεθνείς αγορές.

1.3 Προβλήματα και προκλήσεις στην ελαιοκαλλιέργεια

Παρά την κεντρική της θέση στη μεσογειακή γεωργία, η ελαιοκαλλιέργεια αντιμετωπίζει σήμερα ένα σύνολο πολύπλοκων και αλληλεξαρτωμένων προκλήσεων που θέτουν σε αμφισβήτηση τη μακροχρόνια βιωσιμότητα της υπό τις παρούσες συνθήκες.

Κλιματική αλλαγή: Η κλιματική αλλαγή αποτελεί την πλέον ευρεία και σύνθετη πρόκληση. Τα κλιματολογικά μοντέλα προβλέπουν για τη Μεσόγειο αύξηση της μέσης θερμοκρασίας κατά 1,5-4°C έως το 2100, μείωση των ετήσιων βροχοπτώσεων κατά 10-30%, αύξηση της συχνότητας και έντασης ακραίων καιρικών φαινομένων (καύσωνες, ξηρασία, έντονες βροχοπτώσεις) και εντατικοποίηση της εξατμισοδιαπνοής (IPCC, 2022; Cramer et al., 2018). Για την ελαιοκαλλιέργεια, αυτό μεταφράζεται σε αύξηση του υδατικού ελλείμματος, εντατικοποίηση της ανάγκης άρδευσης, ενδεχόμενη διαταραχή της ανθοφορίας λόγω ανεπαρκούς χειμερινής ψύξης και αλλαγές στη φαινολογία των καλλιεργειών.

Υδατική πίεση: Σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή, η αυξανόμενη ανταγωνιστική πίεση για πρόσβαση σε υδατικούς πόρους - μεταξύ γεωργίας, βιομηχανίας και αστικής χρήσης - εντείνεται συνεχώς. Στις ξηρές και ημίξηρες περιοχές της Μεσογείου, η γεωργία καταναλώνει ήδη το 70-80% των διαθέσιμων υδατικών πόρων, αφήνοντας ελάχιστα περιθώρια αύξησης χωρίς ριζική βελτίωση της αποδοτικότητας χρήσης νερού. (FAO, 2023).

Φυτοπαθολογικές απειλές: Η εμφάνιση και εξάπλωση του βακτηρίου *Xylella fastidiosa* subsp. *Pauca* σε ελαιώνες της Νότιας Ιταλίας (Apulia) - που έχει προκαλέσει την

καταστροφή εκατομμυρίων ελαιόδεντρων - αποτελεί μείζονα βιολογική απειλή για ολόκληρη τη λεκάνη της Μεσογείου (Zarco-Tejada et al., 2018). Παράλληλα, ο δάκος της ελιάς (*Bactrocera oleae*) παραμένει η σοβαρότερη εντομολογική απειλή, επηρεάζοντας σημαντικά την οξύτητα και την ποιότητα του ελαιολάδου όταν δεν αντιμετωπίζεται έγκαιρα.

Δομικά προβλήματα της ελληνικής ελαιοκαλλιέργειας: Ειδικά στην Ελλάδα, η εξαιρετικά κατακερματισμένη αγροτική ιδιοκτησία (μέσο μέγεθος εκμετάλλευσης <5 ha), η γήρανση του αγροτικού πληθυσμού, η ανεπαρκής οργάνωση σε συνεταιρισμούς, το χαμηλό επίπεδο τυποποίησης και εμπορίας με ελληνικές μάρκες, καθώς και η υστέρηση στην υιοθέτηση νέων τεχνολογιών, αποτελούν δομικά εμπόδια για την ανταγωνιστικότητα του τομέα (Colombo & Perujo-Villanueva, 2017).

1.4 Η ανάγκη ορθολογικής διαχείρισης του νερού

Η διαχείριση του αρδευτικού νερού βρίσκεται στο επίκεντρο της σύγχρονης ελαιοκαλλιέργειας, καθώς αποτελεί ταυτόχρονα παράγοντα παραγωγικότητας, ποιότητας, περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και οικονομικής αποδοτικότητας. Η κατανόηση της υδατικής οικονομίας της ελιάς - των αναγκών, της εξατμισοδιαπνοής, των κρίσιμων φαινολογικών σταδίων και των μηχανισμών ανθεκτικότητας - αποτελεί προαπαιτούμενο για οποιαδήποτε αποτελεσματική στρατηγική άρδευσης.

Η ελιά χαρακτηρίζεται ιστορικά ως ξηρανθεκτικό δέντρο, ικανό να επιβιώνει και να παράγει σε συνθήκες σημαντικής έλλειψης νερού. Ωστόσο, σύγχρονες έρευνες καταδεικνύουν σαφώς ότι η άρδευση - ακόμα και σε επίπεδα κατώτερα από τις πλήρεις υδατικές ανάγκες - αυξάνει σημαντικά τόσο την παραγωγικότητα όσο και, υπό τις κατάλληλες συνθήκες, την ποιότητα (Connor & Fereres, 2005). Η σχέση αυτή ωστόσο δεν είναι γραμμική: η υπεράρδευση μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του ελαιοπεριεχομένου, υποβάθμιση της ποιότητας και περιβαλλοντικές επιπτώσεις (βαθιά διήθηση, ξέπλυμα θρεπτικών, αλατότητα εδαφών).

Σε αυτό το πλαίσιο, η ορθολογική διαχείριση νερού δεν σημαίνει απλώς μείωση κατανάλωσης, αλλά βέλτιστη κατανομή του διαθέσιμου νερού στο χώρο (ανά ζώνη ελαιώνα) και στο χρόνο (ανά φαινολογικό στάδιο), με βάση μετρήσιμα κριτήρια και επιστημονικά τεκμηριωμένους αλγορίθμους. Η επίτευξη αυτού του στόχου απαιτεί την αξιοποίηση εργαλείων και τεχνολογιών που επιτρέπουν την παρακολούθηση, ανάλυση και

ανταπόκριση στη μεταβλητότητα εντός του ελαιώνα σε χρονική κλίμακα ωρών ή ημερών - δηλαδή, εργαλείων γεωργίας ακριβείας (Fernández et al., 2013).

1.5 Η έννοια της γεωργίας ακριβείας

Η γεωργία ακριβείας (Precision Agriculture – PA) αποτελεί ένα ολιστικό σύστημα διαχείρισης αγροτικής παραγωγής που στηρίζεται στη φιλοσοφία “σωστή εισροή, σωστή ποσότητα, σωστή θέση, σωστή χρονική στιγμή”. Η ISPA ορίζει τη γεωργία ακριβείας ως στρατηγική διαχείρισης που συλλέγει, επεξεργάζεται και αναλύει χρονικά, χωρικά και ατομικά δεδομένα φυτών και τα συνδυάζει με άλλες πληροφορίες για τη στήριξη αποφάσεων διαχείρισης, με στόχο τη βελτιωμένη αποδοτικότητα χρήσης πόρων, παραγωγικότητας, ποιότητας, κερδοφορίας και βιωσιμότητας (ISPA, 2019). Η γεωργία ακριβείας αναπτύχθηκε κατά κύριο λόγο για ετήσιες καλλιέργειες (σιτηρά, καλαμπόκι, βαμβάκι) κατά τη δεκαετία του 1990, αξιοποιώντας αρχικά τεχνολογίες GPS και χαρτογράφησης αποδόσεων. Η επέκτασή της σε δενδρώδεις καλλιέργειες και στην ελαιοκαλλιέργεια ειδικά αποτελεί μια σχετικά πρόσφατη εξέλιξη, η οποία επιταχύνθηκε σημαντικά από την τεχνολογική πρόοδο στα drones, στους μικροαισθητήρες IoT, τη δορυφορική τηλεπισκόπηση υψηλής ανάλυσης και τους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης (Mansoor et al., 2025).

Στο πλαίσιο της ελαιοκαλλιέργειας, η γεωργία ακριβείας εφαρμόζεται σε πέντε βασικά επίπεδα: (α) χαρτογράφηση χωρικής μεταβλητότητας εδάφους και καλλιέργειας, (β) παρακολούθηση υδατικής κατάστασης φυτών σε πραγματικό χρόνο, (γ) βελτιστοποίηση αρδευτικών αποφάσεων, (δ) μεταβλητή εφαρμογή λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών, και (ε) έγκαιρη ανίχνευση ασθενειών και αβιοτικών καταπονήσεων. Κάθε ένα από αυτά τα επίπεδα συμβάλλει - άμεσα ή έμμεσα - στη βελτιστοποίηση της ποιότητας του παραγόμενου ελαιολάδου.

1.6 Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της άρδευσης στην ποιότητα του ελαιολάδου, με έμφαση στον ρόλο που μπορούν να διαδραματίσουν τα εργαλεία της γεωργίας ακριβείας. Η εργασία επιχειρεί να συνδέσει δύο πεδία που συχνά εξετάζονται χωριστά: αφενός τη σχέση μεταξύ της διαχείρισης του νερού και των ποιοτικών χαρακτηριστικών του ελαιολάδου, και αφετέρου τις σύγχρονες τεχνολογίες που επιτρέπουν την ακριβέστερη διαχείριση της άρδευσης. Η εργασία είναι βιβλιογραφική και βασίζεται στη συστηματική ανασκόπηση της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας. Μέσα από αυτήν, επιδιώκεται να αποτυπωθεί η υπάρχουσα γνώση, να εντοπιστούν τα σημεία σύγκλισης και απόκλισης των ερευνητικών αποτελεσμάτων και να αναδειχθούν οι προοπτικές για τη βιώσιμη παραγωγή ποιοτικού ελαιολάδου. Για την επίτευξη του παραπάνω σκοπού, τίθενται οι ακόλουθοι επιμέρους στόχοι:

- Στόχος 1: Η ανάλυση της σχέσης μεταξύ διαφορετικών στρατηγικών άρδευσης (πλήρης, ελλειμματική, ρυθμιζόμενη ελλειμματική) και των βασικών ποιοτικών χαρακτηριστικών του ελαιολάδου (οξύτητα, φαινολικές ενώσεις, οξειδωτική σταθερότητα, αρωματικό προφίλ).

- Στόχος 2: Η παρουσίαση και κριτική αξιολόγηση των κυριότερων τεχνολογικών εργαλείων γεωργίας ακριβείας που εφαρμόζονται ή έχουν δυνητική εφαρμογή στη διαχείριση άρδευσης ελαιώνων.
- Στόχος 3: Η ανασκόπηση μελετών περίπτωσης και ερευνητικών δεδομένων από εφαρμογές γεωργίας ακριβείας σε ελαιώνες, τόσο σε μεσογειακό επίπεδο όσο και ειδικά σε ελληνικές συνθήκες.
- Στόχος 4: Η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων της υιοθέτησης ευφών συστημάτων διαχείρισης νερού στην ελαιοκαλλιέργεια.
- Στόχος 5: Η διατύπωση τεκμηριωμένων προτάσεων για μελλοντική έρευνα και για πρακτική εφαρμογή στο ελληνικό ελαιοκαλλιεργητικό πλαίσιο.

Με βάση τους στόχους αυτούς, η εργασία επιχειρεί να απαντήσει στα ακόλουθα βασικά ερευνητικά ερωτήματα:

1. Πώς επηρεάζουν οι διαφορετικές στρατηγικές άρδευσης τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ελαιολάδου;
2. Ποια εργαλεία γεωργίας ακριβείας μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη διαχείριση της άρδευσης στους ελαιώνες και με ποιον τρόπο;
3. Ποιες είναι οι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις της υιοθέτησης ευφών συστημάτων διαχείρισης νερού, ιδίως στο ελληνικό ελαιοκαλλιεργητικό πλαίσιο;

1.7 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε επτά κεφάλαια, τα οποία ακολουθούν μια λογική πορεία από το γενικό προς το ειδικό, ξεκινώντας από το θεωρητικό υπόβαθρο και καταλήγοντας στη σύνθεση των ευρημάτων και στα συμπεράσματα.

Το **πρώτο κεφάλαιο** αποτελεί την εισαγωγή, παρουσιάζοντας τη σημασία της ελαιοκαλλιέργειας, την αξία του ελαιολάδου και τις σύγχρονες προκλήσεις του κλάδου, ενώ ορίζει τον σκοπό, τους στόχους και τη μεθοδολογία της εργασίας. Το **δεύτερο κεφάλαιο** εστιάζει στην ελαιοκαλλιέργεια και το ελαιολάδο. Περιγράφει τα βοτανικά χαρακτηριστικά της ελιάς, τις απαιτήσεις της καλλιέργειας, τα συστήματα παραγωγής και τους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του ελαιολάδου. Το **τρίτο κεφάλαιο** πραγματεύεται την άρδευση στην ελαιοκαλλιέργεια. Αναλύει τις υδατικές ανάγκες της ελιάς, τις μεθόδους άρδευσης, το υδατικό στρες και, κυρίως, την επίδραση της άρδευσης στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ελαιολάδου. Το **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζει τη γεωργία ακριβείας, αναλύοντας τις βασικές αρχές και τις τεχνολογίες της, όπως οι αισθητήρες, τα συστήματα GPS, η τηλεπισκόπηση και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, με έμφαση στην εφαρμογή τους στη διαχείριση της άρδευσης. Το **πέμπτο κεφάλαιο** αποτελεί τον πυρήνα της εργασίας. Συνδυάζει τα προηγούμενα, εξετάζοντας πώς η γεωργία ακριβείας επηρεάζει την ποιότητα του ελαιολάδου μέσω της βελτιστοποίησης της άρδευσης και παρουσιάζει μελέτες περίπτωσης από τη Μεσόγειο και την Ελλάδα. Το **έκτο κεφάλαιο** περιλαμβάνει τη συζήτηση. Αναλύει κριτικά τα βιβλιογραφικά δεδομένα, αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της εφαρμογής και επισημαίνει τις μελλοντικές ερευνητικές προοπτικές. Το **έβδομο κεφάλαιο**, τέλος, παρουσιάζει τα βασικά

συμπεράσματα της εργασίας, τη συμβολή της γεωργίας ακριβείας στη βιώσιμη
ελαιοκαλλιέργεια και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και πρακτική εφαρμογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΕΛΑΙΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΕΛΑΙΟΛΑΔΟ

2.1 Βοτανικά χαρακτηριστικά της ελιάς

Η ελιά (*Olea europaea* L.) ανήκει στην οικογένεια *Oleaceae*, στο γένος *Olea*, το οποίο περιλαμβάνει περισσότερα από 30 είδη κατανεμημένα στις τροπικές και υποτροπικές ζώνες της Αφρικής, της Ασίας και της Μεσογείου. Η καλλιεργούμενη ελιά (*O. europaea* subsp. *europaea* var. *sativa*) διαφοροποιείται από την αγριελιά (*O. europaea* subsp. *europaea* var. *sylvestris*) τόσο μορφολογικά όσο και στο μέγεθος καρπού και ελαιοπεριεκτικότητας, αποτελώντας αποτέλεσμα μακραίωνης ανθρώπινης επιλογής και εξημέρωσης (Díez et al., 2015).

Μορφολογικά, η ελιά είναι αειθαλές δέντρο με πολύπλοκη διακλάδωση και εξαιρετική μακροβιότητα - δείγματα ηλικίας άνω των 2.000 ετών είναι γνωστά στη Μεσόγειο, ενώ ορισμένα πιστοποιημένα δέντρα στην Κρήτη και τη Σαρδηνία εκτιμώνται σε 3.000-4.000 χρόνια. Το ύψος του δέντρου σε φυσικές συνθήκες μπορεί να φτάσει τα 15 μέτρα, αν και στα σύγχρονα εντατικά συστήματα καλλιέργειας ελέγχεται με κλάδεμα στα 3-5 μέτρα για να διευκολύνεται η μηχανική συγκομιδή (Gucci & Cantini, 2000).

Το **ριζικό σύστημα** της ελιάς είναι εκτεταμένο και πολυσχιδές, με κύρια ανάπτυξη στα ανώτερα εδαφικά στρώματα (0-60 cm), παρόλο που κατακόρυφες ρίζες μπορεί να φτάσουν σε βάθος έως 6 μέτρα. Αυτή η χωρική κατανομή του ριζικού συστήματος έχει άμεσες συνέπειες για τη στρατηγική τοποθέτησης σταλακτηφόρων σωληνών και αισθητήρων εδαφικής υγρασίας, καθώς η πλειονότητα της ενεργού απορρόφησης νερού και θρεπτικών συμβαίνει στα πρώτα 0-40 cm εδαφικού προφίλ (Connor & Fereres, 2005). Τα **φύλλα** είναι λογχοειδή, δερματώδη, με μήκος 4-8 cm, χαρακτηριστικό γκριζοπράσινο χρώμα στην άνω επιφάνεια και ασημί-λευκό στην κάτω, λόγω της πυκνής επικάλυψης από τριχίδια (τρίχωμα). Αυτό το μορφολογικό χαρακτηριστικό αποτελεί προσαρμογή στην ξηρασία, καθώς αντανάκλα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, μειώνοντας τη θερμοκρασία φύλλου και κατ' επέκταση την εξατμισοδιαπνοή. Τα φύλλα της ελιάς διαρκούν 2-3 χρόνια προτού αντικατασταθούν, συμβάλλοντας στην έντονη εποχιακή χλωροφυλλική σταθερότητα.

Η **ανθοφορία** εμφανίζεται από τον Απρίλιο έως τον Ιούνιο (ανάλογα με την ποικιλία και το κλίμα), με μικρά λευκά ή κρεμ άνθη που φέρουν ταξιανθίες τύπου βότρυς στις μασχάλες των φύλλων των κλάδων του προηγούμενου έτους. Κάθε ταξιανθία φέρει 10-40 άνθη, από τα οποία μόνο το 1-5% τελικά καρποδένει. Η γονιμοποίηση γίνεται κυρίως με ανεμογονιμοποίηση, αν και ορισμένες ποικιλίες είναι αυτογόνιμες. Η θερμοκρασία κατά την άνθηση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα: θερμοκρασίες $> 35^{\circ}\text{C}$ ή $< 10^{\circ}\text{C}$ κατά την περίοδο γονιμοποίησης μπορεί να μειώσουν δραστικά την καρπόδεση (Lavee, 1996).

Η **ανάπτυξη του καρπού** διέρχεται από τρία διακριτά φαινολογικά στάδια, καθένα από τα οποία παρουσιάζει διαφορετική ευαισθησία στο υδατικό στρες και διαφορετικές βιοχημικές διεργασίες: (α) Στάδιο I - ταχεία κυτταρική διαίρεση (Ιούνιος): αύξηση μεγέθους του περικαρπίου, σχηματισμός σπέρματος, (β) Στάδιο II - σκλήρυνση πυρήνα και συσσώρευση ελαίου (Ιούλιος - Αύγουστος): αυτό είναι το κρίσιμότερο στάδιο για τη βιοσύνθεση τριακυλογλυκερολών και φαινολικών ενώσεων, και (γ) Στάδιο III - ωρίμανση (Σεπτέμβριος - Νοέμβριος): αλλαγή χρώματος, μαλάκωμα σάρκας, μεταβολές φαινολικού προφίλ (Lavee, 1996).

2.2 Κλιματικές και εδαφικές απαιτήσεις της καλλιέργειας

Η ελιά ευδοκιμεί σε τυπικό μεσογειακό κλίμα, χαρακτηριζόμενο από θερμά, ξηρά καλοκαίρια και ήπιους, βροχερούς χειμώνες. Η θερμοκρασιακή προσαρμοστικότητα της είναι αξιοσημείωτη: αντέχει θερμοκρασίες έως 40-45°C το καλοκαίρι (με κατάλληλη υδατική κατάσταση) και παγετούς από -7 έως -10°C για βραχύ χρονικό διάστημα, αν και τα νεαρά δέντρα είναι πολύ πιο ευαίσθητα (Barranco et al., 2017).

Απαίτηση σε χειμερινή ψύξη: η ελιά απαιτεί ικανό αριθμό “ωρών ψύξης” - θερμοκρασίες 7-12°C για 800-1200 ώρες ανάλογα με την ποικιλία - για την κανονική επαγωγή ανθοφορίας. Η κλιματική αλλαγή, με τις αυξανόμενες χειμερινές θερμοκρασίες, απειλεί αυτή την αναγκαία διεργασία σε ορισμένες περιοχές, ιδίως στις θερμότερες νότιες περιοχές της Μεσογείου (Ramos et al., 2018).

Ο ετήσιος κύκλος βροχοπτώσεων επηρεάζει άμεσα την ανάγκη άρδευσης. Η ελιά μπορεί να παράγει αποδεκτές αποδόσεις με ετήσια βροχόπτωση > 250 mm, αν και η βέλτιστη παραγωγή απαιτεί περίπου 600-800 mm ισομερώς κατανεμημένα. Στις περισσότερες ελληνικές ελαιοκαλλιεργητικές περιοχές, η βροχόπτωση κατά τους θερινούς μήνες (Ιούνιος - Αύγουστος) είναι ελάχιστη (<50 mm), δημιουργώντας ένα σαφές εποχιακό υδατικό έλλειμμα που καθιστά την άρδευση απαραίτητη για τη διατήρηση της παραγωγικότητας και ποιότητας (Orgaz et al., 2006).

Εδαφολογικά, η ελιά παρουσιάζει ευρεία προσαρμοστικότητα προτιμά εδάφη ελαφρά έως μέσης μηχανικής σύστασης (αμμοαργιλοπηλώδη ή αμμοπηλώδη), με καλή στράγγιση. Αντέχει σε αμμώδη, λεπτά και γενικά “φτωχά” εδάφη, αλλά δεν ανέχεται συνθήκες υδατοκατάκλυσης για περισσότερο από 48-72 ώρες, λόγω ευαισθησίας στις ανοξικές ριζοσφαιρικές συνθήκες. Το βέλτιστο εδαφικό pH κυμαίνεται μεταξύ 5,5 και 8,0. Η ανεκτικότητα της στην αλατότητα είναι μέτρια - όριο ECe περίπου 4-6 dS/m - γεγονός καθοριστικής σημασίας σε αρδευόμενους ελαιώνες που χρησιμοποιούν νερό χαμηλής ποιότητας (Gucci & Cantini, 2000).

2.3 Συστήματα καλλιέργειας ελιάς

Η ελαιοκαλλιέργεια παρουσιάζει τεράστια ποικιλομορφία σε ό,τι αφορά τα συστήματα καλλιέργειας, αντικατοπτρίζοντας την ιστορική, οικονομική και τεχνολογική εξέλιξη του τομέα.

Παραδοσιακοί ελαιώνες : (αποστάσεις > 10 m x 10 m, 50-100 δέντρα/ha): Κυριαρχούν ακόμη στην ελληνική ελαιοκαλλιέργεια, ιδιαίτερα σε παραδοσιακές περιοχές όπως η Μεσσηνία, η Κρήτη και η Λέσβος. Χαρακτηρίζονται από ελάχιστες εισροές, χαμηλή παραγωγικότητα ανά εκτάριο αλλά συχνά υψηλή ποιότητα λαδιού, μεγάλη βιοποικιλότητα εντός του ελαιώνα και σχετικά χαμηλές αρδευτικές ανάγκες (Solomou & Sfougaris, 2021).

Εντατικοί ελαιώνες : (αποστάσεις 5-8 m x 5-8 m, 150-400 δέντρα/ha): Αναπτύχθηκαν κυρίως κατά τις δεκαετίες 1980-2000 στην Ισπανία, Ιταλία και Ελλάδα. Επιτρέπουν υψηλότερες αποδόσεις ανά μονάδα επιφάνειας, μεγαλύτερη μηχανοποίηση και καλύτερη διαχείριση, αλλά απαιτούν αρδευτική υποδομή και συστηματική λίπανση (Barranco et al., 2017).

Υπερεντατικά συστήματα - Hedgerow (αποστάσεις 1,5-3,5 m x 4-6 m, 800-2.500 δέντρα/ha): Αναπτύχθηκαν αρχικά στην Ισπανία με ποικιλίες όπως Arbequina, Arbosana και Koroneiki. Επιτρέπουν πλήρη μηχανοποίηση της συγκομιδής με μηχανήματα τύπου “straddle harvester”, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλές αποδόσεις ανά εκτάριο από πολύ πρώιμη ηλικία (2-4 ετών). Ωστόσο, απαιτούν πολύ υψηλό κεφάλαιο εγκατάστασης (15.000-20.000 € / ha), εντατική άρδευση και ειδικευμένη διαχείριση, ενώ η μακροχρόνια ποιότητα σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα παραμένει αντικείμενο έρευνας (Connor et al., 2014).

Κάθε σύστημα παρουσιάζει δυνατότητες και απαιτήσεις για εφαρμογή γεωργίας ακριβείας: τα εντατικά και υπερεντατικά συστήματα είναι πολύ πιο συμβατά με αισθητήρες, αυτοματισμούς και drones, ενώ τα παραδοσιακά συστήματα που κυριαρχούν στην Ελλάδα, παρουσιάζουν μεγαλύτερες δυσκολίες οικονομικής δικαιολόγησης επένδυσης σε τεχνολογία ακριβείας.

2.4 Παραγωγή και κατηγορίες ελαιολάδου

Η παραγωγή ελαιολάδου ξεκινά με τη συγκομιδή του ελαιόκαρπου και ολοκληρώνεται με τις διεργασίες έκθλιψης στο ελαιοτριβείο. Η ποιότητα του τελικού προϊόντος καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από αποφάσεις που λαμβάνονται καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της αλυσίδας.

Η **κατηγοριοποίηση** του ελαιολάδου ορίζεται από τον Κανονισμό (ΕΟΚ) 2568/1991 και τις τροποποιήσεις του, καθώς και από τα πρότυπα του Διεθνούς Συμβουλίου Ελαιολάδου (ΔΣΕ/IOC). Οι κύριες κατηγορίες είναι:

- **Εξαιρετικό παρθένο ελαιόλαδο (EVOO):** Ελεύθερη οξύτητα <0,8% (σε ελαϊκό οξύ), αριθμός υπεροξειδίων <20 meq O₂/kg, δείκτες υπεριώδους εντός ορίων ($K_{232} < 2,5$, $K_{270} < 0,22$), άριστα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά (μηδενικά ελαττώματα, θετικοί χαρακτήρες φρουτώδους, πίκρας, πικάντικου). Αποτελεί το υψηλότερης αξίας προϊόν και η Ελλάδα παράγει το 70-80% της παραγωγής της σε αυτή την κατηγορία (Hellenic Republic, Ministry of Foreign Affairs, n.d.).
- **Παρθένο ελαιόλαδο:** Ελεύθερη οξύτητα <2,0%, μικρά ελαττώματα στα οργανοληπτικά, υπόλοιπες παράμετροι εντός ορίων.

- **Λαμπάντε:** Ελεύθερη οξύτητα $> 2,0\%$, δεν επιτρέπεται για άμεση κατανάλωση, απαιτεί εξευγενισμό.
- **Εξευγενισμένο ελαιόλαδο:** Παράγεται από λαμπάντε με φυσικοχημικές διεργασίες (εξουδετέρωση, αποχρωματισμός, αποσμητισμός). Παρουσιάζει χαμηλότερη διατροφική αξία, καθώς απομακρύνονται σημαντικά οι φαινολικές ενώσεις.
- **Κοινό ελαιόλαδο:** Μείγμα εξευγενισμένου με παρθένο, οξύτητα $<1,0\%$

2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα ελαιολάδου

Η ποιότητα του ελαιολάδου είναι αποτέλεσμα πολύπλοκης αλληλεπίδρασης γενετικών, περιβαλλοντικών, καλλιεργητικών και τεχνολογικών παραγόντων. Η κατανόηση αυτής της πολυπαραγοντικής επίδρασης είναι απαραίτητη για τη σχεδίαση στρατηγικών που στοχεύουν στη βελτίωση ποιότητας μέσω στοχευμένης διαχείρισης άρδευσης.

2.5.1 Ποικιλία ελιάς

Η γενετική σύσταση της ποικιλίας αποτελεί τον θεμελιώδη παράγοντα που καθορίζει την ελαιοπεριεκτικότητα, τη σύσταση λιπαρών οξέων, το φαινολικό προφίλ και το αρωματικό προφίλ του ελαιολάδου.

Ελληνικές ποικιλίες παρουσιάζουν σημαντική διαφοροποίηση:

Η **Κορωνέικη** (*Olea europaea* cv. Koroneiki) - η πλέον καλλιεργούμενη ελληνική ποικιλία, καλύπτοντας $> 50\%$ της ελληνικής ελαιοκαλλιέργειας - παράγει ελαιόλαδο εξαιρετικά υψηλής ποιότητας, με υψηλό φαινολικό περιεχόμενο (400-900 mg/kg σε ολικά φαινολικά), έντονα χαρακτηριστικά πίκρας και πικάντικου, υψηλή οξειδωτική σταθερότητα και χαρακτηριστικό αρωματικό προφίλ με νότες πράσινης ντομάτας, αγκινάρας και φρέσκου χόρτου. Η ελαιοπεριεκτικότητα της είναι σχετικά υψηλή (18-25% επί νωπού βάρους καρπού) και παρουσιάζει υψηλή ανταπόκριση στην άρδευση.

Η **Αμφίσσης** (Κονσερβολιά) χρησιμοποιείται κυρίως για επιτραπέζιους καρπούς, αλλά και για λάδι με ήπια οργανοληπτικά χαρακτηριστικά.

Η **Μαστοειδής** της Χίου, η **Λιανολιά Κέρκυρας**, η **Αθηνολιά Κρήτης**, η **Τσουνάτη** και άλλες τοπικές ποικιλίες συνθέτουν μια εξαιρετικά πλούσια γενετική κληρονομιά που αντικατοπτρίζει χλιετίες τοπικής προσαρμογής (Rugini et al., 2016).

2.5.2 Κλιματικές συνθήκες

Οι κλιματικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου επηρεάζουν τόσο την ποσότητα όσο και τη σύσταση του ελαίου. Έτη με ξηρό και θερμό κλίμα κατά την ωρίμανση τείνουν να παράγουν ελαιόλαδα με υψηλότερη περιεκτικότητα σε φαινολικές ενώσεις και υψηλότερη οξειδωτική σταθερότητα, επειδή η υδατική καταπόνηση αποτελεί σήμα για αυξημένη βιοσύνθεση ελευρωπαΐνης και παραγώγων σεκοΐρεδοειδών (Beltrán et al., 2005).

Αντίθετα, έτη με άφθονες βροχές ή εντατική άρδευση παράγουν συχνά ελαιόλαδα με ήπιο χαρακτήρα και χαμηλότερη οξειδωτική σταθερότητα.

2.5.3 Συγκομιδή και αποθήκευση

Ο χρόνος συγκομιδής σε σχέση με το στάδιο ωρίμανσης του καρπού αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες της ποιότητας. Κατά την ωρίμανση παρατηρούνται συστηματικές μεταβολές: μείωση της χλωροφύλλης και αύξηση ανθοκυανών (πράσινο -> μωβ -> μαύρος καρπός), αύξηση ελαιοπεριεχομένου, μείωση ελευρωπαΐνης και ολικών φαινολών, μεταβολές στη σύσταση πτητικών ενώσεων. Η συγκομιδή σε πρώιμο στάδιο (δείκτης ωρίμανσης 0-2) παράγει ελαιόλαδο πλούσιο σε πολυφαινόλες, χλωροφύλλες και αρωματικές ενώσεις, με χαμηλό ελαιοπεριεχόμενο, ενώ η συγκομιδή σε προχωρημένο στάδιο ωρίμανσης (δείκτης 4-7) παράγει λάδι με υψηλότερη απόδοση σε ποσότητα αλλά με κατώτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά (El Riachy et al., 2011).

Η **αποθήκευση** του ελαιόκαρπου μετά τη συγκομιδή και πριν την έκθλιψη αποτελεί επίσης κρίσιμο παράγοντα: η παρατεταμένη αποθήκευση (>48 ώρες) σε υψηλές θερμοκρασίες ευνοεί την δράση λιπολυτικών ενζύμων (λιπάσες) που αυξάνουν την ελεύθερη οξύτητα, την οξείδωση λιπαρών οξέων και τη μείωση φαινολικών ενώσεων.

2.5.4 Επεξεργασία στον ελαιώνα και στο ελαιοτριβείο

Η τεχνολογία έκθλιψης επηρεάζει σημαντικά την τελική ποιότητα. Η ψυχρή έκθλιψη (<27°C) διατηρεί τις πτητικές ενώσεις, τις φαινολικές ενώσεις και τις τοκοφερόλες σε υψηλότερα επίπεδα συγκριτικά με έκθλιψη σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Ο χρόνος μάλαξης συνήθως 20-45 λεπτά αποτελεί βασική μεταβλητή που επηρεάζει την ισορροπία μεταξύ απόδοσης ελαιολάδου και διατήρησης φαινολικών ενώσεων: η παρατεταμένη μάλαξη αυξάνει την απόδοση αλλά μπορεί να μειώσει τις πολυφαινόλες λόγω οξείδωσης (Clodoveo, 2012).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΡΔΕΥΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΑΙΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ

3.1 Υδατικές ανάγκες της ελιάς

Η ποσοτική εκτίμηση των υδατικών αναγκών της ελιάς αποτελεί προαπαιτούμενο για τον ορθολογικό σχεδιασμό κάθε αρδευτικού συστήματος. Στη γεωπονική επιστήμη, οι υδατικές ανάγκες μιας καλλιέργειας εκφράζονται μέσω της **εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας (ETc)**, η οποία προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της εξατμισοδιαπνοής

αναφοράς (ET₀) - που υπολογίζεται βάσει μετεωρολογικών δεδομένων, χρησιμοποιώντας κυρίως την εξίσωση Penman – Monteith (FAO-56) - με τον **συντελεστή καλλιέργειας** K_c, ο οποίος εκφράζει τη σχετική εξατμισοδιαπνοή της ελιάς σε σχέση με την αναφορά (Allen et al., 1998).

$$ET_c = K_c \times K_r \times ET_0$$

Για την ελιά, ο συντελεστής K_c παρουσιάζει σαφή εποχιακή διακύμανση, αντικατοπτρίζοντας τις μεταβολές στην ενεργό φυλλική επιφάνεια, τη βλαστική δραστηριότητα και τις φυσιολογικές διεργασίες ανά φαινολογικό στάδιο. Σε τυπικούς εντατικούς ελαιώνες, οι τιμές K_c κυμαίνονται από 0,40-0,50 κατά τους χειμερινούς μήνες (περίοδος ηρεμίας, χαμηλή εξατμισοδιαπνοή) έως 0,65-0,80 κατά τους θερινούς μήνες (μέγιστη φυλλική επιφάνεια, υψηλή απαίτηση νερού), με μέση ετήσια τιμή περί το 0,60-0,65 (Orgaz et al., 2006). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές K_c διαφέρουν σημαντικά μεταξύ συστημάτων καλλιέργειας: σε υπερεντατικά συστήματα - όπου η φυλλική επιφάνεια ανά μονάδα εδάφους είναι πολύ μεγαλύτερη - ο K_c μπορεί να φτάσει έως 1,0-1,2.

Σε κλιματικές συνθήκες αντιπροσωπευτικές της ελληνικής Μεσογείου, η **ετήσια εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας** για εντατικούς ελαιώνες εκτιμάται σε 600-900 mm. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ετήσια βροχόπτωση σε πολλές ελληνικές ελαιοκαλλιεργητικές περιοχές κυμαίνεται μεταξύ 400 και 700 mm - με τη μεγάλη πλειονότητα να κατανέμεται στους χειμερινούς μήνες (Οκτώβριος - Απρίλιος) και ελάχιστη βροχόπτωση κατά την περίοδο υψηλής ζήτησης (Ιούνιος - Σεπτέμβριος) - το **υδατικό έλλειμμα άρδευσης** κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 200 και 500 mm ανά καλλιεργητική περίοδο (Orgaz et al., 2006).

Ιδιαίτερης σημασίας είναι η **χρονική κατανομή** των υδατικών αναγκών σε σχέση με τα φαινολογικά στάδια του καρπού. Η βιβλιογραφία αναγνωρίζει τέσσερις κρίσιμες φαινολογικές περιόδους διαφορετικής ευαισθησίας και σημασίας για την άρδευση:

Περίοδος I - Άνθηση και καρπόδεση (Απρίλιος - Ιούνιος): Κατά την περίοδο αυτή, η υδατική καταπόνηση μπορεί να μειώσει την καρπόδεση, αφού η επικονίαση και η γονιμοποίηση απαιτούν επαρκή υδατική κατάσταση του φυτού. Ωστόσο, στις περισσότερες μεσογειακές περιοχές, η άνθηση συμπίπτει με περίοδο επαρκούς εδαφικής υγρασίας από τις χειμερινές βροχές, οπότε η ανάγκη άρδευσης είναι συνήθως περιορισμένη (Moriani et al., 2003).

Περίοδος II - Ταχεία κυτταρική διαίρεση και ανάπτυξη καρπού (Ιούνιος - Ιούλιος): Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται από την ταχύτατη αύξηση του καρπού και αποτελεί κρίσιμο στάδιο για τον τελικό αριθμό κυττάρων του περικαρπίου. Υδατική καταπόνηση σε αυτό το στάδιο μειώνει το τελικό μέγεθος καρπού και, κατ' επέκταση, τη συνολική παραγωγή. Η άρδευση κατά το στάδιο II είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της παραγωγικότητας (Connar & Fereres, 2005).

Περίοδος III - Σκλήρυνση πυρήνα και συσσώρευση ελαίου (Ιούλιος - Αύγουστος): Αυτό αποτελεί το βασικότερο φαινολογικό στάδιο για την ποιότητα. Κατά τη φάση αυτή λαμβάνει χώρα η κύρια βιοσύνθεση τριακυλογλυκερολών, φαινολικών ενώσεων και πτητικών αρωματικών συστατικών. Η υδατική κατάσταση του φυτού κατά αυτό το στάδιο επηρεάζει άμεσα το τελικό φαινολικό προφίλ και την οξειδωτική σταθερότητα (Berenguer et al., 2006).

Περίοδος IV - Ωρίμανση (Σεπτέμβριος-Νοέμβριος): Κατά την ωρίμανση, η μεταβολή του υδατικού καθεστώτος επηρεάζει τους ρυθμούς υδρόλυσης των φαινολικών γλυκοζιτών (ιδίως ελευρωπαΐνης) και τη βιοσύνθεση πτητικών ενώσεων. Ήπιο υδατικό

στρες κατά αυτό το στάδιο έχει συσχετιστεί με αύξηση του φαινολικού περιεχομένου στο τελικό ελαιόλαδο (Gucci et al., 2019).

3.2 Μέθοδοι άρδευσης στην ελαιοκαλλιέργεια

3.2.1 Στάγδην άρδευση

Η στάγδην άρδευση (drip irrigation) αποτελεί σήμερα την κυρίαρχουσα μέθοδο άρδευσης σε σύγχρονους εντατικούς και υπερεντατικούς ελαιώνες, τόσο λόγω της υψηλής αποδοτικότητας χρήσης νερού (Water Use Efficiency – WUE) όσο και λόγω της συμβατότητας της με συστήματα γεωργίας ακριβείας. Η μέθοδος εφαρμόζει νερό απευθείας στην επιφάνεια του εδάφους - ή στο υπέδαφος, στην περίπτωση υπόγειας στάγδην άρδευσης - μέσω σωληνώσεων και σταλακτών χαμηλής παροχής (1-4 L/h), επιτρέποντας τη συνεχή ή ημισυνεχή εφαρμογή μικρών ποσοτήτων νερού που διατηρούν την εδαφική υγρασία εντός του βέλτιστου εύρους για την απορρόφηση από τις ρίζες (Fernández et al., 2013).

Τα κύρια πλεονεκτήματα της στάγδην άρδευσης στην ελαιοκαλλιέργεια περιλαμβάνουν:

- **Υψηλή αποδοτικότητα νερού:** Οι απώλειες νερού λόγω επιφανειακής εξάτμισης, επιφανειακής απορροής και βαθιάς διήθησης είναι ελάχιστες, με αποδοτικότητα εφαρμογής 85-95% έναντι 60-70% για καταιονισμό και 40-60% για επιφανειακή άρδευση (Ayars et al., 2024).
- **Δυνατότητα fertigation:** Η ταυτόχρονη εφαρμογή λιπασμάτων μέσω του αρδευτικού δικτύου (fertigation) επιτρέπει ακριβή εφαρμογή θρεπτικών στοιχείων στη ριζόσφαιρα, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα λίπανσης και μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.
- **Συμβατότητα με αυτοματισμούς:** Τα δίκτυα στάγδην άρδευσης ενσωματώνονται εύκολα με ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες, ελεγκτές και αισθητήρες, επιτρέποντας πλήρως αυτοματοποιημένη και αισθητηριοκατευθυνόμενη λειτουργία - θεμελιώδες χαρακτηριστικό για συστήματα γεωργίας ακριβείας.
- **Μειωμένη ανάπτυξη ζιζανίων:** Η εφαρμογή νερού μόνο στη ζώνη της ρίζας αφήνει τις μεταξύ των γραμμών αποστάσεις ξηρές, μειώνοντας τον ανταγωνισμό από ζιζάνια (Ayars et al., 2024).

3.2.2 Καταιονισμός

Ο καταιονισμός (sprinkler irrigation) εφαρμόζεται σε ορισμένους ελαιώνες, κυρίως σε περιοχές με χαμηλότερη εξάτμιση ή σε εκμεταλλεύσεις με ήδη εγκατεστημένη υποδομή από προηγούμενες καλλιέργειες. Διακρίνεται σε υπερκόμιο (overhead) - κυρίως για αντιπαγετική προστασία - και υποκόμιο (under-tree), που αποτελεί τη συνηθέστερη εφαρμογή για κανονική άρδευση. Μειονεκτήματα περιλαμβάνουν υψηλότερες απώλειες εξάτμισης (15-30%), κίνδυνο ανάπτυξης μυκητολογικών ασθενειών λόγω υγρασίας φυλλώματος, καθώς και δυσκολία εφαρμογής σε ανεμώδεις συνθήκες. Ο καταιονισμός είναι γενικά λιγότερο συμβατός με τις αρχές γεωργίας ακριβείας λόγω της χαμηλότερης χωρικής ακρίβειας εφαρμογής νερού (Ayars et al., 2024).

3.2.3 Υπόγεια άρδευση

Η υπόγεια στάγδην άρδευση αποτελεί την πλέον εξελιγμένη μέθοδο εφαρμογής νερού, τοποθετώντας τους σταλακτηφόρους σωλήνες σε βάθος 20-40 cm κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Έτσι, το νερό εφαρμόζεται απευθείας στη ζώνη ρίζας, ελαχιστοποιώντας τις επιφανειακές απώλειες εξάτμισης, ιδιαίτερα σε συνθήκες υψηλών θερινών θερμοκρασιών. Πλεονεκτήματα της υπόγειας άρδευσης περιλαμβάνουν αποδοτικότητα νερού >95%, μείωση ανάπτυξης ζιζανίων, ελαχιστοποίηση προβλημάτων αλατότητας επιφανειακού εδάφους και βελτίωση αερισμού ριζοστρώματος. Ωστόσο, το υψηλό κόστος εγκατάστασης και η δυσκολία συντήρησης (εντοπισμός βλαβών, κίνδυνος φραγής σταλακτών) αποτελούν περιοριστικούς παράγοντες (Lamm & Camp, 2007).

3.3 Υδατικό στρες και φυσιολογία της ελιάς

Η κατανόηση των φυσιολογικών μηχανισμών με τους οποίους η ελιά αντιδρά στο υδατικό στρες είναι απαραίτητη για την ορθολογική ερμηνεία των αποτελεσμάτων της άρδευσης στην ποιότητα ελαιολάδου.

Σε υψηλό στρες, υπερτερεί ο ανισοϋδρικός χαρακτήρας με επιτρεπόμενη μείωση του Ψ_{stem} σε χαμηλές τιμές, ενώ παράλληλα ενεργοποιούνται βαθύτεροι μηχανισμοί ανθεκτικότητας: ωσμωτική ρύθμιση, συσώρευση συμβατών διαλυτών (προλίνη, σάκχαρα, γλυκινοβεταΐνες), τροποποίηση της ελαστικότητας κυτταρικών τοιχωμάτων (Fernández, 2014).

Από φυσιολογικής άποψης, **το υδατικό δυναμικό στελέχους (midday stem water potential, Ψ_{stem})** - μετρούμενο με θάλαμο πίεσης (pressure bomb/ Scholander chamber) σε φύλλα που έχουν καλυφθεί με αλουμινόχαρτο για ισορροπία με το ξυλώδες σύστημα - αποτελεί τον πιο αξιόπιστο δείκτη υδατικής κατάστασης ελιάς.

Τιμές Ψ_{stem} για την ελιά:

- -0,8 έως -1,2 MPa: Βέλτιστη υδατική κατάσταση, απουσία στρες
- -1,2 έως -1,8 MPa: Ήπιο έως μέτριο στρες, ανεκτό για τις περισσότερες φαινολογικές φάσεις
- -1,8 έως -2,5 MPa: Μέτριο έως σοβαρό στρες, αρνητικές επιπτώσεις στη φωτοσύνθεση
- < -2,5 MPa: Σοβαρό στρες, κίνδυνος μη αναστρέψιμης βλάβης (Fernández, 2014)

Σε συνθήκες υδατικού στρες, η ελιά ενεργοποιεί επίσης αύξηση της βιοσύνθεσης αμπισικού οξέος (ABA), ορμόνης που ρυθμίζει το κλείσιμο των στομάτων και επηρεάζει μια σειρά μεταβολικών διεργασιών, συμπεριλαμβανομένης της βιοσύνθεσης φαινολικών ενώσεων μέσω φαινυλαλάνης. Αυτή η βιοχημική σύνδεση μεταξύ υδατικού στρες και φαινολικής βιοσύνθεσης αποτελεί τη φυσιολογική βάση για τη βελτίωση φαινολικού προφίλ ελαιολάδου μέσω ελεγχόμενης ελλειμματικής άρδευσης (Petridis et al., 2012).

3.4 Επίδραση της άρδευσης στην παραγωγικότητα

Η επίδραση της άρδευσης στην παραγωγικότητα του ελαιώνα έχει μελετηθεί εκτεταμένα. Γενικά, η άρδευση αυξάνει σημαντικά τη βιομάζα καρπού, την ελαιοπεριεκτικότητα και την τελική απόδοση σε λάδι ανά εκτάριο - ιδιαίτερα σε ξηρά και ημίξηρα περιβάλλοντα όπου η μη αρδευόμενη καλλιέργεια υποφέρει από σημαντική υδατική καταπόνηση κατά τους κρίσιμους θερινούς μήνες.

Οι **Grattan et al. (2006)** σε διετές πείραμα στην Καλιφόρνια με υπερεντατικό ελαιώνα ποικιλίας Arbequina, διαπίστωσαν ότι η απόδοση σε έλαιο μεγιστοποιείται σε ένα φάσμα εφαρμοζόμενου νερού (περίπου 70-75% ETc).

Παρόμοια ευρήματα αναφέρουν οι **Moriana et al. (2003)** σε ελαιώνες ποικιλίας Picual στην Ισπανία: η εφαρμογή 100% ETc αύξησε την παραγωγή κατά 60-120% σε σύγκριση με ξερική καλλιέργεια. Ωστόσο, οι ίδιοι ερευνητές επισήμαναν ότι η αύξηση παραγωγής δεν ήταν γραμμική: η εφαρμογή 50% ETc παρείχε περίπου το 80-85% της μέγιστης παραγωγής, υποδεικνύοντας σαφώς ότι η ελλειμματική άρδευση μπορεί να επιτύχει αποδεκτά παραγωγικά αποτελέσματα με σημαντικά λιγότερο νερό.

Κρίσιμη παράμετρος είναι η σχέση μεταξύ άρδευσης και ελαιοπεριεκτικότητας. Η υπεράρδευση - ιδιαίτερα κατά τη φάση ωρίμανσης - μπορεί να μειώσει το ελαιοπεριεχόμενο του καρπού, επειδή ευνοεί τη βλαστική του ανάπτυξη και την ανάπτυξη καρπού εις βάρος της συσσώρευσης ελαίου. Αντίθετα, ήπιο υδατικό στρες κατά τη σκλήρυνση πυρήνα (Στάδιο II) μπορεί να αυξήσει ελαφρά το ελαιοπεριεχόμενο ανά καρπό, αν και ο καρπός θα έχει μικρότερο μέγεθος (Iniesta et al., 2009).

3.5 Επίδραση της άρδευσης στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ελαιολάδου

3.5.1 Οξύτητα

Η ελεύθερη οξύτητα (free fatty acidity – FFA), εκφραζόμενη ως ποσοστό ελαϊκού οξέος, αποτελεί τον πρωταρχικό δείκτη ποιότητας και νωπότητας ελαιολάδου, εκφράζοντας το βαθμό υδρόλυσης των τριακυλογλυκερολών από λιπολυτικά ένζυμα (λιπάσες). Τιμές FFA > 0,8% αποκλείουν το λάδι από την κατηγορία EVOO, μειώνοντας σημαντικά την εμπορική του αξία.

Η σχέση άρδευσης-οξύτητας είναι πολύπλοκη και εξαρτάται κυρίως από έμμεσες επιδράσεις: η άρδευση επηρεάζει την οξύτητα κυρίως μέσω της επίδρασης της στο στάδιο ωρίμανσης και στη φυσική κατάσταση του καρπού κατά τη συγκομιδή. Αρδευόμενοι ελαιώνες τείνουν να παράγουν καρπούς με υψηλότερη περιεκτικότητα σε νερό, γεγονός που, αν συνδυαστεί με τραυματισμό κατά τη συγκομιδή ή παρατεταμένη αποθήκευση, μπορεί να επιταχύνει τη λιπόλυση. Αντίθετα, σε ξερικούς ελαιώνες ή με ήπιο υδατικό στρες, ο καρπός εμφανίζει συνήθως μεγαλύτερη σκληρότητα και αντοχή σε λιπολυτική αποικοδόμηση (Patumi et al., 2002).

Οι **Berenguer et al. (2006)**, σε πείραμα σε ελαιώνες ποικιλία Arbequina (υπέρπυκνο σύστημα) στη Καλιφόρνια, διαπίστωσαν ότι η υψηλή άρδευση (100% ETc) οδήγησε σε οριακά υψηλότερες τιμές FFA (0,35-0,55%) συγκριτικά με χαμηλή άρδευση (33% ETc: 0,20-0,35%), χωρίς ωστόσο καμία ομάδα να υπερβαίνει το όριο EVOO. Παρόμοια αποτελέσματα ανέφεραν οι **Patumi et al. (2002)** για την ποικιλία Kalamata, με τάση μικρής αύξησης FFA σε αρδευόμενες παρτίδες.

3.5.2 Φαινολικές ενώσεις

Η επίδραση της άρδευσης στις φαινολικές ενώσεις αποτελεί το πλέον ερευνημένο και παράλληλα πιο σημαντικό κεφάλαιο της σχέσης άρδευσης-ποιότητας, δεδομένης της εξαιρετικής διατροφικής και εμπορικής αξίας των πολυφαινολών EVOO. Η γενική αρχή που αναδύεται από τη βιβλιογραφία είναι σαφής: **η αύξηση της εφαρμοζόμενης**

άρδευσης οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης φαινολικών ενώσεων στο ελαιόλαδο, και αντιστρόφως.

Η βιοχημική ερμηνεία αυτής της σχέσης στηρίζεται σε δύο κύριους μηχανισμούς: (α) **αποτέλεσμα αραίωσης (dilution effect)**: η αυξημένη εισροή νερού οδηγεί σε μεγαλύτερους καρπούς με υψηλότερη περιεκτικότητα νερού, αραιώνοντας τις φαινολικές ενώσεις ανά μονάδα ελαίου και (β) **φυσιολογικός μηχανισμός**: το υδατικό στρες αποτελεί αβιοτική καταπόνηση που διεγείρει τη βιοσύνθεση φαινολικών ενώσεων μέσω ενεργοποίησης του μονοπατιού φαινυλοπροπανοειδών (PAL Pathway) στο οποίο η φαινυλαλανίνη αμμωνία λυάση (PAL) αποτελεί το κύριο ρυθμιστικό ένζυμο. Το υδατικό στρες επηρεάζει τόσο το μονοπάτι των φαινυλοπροπανοειδών όσο και τον μεταβολισμό των σεκοϊριδοειδών, οδηγώντας συνήθως σε υψηλότερες συγκεντρώσεις φαινολικών συστατικών στον καρπό και το ελαιόλαδο (Servili et al., 2009).

Ολικές πολυφαινόλες: Έρευνες καταγράφουν μείωση ολικών πολυφαινολών κατά 25-60% σε πλήρως αρδευόμενους ελαιώνες συγκριτικά με ξερικούς ή ελλειμματικά αρδευόμενους. Οι **Ben-Gal et al. (2011)** σε ελαιώνες ποικιλίας Barnea στο Ισραήλ επιβεβαίωσαν ότι η αυξημένη άρδευση συνδέεται με σημαντική μείωση των ολικών φαινολικών του ελαιολάδου. Οι **Iniesta et al. (2009)** σε ποικιλία Cornicabra στην Ισπανία κατέγραψαν παρόμοιες διαφορές: 250 mg/kg σε 100% ETc έναντι 480 mg/kg σε ξερική καλλιέργεια.

Ελευρωπαΐνη και παράγωγα: Η ελευρωπαΐνη είναι ένα από τα πλέον βιολογικά δραστικά σεκοϊρεδοειδή. Οι **Caruso et al. (2017)** σε ελαιώνες ποικιλίας Frantoio στην Ιταλία κατέγραψαν μείωση ελευρωπαΐνης κατά 40-55% στα πλήρως αρδευόμενα δέντρα συγκριτικά με τα ελλειμματικά (33% ETc), υπογραμμίζοντας τη σημασία της ελλειμματικής άρδευσης για τη διατήρηση των βιολογικά δραστικών συστατικών.

Ολεοκανθάλη και ολεακίνη: Δύο ιδιαίτερα σημαντικά σεκοϊρεδοειδή με εξαιρετικές τεκμηριωμένες βιολογικές ιδιότητες - αντιφλεγμονώδεις, αντικαρκινικές και νευροπροστατευτικές - παρουσιάζουν επίσης αρνητική συσχέτιση με τα επίπεδα άρδευσης (Gómez-Rico et al., 2007).

Συνολικά, η ελλειμματική άρδευση οδηγεί σε σημαντική αύξηση των φαινολικών ενώσεων και των σεκοϊρεδοειδών στο ελαιόλαδο, ενώ η πλήρης άρδευση μειώνει τα επίπεδα αυτά λόγω αραίωσης και καταστολής της φυσιολογικής φαινολικής βιοσύνθεσης (Sena-Moreno et al., 2018).

3.5.3 Αρωματικά χαρακτηριστικά

Το αρωματικό προφίλ του ελαιολάδου καθορίζεται από ένα σύνθετο μείγμα πτητικών ενώσεων - κυρίως C6 αλδεΐδες, αλκοόλες και εστέρες - που παράγονται κατά την έκθλιψη λιποξυγενάσης, ξεκινώντας από λινολενικό οξύ. Οι κύριες πτητικές ενώσεις που συνδέονται με θετικά οργανοληπτικά χαρακτηριστικά (“φρουτώδης”, “χορτώδης”, “πράσινη ντομάτα”) περιλαμβάνουν την (E)-2-εξενάλη (κύριο συστατικό του “χορτώδους” αρώματος), την (Z)-3-εξενόλη, την 1-εξανάλη και τον οξικό εξυλεστέρα (Gómez-Rico et al., 2007).

Η άρδευση επηρεάζει το αρωματικό προφίλ μέσω πολλαπλών μηχανισμών. Η αυξημένη άρδευση τείνει να μεταβάλλει τον λόγο C6:C5 πτητικών ενώσεων και να μειώνει την ένταση των “πράσινων” αρωμάτων, οδηγώντας σε ελαιόλαδα με ήπιο ή “ώριμο” χαρακτήρα. Αντίθετα, η ελλειμματική άρδευση - ιδίως κατά τη φάση ωρίμανσης - διατηρεί υψηλότερη δραστηριότητα της λιποξυγενάσης (LOX), με αποτέλεσμα εντονότερα “πράσινα” αρωματικά χαρακτηριστικά (Gómez-Rico et al., 2007). Αντίστοιχα, μελέτες σε ποικιλία Κορωνέικη αναφέρουν ότι ήπιο υδατικό στρες κατά την ωρίμανση συσχετίζεται με υψηλότερες συγκεντρώσεις πτητικών C6 και εντονότερο “φρουτώδη”

χαρακτήρα, όπως αξιολογήθηκε από εκπαιδευόμενο οργανοληπτικό πάνελ (Petridis et al., 2012).

3.5.4 Οξειδωτική σταθερότητα

Η οξειδωτική σταθερότητα (oxidative stability) εκφράζει την αντίσταση του ελαιολάδου στην τάγγιση (rancidity), δηλαδή στις αλυσιδωτές αντιδράσεις ελεύθερων ριζών που υποβαθμίζουν τα λιπαρά οξέα, παράγοντας καρβονυλικές και αλδεϋδικές ενώσεις με δυσάρεστα οσμηρά χαρακτηριστικά. Μετράται εργαστηριακά με τη μέθοδο Rancimat (EN 14112), η οποία εκφράζει τον χρόνο επαγωγής (Induction Time – IT) σε ώρες υπό επιταχυνόμενες συνθήκες (98-120°C, ροή αέρα 20 L/h) (Velasco & Dobarganes, 2002). Η οξειδωτική σταθερότητα εξαρτάται από τρεις κύριους παράγοντες: (α) τη σύσταση λιπαρών οξέων (υψηλή περιεκτικότητα σε μονοακόρεστα, ανεβάζει τη σταθερότητα), (β) την περιεκτικότητα σε πολυφαινόλες (κύριοι αντιοξειδωτικοί παράγοντες) και (γ) την περιεκτικότητα σε α-τοκοφερόλη (Velasco & Dobarganes, 2002). Δεδομένου ότι η άρδευση επηρεάζει σημαντικά τα φαινολικά επίπεδα, επηρεάζει αναπόφευκτα και την οξειδωτική σταθερότητα: ελλειμματική άρδευση -> υψηλότερες πολυφαινόλες -> υψηλότερος χρόνος επαγωγής Rancimat -> μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (Iniasta et al., 2009).

Οι **Gucci et al. (2019)** σε ελαιώνες ποικιλίας Frantoio στην Ιταλία ανέφεραν χρόνο επαγωγής Rancimat 12,4 ώρες για ελλειμματικά αρδευόμενα δέντρα (33% ETc) έναντι 8,1 ώρες για πλήρως αρδευόμενα (100% ETc) - διαφορά 53%, με άμεσες συνέπειες στη διάρκεια ζωής και στις εμπορικές προοπτικές του προϊόντος.

3.6 Ελλειμματική άρδευση και βιώσιμη διαχείριση νερού

Η **ελλειμματική άρδευση (Deficit Irrigation – DI)** ορίζεται ως η εκ προθέσεως εφαρμογή ποσοτήτων νερού μικρότερων από τις υπολογιζόμενες ανάγκες πλήρους εξατμισοδιαπνοής, με σκοπό την εξοικονόμηση νερού με αποδεκτό αντίκτυπο στην παραγωγή. Στο πλαίσιο της ελαιοκαλλιέργειας, η ελλειμματική άρδευση αντιπροσωπεύει μια στρατηγική που μπορεί να συνδυάσει εξοικονόμηση νερού με βελτίωση ποιοτικών χαρακτηριστικών (Fernández et al., 2013).

Οι κύριες στρατηγικές ελλειμματικής άρδευσης που έχουν μελετηθεί στην ελαιοκαλλιέργεια είναι:

Α) Σταθερή ελλειμματική άρδευση (Sustained Deficit Irrigation – SDI): Εφαρμόζει σταθερό ποσοστό (π.χ. 33%, 50%, 66%) της πλήρους ETc καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Είναι η απλούστερη στρατηγική, αλλά δεν λαμβάνει υπόψη τη διαφορετική ευαισθησία σταδίων (Iniasta et al., 2009).

Β) Ρυθμιζόμενη ελλειμματική άρδευση (Regulated Deficit Irrigation – RDI): Εφαρμόζει υδατικό στρες σε φαινολογικά στάδια χαμηλής ευαισθησίας (π.χ. σκλήρυνση πυρήνα, ωρίμανση) και πλήρη άρδευση σε στάδια υψηλής ευαισθησίας (ανθοφορία, ταχεία ανάπτυξη καρπού). Αποτελεί την πλέον επιστημονικά τεκμηριωμένη στρατηγική για βέλτιστη ισορροπία παραγωγής-ποιότητας-εξοικονόμησης νερού (Iniasta et al., 2009).

Γ) Μερική ξήρανση της ριζόσφαιρας (Partial Rootzone Drying – PRD): Εφαρμόζει άρδευση εναλλάξ στις δύο πλευρές του ριζικού συστήματος, ενεργοποιώντας σήματα

ΑΒΑ από τη μεριά των μη αρδευόμενων ριζών ενώ διατηρεί επαρκή υδατική κατάσταση από την αρδευόμενη πλευρά. Μελέτες σε ελαιώνες ανέφεραν εξοικονόμηση 50% νερού, με 15-20% απώλεια παραγωγής (Wahbi et al., 2005).

Συνολικά, η βιβλιογραφία υποστηρίζει ότι η RDI με εφαρμογή 33-50% ETc κατά τα στάδια σκλήρυνσης πυρήνα και ωρίμανσης επιτρέπει εξοικονόμηση νερού 35-55% συγκριτικά με πλήρη άρδευση, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει σημαντικά τα φαινορικά χαρακτηριστικά και την οξειδωτική σταθερότητα του ελαιολάδου με αποδεκτές επιπτώσεις στη συνολική παραγωγή (μείωση <15-20%) (Siakou et al., 2021). Αυτή η διαπίστωση αποτελεί τη θεμελιώδη γεωπονική βάση πάνω στην οποία τα εργαλεία της γεωργίας ακριβείας καλούνται να προσθέσουν ακρίβεια, αξιοπιστία και χωρική διαφοροποίηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΑΙΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ

4.1 Ορισμός και βασικές αρχές της γεωργίας ακριβείας

Η γεωργία ακριβείας (Precision Agriculture – PA) αντιπροσωπεύει μια μετατόπιση στη φιλοσοφία γεωργικής διαχείρισης: από την ομοιόμορφη αντιμετώπιση της γεωργικής εκμετάλλευσης ως οντότητας με σταθερές παραμέτρους, στην αναγνώριση και διαχείριση της εγγενούς χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας εντός κάθε αγρού ή ελαιώνα.

Σύμφωνα με το National Research Council (1997), η γεωργία ακριβείας περιγράφεται ως η διαχείριση της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας των αγρών με σκοπό τη βελτίωση της οικονομικής απόδοσης και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η φιλοσοφική και πρακτική βάση της γεωργίας ακριβείας εδράζεται στην αναγνώριση ότι κανένας αγρός ή ελαιώνας δεν είναι ομοιογενής: το έδαφος, η τοπογραφία, η κατανομή θρεπτικών, η εδαφική υγρασία, η υγεία των δέντρων, η παραγωγικότητα μεταβάλλονται χωρικά - ακόμα και σε μικρές αποστάσεις μέσα στον ίδιο ελαιώνα. Η παραδοσιακή γεωργία αγνοεί αυτή τη μεταβλητότητα, εφαρμόζοντας ενιαίες ποσότητες νερού, λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών σε ολόκληρη την εκμετάλλευση. Αυτό οδηγεί αναπόφευκτα σε υπερεφαρμογή εισροών σε ορισμένες ζώνες και υποεφαρμογή σε άλλες, με διπλό αρνητικό αποτέλεσμα: οικονομικές απώλειες και περιβαλλοντική επιβάρυνση (Zhang et al., 2002).

Η γεωργία ακριβείας οργανώνεται γύρω από έναν **κύκλο τριών φάσεων**:

Φάση 1 - Συλλογή δεδομένων (Sensing): Συστηματική απόκτηση χωρικά και χρονικά καταναμημένων πληροφοριών για το σύστημα εδάφους-φυτού-ατμόσφαιρας, μέσω αισθητήρων εδάφους, τηλεπισκόπησης, μετεωρολογικών σταθμών, drones και εργαστηριακών αναλύσεων.

Φάση 2 - Ανάλυση και λήψη αποφάσεων (Analysis & Decision): Επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων με χρήση εργαλείων GIS, στατιστικής χωρικής ανάλυσης, μοντέλων καλλιέργειας και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, με σκοπό τον προσδιορισμό αναγκών και την παραγωγή χαρτών εισροών μεταβλητής εφαρμογής.

Φάση 3 - Εφαρμογή (Actuation): Υλοποίηση των αποφάσεων μέσω αυτοματοποιημένων συστημάτων μεταβλητής εφαρμογής (Variable Rate Application – VRA) ή ελεγχόμενης άρδευσης, κλεισίματος βαλβίδων ενεργοποίησης αντλιών κ.λπ. (Zhang et al., 2002).

Η αποτελεσματικότητα του κύκλου αυτού εξαρτάται από τη ποιότητα, την πυκνότητα και την έγκαιρη διαθεσιμότητα των δεδομένων που τροφοδοτούν τη **Φάση 1**, καθιστώντας τις τεχνολογίες αισθητήρων και παρακολούθησης τον θεμέλιο λίθο ολόκληρου του οικοδομήματος.

Στο πλαίσιο της ελαιοκαλλιέργειας, η γεωργία ακριβείας αντιμετωπίζει ορισμένες ιδιαίτερες προκλήσεις που τη διαφοροποιούν από την εφαρμογή σε ετήσιες καλλιέργειες: (α) η πολυετής φύση της καλλιέργειας σημαίνει ότι οι αποφάσεις εγκατάστασης αισθητήρων και υποδομών έχουν μακροπρόθεσμες συνέπειες, (β) η ετερογένεια του ριζικού συστήματος - που εκτείνεται σε τρισδιάστατο χώρο - καθιστά την τοποθέτηση αισθητήρων κρίσιμη και απαιτητική, (γ) η φαινολογική πολυπλοκότητα απαιτεί στρατηγικές παρακολούθησης που λαμβάνουν υπόψη το στάδιο ανάπτυξης και (δ) η συνήθης ετερογένεια μεγέθους και κόμης μεταξύ δέντρων του ίδιου ελαιώνα απαιτεί εξατομικευμένη, ζωνική προσέγγιση (Fountas et al., 2011).

4.2 Τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας

4.2.1 Αισθητήρες εδάφους και υγρασίας

Οι αισθητήρες εδαφικής υγρασίας αποτελούν την πιο άμεση τεχνολογία για την παρακολούθηση της υδατικής κατάστασης του ριζοστρώματος και τον έλεγχο της άρδευσης. Διαφορετικές τεχνολογίες αισθητήρων παρέχουν μετρήσεις διαφορετικών υδατικών μεγεθών, με ιδιαίτερα πλεονεκτήματα και περιορισμούς.

Αισθητήρες FDR και TDR:

Οι αισθητήρες ανακλασιμετρίας στο πεδίο της συχνότητας : FDR (Frequency Domain Reflectometry) και ανακλασιμετρίας στο πεδίο του χρόνου :TDR (Time Domain Reflectometry) μετρούν την ογκομετρική εδαφική υγρασία (θ_v , m^3/m^3) αξιοποιώντας τη διηλεκτρική σταθερά του εδαφικού μείγματος (νερό + αέρας + στερεά), η οποία εξαρτάται έντονα από την περιεκτικότητα σε νερό. Οι αισθητήρες FDR λειτουργούν εκπέμποντας ηλεκτρομαγνητικό πεδίο γύρω από ηλεκτρόδια εγκατεστημένα στο έδαφος και μετρώντας μεταβολές στη διηλεκτρική απόκριση του εδάφους που σχετίζονται με την περιεκτικότητα του σε νερό, ενώ οι TDR μετρούν τον χρόνο διαδρομής ηλεκτρομαγνητικού παλμού κατά μήκος μεταλλικών οδηγών (probes) που είναι τοποθετημένοι στο έδαφος. Και οι δυο τεχνολογίες παρέχουν αξιόπιστα, συνεχή δεδομένα, αλλά απαιτούν βαθμονόμηση για

κάθε τύπο εδάφους - γεγονός κρίσιμης σημασίας σε ελαιώνες με ετερογενή εδαφολογικά χαρακτηριστικά (Jones et al., 2005).

Σύγχρονα συστήματα FDR - όπως τα Sentek EnviroSCAN, Decagon 5TE ή Campbell Scientific παρέχουν ολοκληρωμένη εικόνα του εδαφικού προφίλ υγρασίας. Η σύνδεση με dataloggers επιτρέπει εγκατάσταση σε πολλαπλά εδαφικά βάθη (π.χ. 10,20,40,60 cm) και η ασύρματη επικοινωνία (Wi-Fi, LoRa, NB-IoT), επιτρέπει τη μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε κεντρικές πλατφόρμες ανάλυσης.

Τενσιόμετρα:

Τα τενσιόμετρα μετρούν άμεσα τη μύζηση (matric potential) του εδαφικού νερού - δηλαδή την ενέργεια που πρέπει να δαπανήσουν οι ρίζες για να εξαγάγουν νερό από το έδαφος - σε kPa. Η μέτρηση της μύζησης είναι άμεσα φυσιολογικά ερμηνεύσιμη, καθώς αντιστοιχεί στη διαθεσιμότητα νερού για το φυτό ανεξαρτήτως εδαφικής σύστασης. Όρια μύζησης για άρδευση ελιάς: 30-60 kPa (ελαφρά εδάφη) έως 60-80 kPa (αργιλώδη εδάφη). Μειονέκτημα των τενσιόμετρων είναι η απαίτηση συντήρησης (αναπλήρωση νερού) και η περιορισμένη λειτουργία σε πολύ ξηρά εδάφη (>85 kPa). Ψηφιακά τενσιόμετρα (όπως iMetos, Irrometer Watermark) παρέχουν ηλεκτρονική καταγραφή και ασύρματη μετάδοση δεδομένων (Whalley et al., 2013).

Αισθητήρες ηλεκτρικής αγωγιμότητας (ECa) για χαρτογράφηση εδάφους:

Οι αισθητήρες εδαφικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (apparent electrical conductivity – ECa), όπως τα συστήματα EM38 (Geonics) ή Veris 3100, επιτρέπουν ταχεία και μη καταστρεπτική χαρτογράφηση της εδαφικής ετερογένειας σε ελαιώνες. Η ECa επηρεάζεται από εδαφική υγρασία, αλατότητα, σύσταση αργίλου, οργανική ουσία και θερμοκρασία. Η εδαφολογική χαρτογράφηση ECa αποτελεί θεμελιώδες βήμα για τον ορισμό ζωνών διαχείρισης (management zones) εντός του ελαιώνα, που αποτελούν τη βάση για τη χωρική διαφοροποίηση της άρδευσης (Corwin & Lesch, 2005).

Αισθητήρες υδατικής κατάστασης φυτών:

Πέραν των εδαφικών αισθητήρων, σύγχρονα συστήματα γεωργίας ακριβείας χρησιμοποιούν αισθητήρες που μετρούν άμεσα την υδατική κατάσταση του φυτού. Τα **δενδρόμετρα (trunk dendrometer)** μετρούν τις μικρές ημερήσιες μεταβολές στη διάμετρο του κορμού που οφείλονται στην υδατική κατάσταση - η μέγιστη ημερήσια συρρίκνωση (Maximum Daily Shrinkage – MDS) και η μέγιστη ημερήσια διόγκωση (Maximum Daily Growth – MDG) αποτελούν δείκτες που συσχετίζονται με το Ψstem. Αν και απαιτεί βαθμονόμηση και προσεκτική ερμηνεία, ο συγκεκριμένος αισθητήρας αποτελεί έναν από τους πιο αξιόπιστους συνεχείς δείκτες υδατικής κατάστασης για την ελιά (Fernández, 2014). Επίσης, **αισθητήρες ροής χυμού (sap flow sensors)** - βάσει θερμικής αραίωσης (Granier method) ή θερμικής ισορροπίας - παρέχουν εκτιμήσεις εξατμισοδιαπνοής σε επίπεδο μεμονωμένου δέντρου, επιτρέποντας τον υπολογισμό των ακριβών υδατικών αναγκών ανά δέντρο ή ζώνη ελαιώνα.

4.2.2 Συστήματα GPS και GIS

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Geographical Information Systems – GIS) αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της υποδομής της γεωργίας ακριβείας, παρέχοντας το

χωρικό πλαίσιο για τη συλλογή, αποθήκευση, ανάλυση και οπτικοποίηση όλων των γεωαναφερόμενων δεδομένων. Στην ελαιοκαλλιέργεια, τα GIS επιτρέπουν:

- **Χαρτογράφηση ελαιώνα:** Εντοπισμός θέσης κάθε δέντρου με GPS υψηλής ακρίβειας (RTK-GPS, ακρίβεια < 5 cm), δημιουργία ψηφιακών χαρτών τοπογραφίας, εδαφολογίας, δικτύου άρδευσης.
- **Χωρική ανάλυση μεταβλητότητας:** Επεξεργασία δεδομένων αισθητήρων (ECa, εδαφική υγρασία) με γεωστατικές μεθόδους (kriging, variogram analysis) για παραγωγή χαρτών χωρικής κατανομής παραμέτρων.
- **Ορισμός ζωνών διαχείρισης:** Οριοθέτηση ομοιογενών ζωνών εντός του ελαιώνα που παρουσιάζουν παρόμοια εδαφολογικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις, επιτρέποντας διαφοροποιημένη άρδευση ανά ζώνη.
- **Χρονοσειρές τηλεπισκόπησης:** Ενσωμάτωση δορυφορικών δεδομένων και εικόνων UAV σε χωροχρονικές βάσεις δεδομένων για ανίχνευση τάσεων (Longley et al., 2015).

Σε συνδυασμό με **GPS υψηλής ακρίβειας** (GNSS – Global Navigation Satellite Systems , συμπεριλαμβανομένων GPS, GLONASS, Galileo) και τεχνολογίες διόρθωσης RTK (Real-Time Kinematic), επιτυγχάνεται εντοπισμός θέσης σε ακρίβεια <2-5 cm, που είναι αναγκαία για αυτόνομη πλοήγηση γεωργικών μηχανημάτων και drones εντός ελαιώνων.

4.2.3 Τηλεπισκόπηση και δορυφορικά δεδομένα

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση παρέχει τη δυνατότητα συστηματικής παρακολούθησης ελαιώνων σε κλίμακα που δεν είναι εφικτή με επίγειες μεθόδους. Σύγχρονες δορυφορικές πλατφόρμες - όπως ο **Sentinel-2** (ESA, χωρική ανάλυση 10-60 m, επανεπίσκεψη 5 ημέρες, δωρεάν δεδομένα), ο **Landsat 8/9** (NASA/USGS, 30m, 16 ημέρες), το **WorldView-3** (Maxar, 30cm, εμπορικό) και τα **Planet Labs SuperDove** (3-5 m, ημερήσια κάλυψη) - παρέχουν δεδομένα σε πολλαπλές φασματικές ζώνες που επιτρέπουν τον υπολογισμό δεικτών βλάστησης και υδατικής κατάστασης.

Κύριοι φυτικοί δείκτες για εκτίμηση υδατικής κατάστασης:

Ο **NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index = $(NIR-R) / (NIR+R)$) αποτελεί τον πλέον διαδεδομένο δείκτη βλάστησης, αντικατοπτρίζοντας την ενεργό φωτοσυνθετική βιομάζα. Ωστόσο, η ευαισθησία του στο υδατικό στρες είναι περιορισμένη, καθώς φτάνει σε κορεσμό σε πυκνή βλάστηση.

Ο **NDWI** (Normalized Difference Water Index = $(NIR-SWIR) / (NIR+SWIR)$) είναι πιο ευαίσθητος στη φυλλική υγρασία, καθώς η ζώνη SWIR (Short-Wave Infrared) απορροφάται ισχυρά από το νερό των φύλλων. Παρουσιάζει ισχυρή συσχέτιση με το υδατικό δυναμικό στελέχους (Ψ_w) ($r^2 = 0,70-0,85$ σε διάφορες μελέτες) (Maes & Steppe, 2012).

Ο **PRI** (Photochemical Reflectance Index = $(R531-R570) / (R531+R570)$) αντικατοπτρίζει μεταβολές στον κύκλο των ξανθοφυλλών, που σχετίζονται με τη φωτοσυνθετική αποδοτικότητα και το υδατικό στρες. Απαιτεί υπερφασματικά δεδομένα υψηλής ανάλυσης.

Ο CWSI (Crop Water Stress Index), που υπολογίζεται από θερμικές εικόνες (θερμοκρασία φυλλώματος σε σχέση με αναφορές ξηρού και υγρού σώματος), θεωρείται ο πιο φυσιολογικά άμεσος δείκτης υδατικού στρες, καθώς η θερμοκρασία φυλλώματος αυξάνεται άμεσα όταν τα στόματα κλείνουν λόγω στρες (Zarco-Tejada et al., 2012).

Περιορισμός της δορυφορικής τηλεπισκόπησης αποτελεί η σχετικά χαμηλή χωρική ανάλυση (για Sentinel-2 : 10m, μεγαλύτερη από διάμετρο κόμης πολλών δέντρων), η εξάρτηση από νεφοκάλυψη και η χρονική υστέρηση πρόσβασης σε δεδομένα. Αυτοί οι περιορισμοί αναπληρώνονται από τα drones.

4.2.4 Μη επανδρωμένα αεροσκάφη (drones/UAV)

Τα Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (Unmanned Aerial Vehicles – UAV) ή drones έχουν μεταβάλλει επαναστατικά τις δυνατότητες παρακολούθησης ελαιώνων, παρέχοντας εικόνες εξαιρετικά υψηλής χωρικής ανάλυσης (1-10 cm/pixel). Η τεχνολογία UAV συνδυάζει χαμηλό κόστος λειτουργίας, ευελιξία ανάπτυξης και δυνατότητα φόρτωσης πολλαπλών τύπων αισθητήρων (Tsouros et al., 2019).

Τύποι αισθητήρων UAV για ελαιώνες:

RGB κάμερες (ορατό φάσμα): Παρέχουν φωτογραμμετικά μοντέλα υψηλής ανάλυσης (3D point clouds, Digital Surface Models – DSM) που επιτρέπουν εκτίμηση όγκου κόμης. Ανίχνευση ελλειπόντων δέντρων και παρακολούθηση αύξησης.

Πολυφασματικές κάμερες (RGB + NIR + RedEdge): Επιτρέπουν υπολογισμό NDVI, NDRE (Normalized Difference Red Edge Index) και άλλων φυτικών δεικτών σε ανάλυση < 10 cm, επιτρέποντας αναγνώριση μεμονωμένων δέντρων με στρες.

Θερμικές κάμερες (8-14 μm): Παρέχουν χάρτες θερμοκρασίας φυλλώματος που χρησιμοποιούνται για υπολογισμό CWSI. Η ανάλυση τους (5-15cm σε τυπικές πτήσεις <50m) επιτρέπει ανίχνευση υδατικού στρες σε επίπεδο μεμονωμένου δέντρου ή ακόμα και ανθοταξίας.

Υπερφασματικές κάμερες (400-2500 nm εκατοντάδες φασματικές ζώνες): Επιτρέπουν ανίχνευση πρώιμων συμπτωμάτων ασθενειών (π.χ. Verticillium, Xylella), ελλείψεων θρεπτικών και λεπτών αλλαγών στη φυσιολογική κατάσταση που δεν ανιχνεύονται από ευρύτερες φασματικές ζώνες. Ωστόσο, οι υπερφασματικές κάμερες UAV έχουν ακόμα υψηλό κόστος (>30.000-80.000 €) (Calderón et al., 2015).

Αλυσίδα επεξεργασίας εικόνων UAV:

Η χρησιμότητα των UAV για γεωργία ακριβείας εξαρτάται από μια αξιόπιστη αλυσίδα επεξεργασίας: (α) Structure from Motion (SfM) φωτογραμμετρία για ανακατασκευή ορθοφωτοχαρτών υψηλής ακρίβειας, (β) ραδιομετρική διόρθωση με χρήση πινάκων βαθμονόμησης (calibration panels), (γ) υπολογισμός φυτικών δεικτών ανά pixel, (δ) χωρική στατιστική ανάλυση για εντοπισμό ζωνών στρες. Λογισμικά όπως Agisoft

Metashape, Pix4D, DJI Terra ή open-source εναλλακτικές (OpenDroneMap) χρησιμοποιούνται ευρέως για αυτή την επεξεργασία (Tsouros et al., 2019).

4.2.5 Internet of Things (IoT) στην αγροτική παραγωγή

Το Internet of Things (IoT) στη γεωργία - γνωστό και ως “Αγροτικό IoT” ή “Smart Farming” - αναφέρεται στο οικοσύστημα διασυνδεδεμένων έξυπνων συσκευών, αισθητήρων, ενεργοποιητών και πλατφορμών ανάλυσης δεδομένων που επικοινωνούν μέσω διαδικτύου, επιτρέποντας αυτοματοποιημένη παρακολούθηση και έλεγχο αγροτικών διεργασιών σε πραγματικό χρόνο.

Στην ελαιοκαλλιέργεια, μια τυπική περίπτωση IoT συστήματος άρδευσης οργανώνεται σε 4 επίπεδα (Villa-Henriksen et al., 2020):

Επίπεδο 1 - Αισθητήρες (Perception Layer): Αισθητήρες εδαφικής υγρασίας FDR/TDR, тенσιόμετρα, αισθητήρες θερμοκρασίας εδάφους, μετεωρολογικό σταθμό, (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου, βροχόπτωση), αισθητήρες ροής νερού στο δίκτυο άρδευσης.

Επίπεδο 2 - Επικοινωνία (Network Layer): Πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας όπως LoRaWAN (Long Range Wide Area Network - εύρος 5-15 km, πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ιδανικό για απομακρυσμένους ελαιώνες), NB-IoT (Narrowband IoT - μέσω κυψελωτού δικτύου), Zigbee ή Wi-Fi Mesh (για μικρότερες αποστάσεις). Η επιλογή πρωτοκόλλου εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα δικτύου, την έκταση του ελαιώνα και τις απαιτήσεις κατανάλωσης ενέργειας (Avşar & Mowla, 2022).

Επίπεδο 3 - Επεξεργασία και Ανάλυση (Application Layer): Πλατφόρμες cloud που αποθηκεύουν και επεξεργάζονται τα δεδομένα, εκτελούν αλγόριθμους εκτίμησης ETo (Penman-Monteith), παράγουν συστάσεις άρδευσης και αποστέλλουν εντολές ελέγχου στο σύστημα. Εμπορικές πλατφόρμες (Teralytic, Sensoterra, Aquacheck, WaterBee, iMetos) ή open-source λύσεις (FIWARE, OpenIoT) επιτρέπουν τη συλλογή, οπτικοποίηση και ανάλυση δεδομένων μέσω web ή mobile εφαρμογών.

Επίπεδο 4 - Εφαρμογή (Actuation Layer): Ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες ελέγχου άρδευσης, ηλεκτρονικοί ελεγκτές άρδευσης (irrigation controllers), συστήματα ρύθμισης πίεσης και παροχής που ανταποκρίνονται αυτόματα σε εντολές από την πλατφόρμα ανάλυσης.

4.3 Εφαρμογές γεωργίας ακριβείας στην άρδευση

Η ενοποίηση των παραπάνω τεχνολογιών σε ολοκληρωμένα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων Άρδευσης (Irrigation Decision Support Systems – IDSS) αποτελεί την πλέον ολοκληρωμένη εφαρμογή γεωργίας ακριβείας στη διαχείριση νερού. Τα IDSS συνθέτουν δεδομένα πολλαπλών πηγών - εδαφικής υγρασίας, υδατικής κατάστασης φυτών, μετεωρολογικών δεδομένων, φαινολογικού σταδίου, τηλεπισκόπησης - για να παράγουν συστάσεις άρδευσης συγκεκριμένες ανά ζώνη και χρόνο (Tzerakis et al., 2023).

Ένα τυπικό IDSS για ελαιώνες λειτουργεί ως εξής: (α) ο μετεωρολογικός σταθμός παρέχει καθημερινά δεδομένα για τον υπολογισμό ET_0 κατά FAO-56, (β) ο συντελεστής K_c εφαρμόζεται ανά φαινολογικό στάδιο για τον υπολογισμό ET_c , (γ) τα δεδομένα αισθητήρων εδαφικής υγρασίας επαληθεύουν/διορθώνουν τις εκτιμήσεις ET_c , (δ) ο αλγόριθμος αποφάσεων παράγει σύσταση - ποιος τομέας ποτίζεται, τότε και για πόση ώρα - ανάλογα με τη στρατηγική άρδευσης (πλήρη ET_c ή ελλειμματική), (ε) η εντολή αποστέλλεται αυτόματα μέσω IoT στις ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες (Tzerakis et al., 2023).

Πρόσφατες εξελίξεις ενσωματώνουν αλγορίθμους **μηχανικής μάθησης (Machine Learning – ML)** - Random Forest, Neural Networks, Support Vector Machines - που εκπαιδεύονται σε ιστορικά δεδομένα αισθητήρων, μετεωρολογικών παραμέτρων και αποδόσεων, μαθαίνοντας σύνθετες μη - γραμμικές σχέσεις που δεν μπορούν να αποτυπωθούν από φυσικά μοντέλα. Μελέτες έχουν δείξει ότι τα μοντέλα ML μπορούν να εκτιμήσουν την εξατμισοδιαπνοή με υψηλή ακρίβεια σε μεσογειακές δενδρώδεις καλλιέργειες υπό ελλειμματική άρδευση (συχνά $R^2 > 0,95$ έναντι της μεθόδου Penman-Monteith), αξιοποιώντας δεδομένα εδαφικής υγρασίας, δεικτών βλάστησης και κλίματος (Pagano et al., 2023).

4.4 Έξυπνα συστήματα διαχείρισης νερού

Τα έξυπνα συστήματα διαχείρισης νερού (Smart Water Management Systems –SWMS) είναι ολοκληρωμένες τεχνολογικές λύσεις που συνδυάζουν αισθητήρες, αυτοματισμό και υπολογιστικές πλατφόρμες για να βελτιστοποιούν την άρδευση (Kamienski et al., 2019). Στόχος τους είναι η εξοικονόμηση νερού, η αύξηση της παραγωγής και η διατήρηση της ποιότητας των προϊόντων, ενώ παράλληλα μειώνονται τα λειτουργικά κόστη. Τα συστήματα αυτά ενσωματώνουν αισθητήρες που μετρούν την υγρασία του εδάφους, τη θερμοκρασία και άλλες περιβαλλοντικές παραμέτρους, καθώς και μετεωρολογικούς σταθμούς που παρέχουν δεδομένα για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής. Βάσει αυτών των δεδομένων, αλγόριθμοι λήψης αποφάσεων (IDSS) προτείνουν κατάλληλες ποσότητες νερού ανά τομέα και περίοδο, ενώ IoT συσκευές εκτελούν αυτόματα τις εντολές ανοίγματος ή κλεισίματος των βαλβίδων άρδευσης.

Ένα σημαντικό παράδειγμα είναι το SWAMP (Smart Water Management Platform), μια ευρωπαϊκή πλατφόρμα που δημιουργήθηκε για τη βελτιστοποίηση της άρδευσης σε διάφορες καλλιέργειες. Το SWAMP χρησιμοποιεί ασύρματες τεχνολογίες (LoRAWAN) και cloud computing για να συγκεντρώνει δεδομένα από πολλαπλούς αισθητήρες στον αγρό και να παράγει συστάσεις άρδευσης σε πραγματικό χρόνο. Σε ελαιώνες υψηλής πυκνότητας φύτευσης, εφαρμόζοντας ρυθμιζόμενη ελλειμματική άρδευση (RDI) με τη βοήθεια τέτοιων συστημάτων, έχει αποδειχθεί ότι είναι δυνατή η εξοικονόμηση 40-60% του νερού χωρίς σημαντική μείωση της απόδοσης. (Fernández et al., 2020)

4.5 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί εφαρμογής

Πλεονεκτήματα:

Η εφαρμογή γεωργίας ακριβείας στην ελαιοκαλλιέργεια παρέχει ένα πλέγμα αλληλένδετων οφελών. Πρωταρχικό πλεονέκτημα αποτελεί η **εξοικονόμηση νερού** - ένα κρίσιμο όφελος δεδομένης της αυξανόμενης υδατικής πίεσης στη Μεσόγειο - σε συνδυασμό με τη **βελτίωση ποιότητας ελαιολάδου** μέσω στρατηγικής ελλειμματικής άρδευσης, βασισμένης σε πραγματικά δεδομένα υδατικής κατάστασης. Η **έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων** (ασθένειες, ελλείψεις θρεπτικών, βλάβες υποδομής) μέσω UAV και αισθητήρων επιτρέπει προληπτική αντίδραση, ενώ η **ιχνηλασιμότητα** - η δυνατότητα τεκμηρίωσης όλων των καλλιεργητικών πράξεων με χωρική και χρονική ακρίβεια - αποτελεί ολοένα αυξανόμενη απαίτηση αγοράς για πιστοποιημένα προϊόντα υψηλής ποιότητας. Αξιοσημείωτο είναι ότι, σε αντίθεση με την επικρατούσα αντίληψη, ακόμη και μικρές μεσογειακές εκμεταλλεύσεις μπορούν να αποκομίσουν οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη από την αξιοποίηση εργαλείων όπως τα UAV και οι δείκτες βλάστησης (NDVI), όταν αυτά εφαρμόζονται στοχευμένα (Loures et al., 2020).

Περιορισμοί:

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η εφαρμογή γεωργίας ακριβείας αντιμετωπίζει πραγματικά εμπόδια. Συστηματικές ανασκοπήσεις για τις μικρές εκμεταλλεύσεις αναγνωρίζουν πέντε κύριους περιοριστικούς παράγοντες: το μικρό μέγεθος του κλήρου, το υψηλό κόστος, τις τεχνικές δυσκολίες, την έλλειψη εξειδικευμένης τεχνικής υποστήριξης και την έλλειψη υποστηρικτικού θεσμικού πλαισίου (Mizik, 2023). Το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, τόσο για τη βασική υποδομή αισθητήρων και αυτοματισμού όσο και για ολοκληρωμένα συστήματα UAV, σε συνδυασμό με την ανάγκη τεχνικής κατάρτισης για τη λειτουργία του εξοπλισμού και την ερμηνεία των δεδομένων, καθιστά την υιοθέτηση ιδιαίτερα απαιτητική για τις μικρές εκμεταλλεύσεις.

Στο ελληνικό πλαίσιο ειδικότερα, έρευνα για τους παράγοντες υιοθέτησης τεχνολογιών άρδευσης ακριβείας σε ελαιώνες στη Μεσσηνία ανέδειξε ότι η πρόθεση υιοθέτησης διαμορφώνεται κυρίως από την αντιλαμβανόμενη χρησιμότητα και τα αναμενόμενα οικονομικά οφέλη, αλλά και από τον αντιλαμβανόμενο έλεγχο, τη συμβατότητα με τις υπάρχουσες πρακτικές και την αποστροφή στον κίνδυνο. Δεδομένου του εξαιρετικά κατακερματισμένου κλήρου της ελληνικής ελαιοκαλλιέργειας (μέσο μέγεθος εκμετάλλευσης συχνά < 5 ha), η αβεβαιότητα ως προς την απόδοση της επένδυσης παραμένει σημαντικό αντικίνητρο, το οποίο όμως μπορεί να αμβλυνθεί μέσω συλλογικών σχημάτων, στοχευμένης κατάρτισης και υποστηρικτικών πολιτικών (Kakkavou et al., 2024).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΛΑΙΟΛΑΔΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

5.1 Συσχέτιση άρδευσης και ποιοτικών χαρακτηριστικών υπό το πρίσμα της γεωργίας ακριβείας

Η σχέση μεταξύ άρδευσης και ποιότητας ελαιολάδου, όπως αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 3, είναι σύνθετη, πολυπαραγοντική και εξαρτώμενη από τη χωρική και χρονική κλίμακα στην οποία εξετάζεται. Η κλασική προσέγγιση της αγρονομικής έρευνας - σύγκριση μέσω τιμών παραμέτρων ποιότητας και μεταξύ επεμβάσεων άρδευσης σε επίπεδο πειραματικού αγρού - παρέχει χρήσιμες ενδείξεις, αλλά αδυνατεί να αποτυπώσει την εσωτερική μεταβλητότητα εντός του ελαιώνα που αποτελεί την ουσία του προβλήματος στην πρακτική εφαρμογή.

Η γεωργία ακριβείας εισάγει μια ριζικά διαφορετική προοπτική: αντί να αντιμετωπίζει τον ελαιώνα ως ομοιογενή μονάδα που λαμβάνει ενιαία αρδευτική επέμβαση, τον αντιμετωπίζει ως **σύστημα χωρικά διαφοροποιημένων μονάδων** - δέντρων ή ζωνών - που παρουσιάζουν διαφορετική υδατική κατάσταση, διαφορετικές ανάγκες και διαφορετικές αποκρίσεις στην άρδευση. Αυτή η χωρική διαφοροποίηση έχει άμεσες συνέπειες στην ποιότητα: το ελαιόλαδο παραγόμενο από δέντρα διαφορετικής υδατικής κατάστασης εντός του ίδιου ελαιώνα παρουσιάζει σημαντική ποιοτική ετερογένεια που χάνεται στην ενιαία συγκομιδή και έκθλιψη (Agam et al., 2013).

Ερευνητικά δεδομένα υποστηρίζουν ότι η **χωρική μεταβλητότητα υδατικής κατάστασης** εντός ενός τυπικού ελαιώνα μπορεί να είναι εξαιρετικά σημαντική: μετρήσεις Ψ_{stem} σε παρακείμενα δέντρα (απόσταση < 20m) σε μη αρδευόμενους ελαιώνες έδειξαν διαφορές έως 0,4-0,8 MPa, αντιστοιχώντας σε σημαντικά διαφορετικές συγκεντρώσεις φαινολικών ενώσεων στον παραγόμενο καρπό (Fernández, 2014). Αυτή η παρατήρηση υπογραμμίζει τη σημασία της χωρικά διαφοροποιημένης άρδευσης την οποία μόνο η γεωργία ακριβείας μπορεί να προσφέρει.

Επιπλέον, η **χρονική διάσταση** της σχέσης άρδευσης-ποιότητας αποκτά νέο νόημα υπό το πρίσμα της γεωργίας ακριβείας. Η ικανότητα παρακολούθησης της υδατικής κατάστασης σε πραγματικό χρόνο - μέσω αισθητήρων, εδαφικής υγρασίας, δενδρομέτρων ή UAV θερμικής τηλεπισκόπησης - επιτρέπει τη λεπτομερή αντιστοίχιση υδατικής κατάστασης με το τρέχον φαινολογικό στάδιο και την άμεση προσαρμογή της αρδευτικής στρατηγικής. Η προσέγγιση αυτή υπερβαίνει τα παραδοσιακά, ημερολογιακά χρονοδιαγράμματα άρδευσης, αντικαθιστώντας τα με αποφάσεις που βασίζονται στις πραγματικές, τρέχουσες ανάγκες της καλλιέργειας (Gu et al., 2020).

5.2 Βελτιστοποίηση άρδευσης μέσω αισθητήρων: μηχανισμοί και αποτελέσματα

5.2.1 Αισθητηριοκατευθυνόμενη ελλειμματική άρδευση και φαινολικό προφίλ

Η στρατηγική αξιοποίηση αισθητήρων υδατικής κατάστασης για την εφαρμογή ελεγχόμενης ελλειμματικής άρδευσης σε κρίσιμα φαινολογικά στάδια αποτελεί την πλέον τεκμηριωμένη εφαρμογή γεωργίας ακριβείας για βελτίωση ποιότητας ελαιολάδου. Η θεμελιώδης λογική είναι απλή: χρήση αισθητήρων για την επίτευξη και διατήρηση του επιπέδου υδατικού στρες σε βαθμό τέτοιο που να βελτιστοποιεί το φαινολικό προφίλ, χωρίς να φτάσει σε επίπεδο που να βλάπτει την παραγωγή.

Οι **Fernández et al. (2013)** σχεδίασαν και δοκίμασαν για τρία έτη μια στρατηγική ρυθμιζόμενης ελλειμματικής άρδευσης (RDI) σε ελαιώνα υψηλής πυκνότητας φύτευσης, ποικιλίας Arbequina (1.667 δέντρα/ha) στη Σεβίλλη της Ισπανίας, με στόχο τη βιώσιμη ισορροπία μεταξύ εξοικονόμησης νερού, ελέγχου της βλάστησης και παραγωγής λαδιού. Εφαρμόστηκαν δύο επίπεδα ελλειμματικής άρδευσης (60RDI και 30RDI, αντιστοιχούνται σε 60% και 30% των αρδευτικών αναγκών) σε σύγκριση με μάρτυρα πλήρους άρδευσης (FI). Το σύστημα στηρίχθηκε στην παρακολούθηση της υδατικής κατάστασης των δέντρων μέσω μετρήσεων ροής χυμού και διαμέτρου κορμού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μεταχείριση 30RDI πέτυχε την καλύτερη ισορροπία: με ετήσια αρδευτική ποσότητα 1.366 m³/ha, δηλαδή 72% εξοικονόμηση νερού σε σχέση με την πλήρη άρδευση, η μείωση της παραγωγής λαδιού περιορίστηκε σε μόλις 26%.

Οι **García-Garvía et al. (2022)** μελέτησαν τις επιπτώσεις στρατηγικών ρυθμιζόμενης (RDI) και σταθερής ελλειμματικής άρδευσης (SDI) στην ποιότητα έξτρα παρθένου ελαιολάδου Arbequina σε ελαιώνες υπερυψηλής πυκνότητας. Το επίπεδο υδατικού στρες παρακολούθηθηκε μέσω μετρήσεων του Ψstem και ολοκληρώματος στρες (stress integral). Οι μεταχειρίσεις περιλάμβαναν μια “βέλτιστη RDI” με μείωση νερού 37-54% περιορισμένη στη φάση σκλήρυνσης του πυρήνα, καθώς και αυστηρότερες μεταχειρίσεις με μείωση έως 72%. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μείωση του νερού δεν είχε αρνητικές επιπτώσεις στις βασικές ποιοτικές παραμέτρους του ελαιολάδου, ενώ η ολική φαινολική περιεκτικότητα (TPC) αυξήθηκε υπό συνθήκες ελλειμματικής άρδευσης. Η μελέτη επιβεβαίωσε επίσης ισχυρή αρνητική συσχέτιση μεταξύ του ολοκληρώματος στρες και του Ψstem, υποδεικνύοντας ότι η παρακολούθηση της υδατικής κατάστασης μέσω αισθητήρων επιτρέπει την ελεγχόμενη ενίσχυση του φαινολικού προφίλ.

Στο ελληνικό πλαίσιο, ενδεικτική είναι η μελέτη των Petridis et al., (2012), οι οποίοι διερεύνησαν την επίδραση του υδατικού ελλείμματος στην φαινολική σύσταση των φύλλων τεσσάρων ελληνικών ποικιλιών (Γαϊδουρελιά, Καλαμών, Κορωνέικη και Μεγαρίτικη). Μονοετή, αυτόριζα φυτά υποβλήθηκαν επί δύο μήνες σε τρεις μεταχειρίσεις άρδευσης, αντίστοιχες προς το 100% (μάρτυρας), το 66% και το 33% της υδατοϊκανότητας του εδάφους. Οι ερευνητές κατέγραψαν ότι το υδατικό στρες προκάλεσε συσσώρευση φαινολικών ενώσεων, και ιδίως ελευρωπαΐνης: τα ολικά φαινολικά αυξήθηκαν στη δριμύτερη μεταχείριση (33% υδατοϊκανότητας), όπου η ελευρωπαΐνη παρουσίασε τη μεγαλύτερη αύξηση, ενώ η αντιοξειδωτική δράση ενισχύθηκε σε όλες τις ποικιλίες. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μελέτη αφορά τη φυσιολογία των φύλλων (και όχι άμεσα τη σύσταση του ελαιολάδου) και ότι, μεταξύ των τεσσάρων ποικιλιών, η Γαϊδουρελιά και όχι η Κορωνέικη αναδείχθηκε ως η πλέον ανθεκτική στην ξηρασία.

Παρότι τα ευρήματα αυτά αναφέρονται σε επίπεδο φύλλων, τεκμηριώνουν τον υποκείμενο φυσιολογικό μηχανισμό, την επαγωγή βιοσύνθεσης ελευρωπαΐνης και συναφών φαινολικών υπό υδατικό έλλειμμα, ο οποίος αποτελεί τη βάση για τη βελτίωση του φαινολικού προφίλ μέσω ελεγχόμενης αισθητηριοκατευθυνόμενης ελλειμματικής άρδευσης (RDI). Συνολικά, η αξιοποίηση αισθητήρων υδατικής κατάστασης για την εφαρμογή RDI σε κρίσιμα φαινολογικά στάδια μπορεί να επιτύχει έναν ισορροπημένο συνδυασμό εξοικονόμησης νερού, ποιότητας και παραγωγής.

5.2.2 Βελτιστοποίηση χρονισμού άρδευσης μέσω φαινολογικής παρακολούθησης

Ένα βασικό στοιχείο που αναδεικνύεται από τη βιβλιογραφία είναι ότι η **χρονική ακρίβεια** εφαρμογής ελλειμματικής άρδευσης - το πότε ακριβώς επιτρέπεται το στρες - είναι εξίσου σημαντική με το επίπεδο ελλείμματος. Αισθητήρες που παρακολουθούν συνεχώς την υδατική κατάσταση επιτρέπουν τη λεπτομερή αντιστοίχιση με φαινολογικά στάδια, κάτι που είναι σχεδόν αδύνατο με ημερολογιακά προγράμματα. Χαρακτηριστική είναι η μελέτη των **Gucci et al. (2019)**, οι οποίοι συνέκριναν, σε ελαιώνα υψηλής πυκνότητας επί δύο έτη, την εφαρμογή ρυθμιζόμενης ελλειμματικής άρδευσης (RDI) σε δύο διαφορετικά φαινολογικά στάδια ανάπτυξης του καρπού, σε σχέση με πλήρως αρδευόμενα δέντρα (FI). Στη πρώτη μεταχείριση (RDI 1) το υδατικό στρες επιβλήθηκε πριν από τη σκλήρυνση του πυρήνα, ενώ στη δεύτερη (RDI 2) μετά την ενδοκαρπική σκλήρυνση, κατά την αρχική φάση συσσώρευσης ελαίου. Τα πλήρως αρδευόμενα δέντρα έλαβαν 2.277 και 1.648 m³/ha το 2012 και 2013 αντίστοιχα, ενώ οι ελλειμματικές μεταχειρίσεις έλαβαν σημαντικά μικρότερες ποσότητες. Οι αποδόσεις καρπού των RDI 1 και RDI 2 ήταν 70% και 81% των πλήρως αρδευόμενων δέντρων αντίστοιχα (μέσος όρος των δύο ετών), με παρόμοια όμως αποδοτικότητα ανά μονάδα. Το πλέον σημαντικό εύρημα, ως προς την ποιότητα, ήταν ότι η φαινολική συγκέντρωση στους καρπούς της μεταχείρισης RDI 1 - δηλαδή όταν το στρες εφαρμόστηκε πριν τη σκλήρυνση του πυρήνα - ήταν υψηλότερη από εκείνη όλων των άλλων μεταχειρίσεων. Το εύρημα αυτό καταδεικνύει ότι δεν αρκεί η εφαρμογή ελλειμματικής άρδευσης αυτή καθαυτή, καθοριστική σημασία έχει το φαινολογικό στάδιο κατά το οποίο επιβάλλεται το στρες. Η ακριβής αντιστοίχιση του χρονισμού της άρδευσης με τα φαινολογικά στάδια, καθίσταται δυνατή μέσω συνεχούς παρακολούθησης της υδατικής κατάστασης με αισθητήρες και επιτρέπει έτσι τη στοχευμένη “σχεδίαση” του φαινολικού προφίλ του ελαιολάδου μέσω ελεγχόμενης άρδευσης.

5.3 Χρήση δορυφορικών δεδομένων και drones για παρακολούθηση καλλιέργειας και ποιοτική διαχείριση

5.3.1 Χαρτογράφηση χωρικής μεταβλητότητας υδατικού στρες

Η χρήση UAV εφοδιασμένων με θερμικές κάμερες για χαρτογράφηση υδατικού στρες σε ελαιώνες αποτελεί μια από τις πλέον αξιόπιστες εφαρμογές γεωργίας ακριβείας. Οι **Zarco-Tejada et al. (2012)** - σε σειρά πρωτοποριακών μελετών με πολυφασματικά και θερμικά UAV σε ελαιώνες της Νότιας Ισπανίας - απέδειξαν ότι ο δείκτης CWSI (Crop Water Stress Index) υπολογιζόμενος από θερμικές εικόνες UAV συσχετίζεται με το υδατικό δυναμικό βλαστού (Ψ_{stem}). Έτσι, η μέθοδος επιτρέπει την ανίχνευση και χαρτογράφηση της υδατικής κατάστασης μεμονωμένων δέντρων σε επίπεδο ολόκληρου ελαιώνα, με υψηλή χωρική ανάλυση και σε σύντομο χρόνο. Σε αντίστοιχη μελέτη ειδικά για ελαιώνες υπερυψηλής πυκνότητας φύτευσης, οι **Egea et al., (2017)** επιβεβαίωσαν ότι

ο CWSI που προκύπτει από εναέρια θερμική απεικόνιση μέσω μη επανδρωμένου αεροσκάφους είναι ευαίσθητος στις μεταβολές της υδατικής κατάστασης των δέντρων, αναδεικνύοντας τον χαρακτηρισμό της χωρο-χρονικής μεταβλητότητας ως προϋπόθεση για την ακριβή διαχείριση της άρδευσης.

Κρίσιμης σημασίας εύρημα ήταν ότι η χωρική κατανομή του CWSI εντός ελαιώνων παρουσίαζε σημαντική ετερογένεια: σε έναν τυπικό εντατικό ελαιώνα 5 ha, η διαφορά μεταξύ μεγίστων και ελαχίστων τιμών CWSI αντιστοιχούσε σε διαφορά $\Psi_{stem} = 0,6-1,2$ MPa - δηλαδή σε σημαντική διαφορά υδατικής κατάστασης μεταξύ παρακείμενων δέντρων. Αυτή η χωρική ετερογένεια δικαιολογεί πλήρως τη χωρικά διαφοροποιημένη άρδευση, καθώς η εφαρμογή ενιαίου αρδευτικού προγράμματος σε τέτοιο ελαιώνα σημαίνει ότι ορισμένα δέντρα θα υπεραρδεύονται (με αρνητικές ποιοτικές συνέπειες) ενώ άλλα θα υποαρδεύονται (Zarco-Tejada et al., 2012).

Σε ανάλογη κατεύθυνση, ολοκληρωμένα συστήματα παρακολούθησης που συνδυάζουν περιοδικές πτήσεις UAV (θερμική και πολυφασματική κάμερα) με δίκτυο αισθητήρων εδαφικής υγρασίας και μετεωρολογικό σταθμό έχουν αξιοποιήσει τον CWSI για τη χαρτογράφηση ζωνών άρδευσης και τη ρύθμιση των αρδευτικών δόσεων ανά ζώνη. Η ζωνική άρδευση βάσει UAV-CWSI έχει αναφερθεί ότι οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση νερού συγκριτικά με την ενιαία άρδευση, βελτιώνοντας παράλληλα την ομοιομορφία των ποιοτικών χαρακτηριστικών μεταξύ των ζωνών (González-Dugo et al., 2013).

5.3.2 Δορυφορική τηλεπισκόπηση και διαχρονική παρακολούθηση

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση, ιδίως με δεδομένα Sentinel-2, παρέχει τη δυνατότητα διαχρονικής παρακολούθησης της υδατικής κατάστασης ελαιώνων σε ποικιλία χρονικών κλιμακών, από εβδομαδιαία έως εποχιακή. Ο υπολογισμός δεικτών βλάστησης και υγρασίας, όπως δείκτης βλάστησης (NDVI), ο δείκτης υγρασίας (NDMI) και ο δείκτης βλάστησης προσαρμοσμένης στο έδαφος (SAVI), επιτρέπει την παρακολούθηση της φαινολογικής εξέλιξης και την ανίχνευση αποκλίσεων από την κανονική ανάπτυξη, που μπορεί να υποδηλώνουν υδατικό στρες ή άλλα προβλήματα.

Οι **Crespo et al., (2025)**, σε μελέτη σε δύο παραδοσιακές περιοχές ελαιοκαλλιέργειας της Ιβηρικής Χερσονήσου (Πορτογαλία και Ισπανία) αξιοποίησαν δορυφορικούς δείκτες από το πρόγραμμα Harmonized Landsat Sentinel-2, όπως τον δείκτη υγρασίας NDMI και τον SAVI, για την αξιολόγηση της επίδρασης περιόδων ξηρασίας στους ελαιώνες κατά το διάστημα 2015-2023. Η μελέτη ανέδειξε ότι η εποχιακή μεταβλητότητα της βλάστησης συνδέεται στενά με τη δριμύτητα της ξηρασίας, με τις αποκρίσεις δεικτών να εμφανίζουν χρονική υστέρηση - ισχυρότερη ως προς το προηγούμενο δίμηνο - σε σχέση με τις συνθήκες ξηρασίας. Τόσο ο SAVI όσο και ο NDMI κατέγραψαν μειώσεις της ευρωστίας της βλάστησης κατά τις ξηρές περιόδους, ιδίως τα έτη 2017 και 2022. Το εύρημα αυτό, αν και χρήσιμο για την ανίχνευση μακροπρόθεσμων τάσεων, υπογραμμίζει την ανάγκη συνδυασμού των δορυφορικών δεδομένων με επίγειους αισθητήρες για έγκαιρη παρέμβαση σε πραγματικό χρόνο.

Η σύντηξη δεδομένων από πολλαπλές πηγές (δορυφόρους, UAV, αισθητήρες εδάφους) αντιπροσωπεύει την πιο ολοκληρωμένη και αξιόπιστη προσέγγιση. Όπως αναδεικνύεται από τη συστηματική ανασκόπηση των **Alexopoulos et al., (2023)**, η συμπληρωματική αξιοποίηση επίγειων αισθητήρων IoT, UAV και δορυφορικής τηλεπισκόπησης, σε συνδυασμό με τη σύντηξη και ανάλυση δεδομένων, αποτελεί τη βάση για τη μετάβαση σε μια πιο αποδοτική και βιώσιμη γεωργία. Μια πρακτική στρατηγική περιλαμβάνει: (α) συχνή (ημερήσια) παρακολούθηση των αισθητήρων εδάφους για τον άμεσο έλεγχο της

άρδευσης, (β) εβδομαδιαία έως δεκαπενθήμερη χαρτογράφηση με UAV για την ανίχνευση της χωρικής ετερογένειας και τη ρύθμιση ζωνών, και (γ) μηνιαία ή διμηνιαία αξιολόγηση δορυφορικών δεικτών για την ανίχνευση μακροπρόθεσμων τάσεων και για την επαλήθευση των ζωνών διαχείρισης.

5.4 Μελέτες περίπτωσης εφαρμογής γεωργίας ακριβείας σε ελαιώνες

5.4.1 Μελέτη περίπτωσης I - Ελαιώνας Νότιας Ισπανίας.

Σε πείραμα ρυθμιζόμενης ελλειμματικής άρδευσης (RDI) σε υπέρπυκνο ελαιώνα ποικιλίας Arbequina, η **Gómez-del-Campo (2013)**, αξιολόγησε στρατηγικές που εφαρμόζουν υδατικό στρες σε επιλεγμένα φαινολογικά στάδια κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, την περίοδο που η ελιά είναι περισσότερο ανθεκτική στην ξηρασία. Συγκρίθηκαν τέσσερις μεταχειρίσεις: ένας μάρτυρας πλήρους άρδευσης (CON) και τρεις ελλειμματικές, οι οποίες διέφεραν ως προς το φαινολογικό στάδιο εφαρμογής και στην ένταση του στρες - άρδευση με 30% του μάρτυρα από το τέλος της καρπόδεσης μέχρι έως τέλος Ιουλίου (DI-J), άρδευση με 30% του μάρτυρα από το τέλος Ιουλίου έως την έναρξη της ελαιοσύνθεσης (DI-A) και ηπιότερο στρες με 50% του μάρτυρα κατά τους μήνες Ιούλιο-Αύγουστο (DI-JA).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο χρόνος εφαρμογής του στρες ήταν καθοριστικός για το τελικό ισοζύγιο νερού-παραγωγής. Η μεταχείριση DI-JA εξοικονόμησε το μεγαλύτερο ποσοστό νερού (27%), με σχετικά περιορισμένη μείωση της παραγωγής ελαίου (15%). Αντίθετα, η μεγαλύτερη απώλεια παραγωγής ελαίου (21%), παρατηρήθηκε στη μεταχείριση DI-A, με εξοικονόμηση νερού 22%. Η αποτελεσματικότερη στρατηγική αναδείχθηκε η DI-J: με 16% λιγότερο εφαρμοζόμενο νερό σε σχέση με τον μάρτυρα, η παραγωγή ελαίου δεν μειώθηκε σημαντικά, ενώ το ποσοστό λαδιού στον καρπό ήταν υψηλότερο.

Το εύρημα αυτό καταδεικνύει ότι, σε συνθήκες περιορισμένων υδατικών πόρων, δεν αρκεί απλώς η μείωση της άρδευσης. Σημαντικό ρόλο παίζει το φαινολογικό στάδιο κατά το οποίο επιβάλλεται το στρες. Η κατάλληλη επιλογή χρονισμού επιτρέπει τη διατήρηση του μεγαλύτερου μέρους της παραγωγής με δραστικά μειωμένη κατανάλωση νερού, αναδεικνύοντας τη σημασία της ακριβούς, φαινολογικά καθοδηγούμενης διαχείρισης της άρδευσης.

5.4.2 Μελέτη περίπτωσης II - Ελαιώνας Κρήτης.

Σε πειραματικό ελαιώνα ποικιλίας Κορωνέικης σε 50ετή δέντρα στα Χανιά της Κρήτης, οι **Psarras et al., (2011)**, μελέτησαν τέσσερις μεταχειρίσεις άρδευσης: πλήρη άρδευση (FI), ελλειμματική άρδευση στο 70% της ETc (D170, ελλειμματική στο 40% της ETc (D140) και ξερική καλλιέργεια (RF), με εποχιακές ποσότητες άρδευσης 272, 189 και 108 mm αντίστοιχα (Μάιος-Σεπτέμβριος). Η παραγωγή καρπού μειώθηκε κατά 16,6% στη μεταχείριση D140 και κατά 32% στην ξερική (RF), ενώ μεταξύ D170 και πλήρους άρδευσης δεν παρατηρήθηκε διαφοροποίηση. Οι ποιοτικές παράμετροι του ελαιολάδου (οξύτητα, αριθμός υπεροξειδίων, αντοχή στην οξείδωση) δεν επηρεάστηκαν σημαντικά, με εξαίρεση τα ολικά φαινολικά, τα οποία ήταν χαμηλότερα στο λάδι των πλήρως αρδευόμενων δέντρων. Οι ερευνητές κατέληξαν ότι το καθεστώς D170 διατηρεί παραγωγή και φυσιολογία αντίστοιχες της πλήρους άρδευσης, υπερτερώντας σαφώς των

εντονότερων ελλειμματικών μεταχειρίσεων (D140 και RF). Το εύρημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τις συνθήκες της Κρήτης, καθώς υποδεικνύει ότι μια μέτρια ελλειμματική άρδευση μπορεί να εξοικονομήσει νερό χωρίς απώλεια παραγωγής, ενισχύοντας ταυτόχρονα το φαινολικό προφίλ του ελαιολάδου.

5.4.3 Μελέτη περίπτωσης ΙΙΙ - Ελαιώνας Χιλής.

Σε ένα από τα πλέον σαφή πειράματα ελέγχου της ποιότητας μέσω αισθητήρων, οι Ahumada-Orellana et al. (2018) αξιολόγησαν, επί τέσσερα έτη, υπέρπυκνο ελαιώνα ποικιλίας Arbequina στην κοιλάδα Pencahue (Maule, Χιλή), εφαρμόζοντας στρατηγικές ελλειμματικής άρδευσης με βάση τα κατώφλια υδατικού δυναμικού στελέχους (Ψstem). Στον μάρτυρα (T1) το Ψstem διατηρούνταν μεταξύ -1,4 και -2,2 MPa (πλήρης άρδευση, 100% της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής), ενώ στις μεταχειρίσεις T2, T3 και T4 η άρδευση διακοπτόταν από την καρπόδεση έως ότου το Ψstem έφθανε περίπου -3,5, -5,0 και -6,0 MPa αντίστοιχα και στη συνέχεια μόλις επιτυγχανόταν το κατώφλι, η άρδευση αποκαθίστατο στα επίπεδα του μάρτυρα μέχρι τη συγκομιδή.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η περιεκτικότητα του καρπού σε λάδι και νερό κατά τη συγκομιδή, καθώς και η ελεύθερη οξύτητα, δεν επηρεάστηκαν σημαντικά από τις μεταχειρίσεις, ενώ ο αριθμός υπεροξειδίων και οι συντελεστές απορρόφησης παρουσίασαν μόνο μικρές διαφορές, εντός των ορίων του εξαιρετικού παρθένου ελαιολάδου. Αντίθετα, οι ολικές πολυφαινόλες κατά τη συγκομιδή ήταν σαφώς υψηλότερες στις μεταχειρίσεις υδατικού ελλείμματος, παρουσιάζοντας μάλιστα στατιστικά σημαντική γραμμική σχέση με το ολοκλήρωμα υδατικού στρες κάθε έτους (water stress signal). Το προφίλ των κύριων λιπαρών οξέων δεν μεταβλήθηκε από τις μεταχειρίσεις (διέφερε όμως μεταξύ ετών), ενώ οι οργανοληπτικές δοκιμές έδειξαν ότι το υψηλότερο φαινολικό περιεχόμενο συνέβαλε σε εντονότερα χαρακτηριστικά πικρού και πικάντικου.

Οι συγγραφείς καταλήγουν ότι οι στρατηγικές ελλειμματικής άρδευσης βάσει κατωφλίων Ψstem αποτελούν εξαιρετικό εργαλείο διαχείρισης, που μπορεί ταυτόχρονα να βελτιώσει την ποιότητα ελαιολάδου και να μειώσει την χρήση νερού σε υπέρπυκνους ελαιώνες (Ahumada-Orellana et al., 2018). Το παράδειγμα αυτό, καταδεικνύει με ιδιαίτερη σαφήνεια τη δυνατότητα της αισθητηριοκατευθυνόμενης άρδευσης να “σχεδιάζει” ποιοτικά χαρακτηριστικά, αξιοποιώντας το Ψstem ως εργαλείο ελέγχου.

Συνολικά και οι τρεις μελέτες περίπτωσης - παρά τις όποιες διαφορές σε ποικιλία, σύστημα καλλιέργειας και κλίμα - συγκλίνουν στο ίδιο συμπέρασμα: η ελεγχόμενη, αισθητηριοκατευθυνόμενη ελλειμματική άρδευση επιτρέπει σημαντική εξοικονόμηση νερού και υπό τις κατάλληλες συνθήκες, ενίσχυση του φαινολικού προφίλ, με αποδεκτές επιπτώσεις στην παραγωγή. Ταυτόχρονα, υπογραμμίζουν ότι η σχέση στρες-ποιότητας δεν είναι μονότονη: πέρα από ένα όριο, το υπερβολικό στρες υποβαθμίζει ορισμένες παραμέτρους, γεγονός που καθιστά την ακρίβεια της γεωργίας ακριβείας αναγκαία.

5.5 Σύγκριση παραδοσιακής και ευφυούς άρδευσης (ποσοτική αξιολόγηση)

Η συγκριτική αξιολόγηση της παραδοσιακής και της ευφυούς αισθητηριοκατευθυνόμενης άρδευσης μπορεί να στηριχθεί σε δημοσιευμένα πειραματικά δεδομένα, τόσο για τα τυπικά επίπεδα παραγωγής των ελαιώνων όσο και για τις μελέτες περίπτωσης της

ενότητας 5.4. Ως προς τα γενικά επίπεδα παραγωγής, υπάρχει σαφής διαφοροποίηση ανά σύστημα καλλιέργειας και καθεστώς άρδευσης: σε μακροχρόνια (14ετη) αξιολόγηση υπέρπυκνων αρδευόμενων ελαιώνων, η μέση ετήσια παραγωγή ελαιολάδου ανήλθε περίπου σε 2,3 t/ha, με τη παραγωγή ελαιόκαρπου να αυξάνεται γραμμικά με την πυκνότητα φύτευσης - από 16,1 t/ha για τις χαμηλότερες πυκνότητες (780 δέντρα/ha) έως 29,9 t/ha για τις υψηλότερες (2.254 δέντρα/ha) (Connor et al., 2014). Παράλληλα, σε επίπεδο ελαιόκαρπου, οι αρδευόμενοι ελαιώνες αποδίδουν τυπικά περίπου 10 t/ha έναντι 6 t/ha των ξερικών, διαφορά που αποτυπώνει τόσο τον ρόλο της άρδευσης όσο και της έντασης της καλλιέργειας (Freixa et al., 2011).

Ο ακόλουθος πίνακας συνοψίζει τις τάσεις που τεκμηριώνονται από τις τρεις μελέτες περίπτωσης της ενότητας 5.4, οι τιμές προέρχονται απευθείας από αντίστοιχες δημοσιεύσεις και αφορούν τη μετάβαση από την πλήρη άρδευση σε στρατηγικές ελεγχόμενης ελλειμματικής άρδευσης:

Παράμετρος	Αποτέλεσμα (ελλειμματικής vs πλήρης άρδευσης)	Πηγή
Εξοικονόμηση νερού (DI-JA)	27% λιγότερο νερό	Gómez-del-Campo 2013
Μείωση παραγωγής ελαίου (DI-JA)	15%	Gómez-del-Campo 2013
Βέλτιστη στρατηγική (DI-J)	16% λιγότερο νερό, χωρίς σημαντική πτώση ελαίου	Gómez-del-Campo 2013
Παραγωγή καρπού: D170 vs πλήρης	Καμία σημαντική διαφορά	Psarras et al., 2011
Παραγωγή καρπού: D140 / ξερικό (RF)	-16,6% / -32%	Psarras et al., 2011
Ολικά φαινολικά υπό έλλειμμα	Υψηλότερα έναντι πλήρους άρδευσης	Psarras et al., 2011, Ahumada-Orellana et al., 2018
Οξύτητα / αριθμός υπεροξειδίων	Χωρίς σημαντική μεταβολή (εντός ορίων EVOO)	Psarras et al., 2011, Ahumada-Orellana et al., 2018

Πίνακας 1 : Σύνοψη τάσεων των τριών μελετών περίπτωσης της ενότητας 5.4

Από τα παραπάνω προκύπτει μια συνεκτική εικόνα. Πρώτον, η ελεγχόμενη ελλειμματική άρδευση μπορεί να επιτύχει πολύ μεγάλη εξοικονόμηση νερού: στο ισπανικό υπέρπυκνο σύστημα, η στρατηγική 30RDI μείωσε τη χρήση νερού κατά περίπου 27% με αντίστοιχη μείωση παραγωγής ελαίου μόλις 15%, ενώ η στρατηγική DI-J πέτυχε εξοικονόμηση 16% χωρίς ουσιαστική απώλεια παραγωγής - αναδεικνύοντας τον κρίσιμο ρόλο του χρονισμού στρες (Gómez - del-Campo 2013).

Δεύτερον, υπάρχει ένα “παράθυρο” μέτριου ελλείμματος όπου η παραγωγή ουσιαστικά διατηρείται: στην Κρήτη, η μεταχείριση 70% της ETc (D170) δεν διέφερε από την πλήρη

άρδευση ως προς την παραγωγή, ενώ μόνο τα εντονότερα ελλείμματα (40% ETc και ξερική) προκάλεσαν μειώσεις 16,6% και 32% αντίστοιχα (Psarras et al., 2011).

Τρίτον, και κρίσιμότερο για την ποιότητα, σε όλες τις μελέτες η μείωση της άρδευσης συνοδεύεται από αύξηση των ολικών φαινολικών, χωρίς υποβάθμιση των παραμέτρων ποιότητας (οξύτητα, υπεροξειδία), οι οποίες παραμένουν εντός ορίων του εξαιρετικού παρθένου ελαιολάδου (Psarras et al., 2011, Ahumada-Orellana et al., 2018).

Συνεπώς, η ευφυής, αισθητηριοκατευθυνόμενη άρδευση επιτρέπει τη στόχευση ενός σημείου λειτουργίας που συνδυάζει σημαντική εξοικονόμηση νερού, διατήρηση της παραγωγής σε αποδεκτά επίπεδα και ενίσχυση του φαινολικού προφίλ. Στο πλαίσιο της αγοράς premium εξαιρετικού παρθένου ελαιολάδου, η όποια μικρή απώλεια παραγωγής, αντισταθμίζεται και συχνά υπεραντισταθμίζεται από την υψηλότερη αξία του ελαιολάδου με υψηλό φαινολικό περιεχόμενο και θετικά οργανοληπτικά χαρακτηριστικά.

5.6. Περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις

Η αξιολόγηση της ευφυούς διαχείρισης άρδευσης δεν εξαντλείται στη σύγκριση αγρονομικών αποτελεσμάτων. Οι επιπτώσεις εκτείνονται στο ευρύτερο περιβαλλοντικό και οικονομικό πλαίσιο: από το υδατικό αποτύπωμα και τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, μέχρι την κερδοφορία της εκμετάλλευσης και τη δημιουργία κινήτρων για επένδυση στην τεχνολογία. Η ενότητα αυτή παρουσιάζει αναλυτικά τις επιπτώσεις και στις δύο διαστάσεις αξιοποιώντας δεδομένα από τις αναλύσεις κύκλου ζωής (LCA) και οικονομικές μελέτες που αφορούν ειδικά ελαιοκαλλιεργητικά συστήματα.

5.6.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

A. Υδατικό αποτύπωμα και κατανάλωση υδατικών πόρων

Η πλέον άμεση περιβαλλοντική επίπτωση της ευφυούς άρδευσης είναι η μείωση της κατανάλωσης γλυκού νερού. Σε ένα από τα πιο υδατοεντατικά αγροτικά συστήματα της Μεσογείου, η εξοικονόμηση αρδευτικού νερού μεταφράζεται σε σημαντική ελάφρυνση των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων και των επιφανειακών υδάτινων πόρων, ιδίως σε περιοχές όπου η άντληση ήδη υπερβαίνει τα βιώσιμα επίπεδα αναπλήρωσης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της πίεσης αυτής αποτελεί η κύρια ελαιοπαραγωγική περιοχή της Ισπανίας (Ανδαλουσία), όπου η κατανάλωση υπόγειων υδάτων αυξήθηκε από 98 σε 378 εκατομμύρια m³ μεταξύ 1997 και 2008, θέτοντας ερωτήματα για τη βιωσιμότητα των αρδευόμενων ελαιώνων (Salmoral et al., 2011).

Η σημασία της διαχείρισης του νερού αναδεικνύεται και από τη σύσταση του υδατικού αποτυπώματος: στους αρδευόμενους ελαιώνες, το “γαλάζιο” νερό (επιφανειακό και υπόγειο) αποκτά καθοριστικό ρόλο, σε αντίθεση με τους ξερικούς όπου κυριαρχεί το “πράσινο” νερό της βροχόπτωσης, το οποίο αντιστοιχεί σε περίπου 71% του συνολικού αποτυπώματος (Salmoral et al., 2011). Συνεπώς, η ορθολογική διαχείριση της άρδευσης μέσω συστημάτων ακριβείας επιδρά ακριβώς στο πιο πιεστικό, από περιβαλλοντική άποψη, συστατικό. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) ελαιοκαλλιεργειών στην Ελλάδα επιβεβαιώνει τη βαρύτητα αυτή: σε μελέτη ελαιώνων στον κάμπο της Άρτας (Ηπείρος), η διαχείριση της άρδευσης βάσει συστήματος υποστήριξης αποφάσεων (DSS) μείωσε την κατανάλωση νερού και ενέργειας κατά 42,1% σε σχέση με τις συμβατικές πρακτικές, γεγονός που μεταφράστηκε σε μείωση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος κατά 5,3% ανά τόνο προϊόντος και 10,4% ανά εκτάριο καλλιεργούμενης γης (Fotia et al., 2021).

Β. Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου

Η σχέση μεταξύ ευφυούς άρδευσης και εκπομπών αερίων θερμοκηπίου είναι πολυδιάστατη. Από τη μία, η μειωμένη άντληση νερού μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση και τις αντίστοιχες εκπομπές CO₂. Από την άλλη, η ακριβέστερη εφαρμογή λιπασμάτων - που συνοδεύει συχνά τα ολοκληρωμένα συστήματα γεωργίας ακριβείας - μειώνει τις εκπομπές N₂O, ένα αέριο θερμοκηπίου με δυναμικό υπερθέρμανσης 265 φορές ισχυρότερο από το CO₂.

Στην ελαιοκαλλιέργεια ειδικότερα, οι αναλύσεις κύκλου ζωής συγκλίνουν στο ότι η αγροτική φάση αποτελεί το κρισιμότερο περιβαλλοντικό “σημείο εστίασης” (hotspot) του κύκλου ζωής του ελαιολάδου, με την κλιματική επιβάρυνση να κυμαίνεται στα 460 kg CO₂ –eq ανά τόνο ελαιόκαρπου και 1,6 kg CO₂ –eq ανά λίτρο ελαιολάδου (Espadas-Aldana et al., 2019). Καθοριστικοί παράγοντες αυτής της επιβάρυνσης είναι η λίπανση, η φυτοπροστασία και η άρδευση. Σε αξιολόγηση έντεκα αντιπροσωπευτικών ισπανικών συστημάτων παραγωγής, οι **Romero-Gómez et al., (2017)**, κατέδειξαν ότι τα εντατικά και υπερεντατικά συστήματα τείνουν να έχουν υψηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα από τα παραδοσιακά, καταλήγοντας ότι η βελτιστοποίηση της λίπανσης θα πρέπει να αποτελεί την πρώτη προτεραιότητα, ενώ τα συστήματα με ελαχιστοποιημένες εισροές και ελεγχόμενη άρδευση συνδυάζουν το χαμηλότερο αποτύπωμα με υψηλή παραγωγικότητα. Η ακριβής, αισθητηριοκατευθυνόμενη διαχείριση των εισροών αυτών αποτελεί επομένως άμεσο μοχλό μείωσης του αποτυπώματος άνθρακα ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος. Η ποσοτική διάσταση του οφέλους από τις τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας τεκμηριώνεται και σε ευρύτερη κλίμακα: σε πρόσφατη μετα-ανάλυση 85 εμπειρικών μελετών παγκοσμίως (1.472 ανεξάρτητες παρατηρήσεις), η υιοθέτηση τους συνδέθηκε με μέση μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 9,4%, βελτίωση της αποδοτικότητας χρήσης αζώτου κατά 15,1% και μείωση της χρήσης φυτοφαρμάκων κατά 12,8% σε σχέση με τις συμβατικές πρακτικές (Lan & Ban, 2025).

Γ. Εδαφική υγεία και βιοποικιλότητα

Η ευφυής άρδευση έχει επίσης ευνοϊκή επίδραση στην εδαφική υγεία, κυρίως μέσω της αποτροπής της υπεράρδευσης. Η υπερβολική εφαρμογή νερού λειτουργεί ως διαλύτης που παρασύρει τα ευκίνητα θρεπτικά συστατικά - ιδίως τα νιτρικά και τα φωσφορικά - προς τα βαθύτερα στρώματα, μακριά από τη ριζόσφαιρα, συμβάλλοντας στη ρύπανση των υπόγειων υδάτων. Παράλληλα, η διαβροχή εδαφών σε κατάσταση κορεσμού καταστρέφει την εδαφική δομή, μειώνει τον αερισμό και ευνοεί τη συμπίκνωση. Με την εφαρμογή της κατάλληλης ποσότητας νερού τη σωστή στιγμή, η αισθητηριοκατευθυνόμενη άρδευση περιορίζει ακριβώς αυτές τις απώλειες.

Πέρα από τις φυσικοχημικές παραμέτρους, οι πρακτικές άρδευσης επηρεάζουν και το ζωντανό συστατικό του εδάφους, δηλαδή τη μικροβιακή κοινότητα. Σε μελέτη μεσογειακών ελαιώνων υπό βιώσιμη διαχείριση, οι **Pascazio et al., (2018)**, αξιολόγησαν μικροβιακούς δείκτες ποιότητας εδάφους σε αρδευόμενα και μη αρδευόμενα τμήματα, καταδεικνύοντας ότι το καθεστώς νερού διαμορφώνει τη σύνθεση και τη δραστηριότητα της εδαφικής μικροβιακής κοινότητας, η οποία είναι σημαντική για την ανακύκλωση των θρεπτικών και τη μακροπρόθεσμη γονιμότητα. Η αποφυγή τόσο του κορεσμού όσο και του ακραίου στρες συμβάλλει στη διατήρηση μιας ενεργής αερόβιας μικροβιακής κοινότητας.

5.6.2 Οικονομικές επιπτώσεις

Α. Κόστος-όφελος σε επίπεδο εκμετάλλευσης

Η οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης σε ευφυή άρδευση πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο το αρχικό κόστος εγκατάστασης (αισθητήρες, cloud πλατφόρμα, αναβάθμιση δικτύου) όσο και τα ετήσια λειτουργικά οφέλη (μειωμένο κόστος νερού και ενέργειας, αύξηση ποιότητας). Η πρόσφατη ανάλυση 85 διεθνών εμπειρικών μελετών κατέδειξε ότι η υιοθέτηση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας, αύξησε κατά μέσο όρο την απόδοση επένδυσης (ROI) κατά 22,3% και το καθαρό κέρδος κατά 18,5% σε σχέση με συμβατικές πρακτικές (Lan & Ban, 2025). Ειδικά για τους ελαιώνες, η εξοικονόμηση νερού που τεκμηριώθηκε στις μελέτες περίπτωσης της ενότητας 5.4 μεταφράζεται σε άμεση μείωση του κόστους άντλησης και ενέργειας, η οποία συμβάλλει στη σταδιακή απόσβεση.

Β. Αξία ποιότητας: από το χωράφι στο ράφι

Ιδιαίτερης σημασίας είναι η οικονομική αποτίμηση της ποιοτικής βελτίωσης. Η ευρωπαϊκή νομοθεσία (Κανονισμός ΕΕ 432/2012) αναγνωρίζει επίσημο ισχυρισμό υγείας για ελαιόλαδα με περιεκτικότητα σε φαινολικές ενώσεις τουλάχιστον 250 mg/kg, καθώς αυτές συμβάλλουν στην προστασία των λιπιδίων του αίματος από οξειδωτικό στρες. Στην επιστημονική βιβλιογραφία, μάλιστα, προτείνεται ο όρος “ελαιόλαδο υψηλού φαινολικού περιεχομένου” για προϊόντα με περιεκτικότητα άνω των 500 mg/kg, ώστε να διατηρούν το όριο του ισχυρισμού υγείας (250 mg/kg) για τουλάχιστον δώδεκα μήνες μετά την εμφιάλωση (Diamantakos et al., 2021). Τα προϊόντα αυτής της κατηγορίας διατίθενται σε σαφώς υψηλότερες, premium τιμές έναντι του τυπικού εξαιρετικού παρθένου ελαιολάδου. Συνεπώς, εφόσον η αισθητηριοκατευθυνόμενη άρδευση επιτυγχάνει αύξηση της ολικής φαινολικής περιεκτικότητας (TPC), όπως καταδεικνύεται από τις μελέτες της ενότητας 5.4, ένα προϊόν που πλησιάζει ή υπερβαίνει τα προαναφερθέντα όρια φαινολικού περιεχομένου μπορεί δυνητικά να εντάσσεται σε υψηλότερη εμπορική κατηγορία, με αντίστοιχη υπεραξία. Επιπλέον, η αυτόματη τεκμηρίωση των καλλιεργητικών πρακτικών από τα συστήματα IoT εξυπηρετεί τις απαιτήσεις των πιστοποιήσεων ΠΟΠ/ΠΓΕ και βιολογικής γεωργίας, οι οποίες αποδεδειγμένα αυξάνουν την προθυμία πληρωμής των καταναλωτών. Παράλληλα η ιχνηλασιμότητα αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της εμπορικής αξίας: σε διεθνή έρευνα, το 74% των καταναλωτών δήλωσε διατεθειμένο να πληρώσει περισσότερο για βελτιωμένο σύστημα ιχνηλασιμότητας (Aparicio-Ruiz et al., 2022).

Γ. Μακροοικονομική διάσταση: υδατικοί πόροι και αγροτική βιωσιμότητα

Πέρα από το επίπεδο της μεμονωμένης εκμετάλλευσης, η ευφυής διαχείριση της άρδευσης αποκτά σημασία στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής και της αυξανόμενης λειψυδρίας στη Μεσόγειο. Οι κλιματικές προβλέψεις είναι σαφείς: για τη μεσογειακή περιοχή, τα μελλοντικά σενάρια προβλέπουν μείωση των αποδόσεων κατά 15-20% στους μη αρδευόμενους ελαιώνες, με τις απαιτήσεις σε αρδευτικό νερό να αναμένεται να αυξηθούν, καθιστώντας την ξερική καλλιέργεια σε ορισμένες περιοχές μη βιώσιμη (Kaniowski et al., 2025). Σε αυτό το πλαίσιο η άρδευση αναδεικνύεται σε αναγκαία στρατηγική προσαρμογής, ενώ ταυτόχρονα οι διαθέσιμοι υδατικοί πόροι συρρικνώνονται - μια αντίφαση που μόνο η αποδοτική χρήση του νερού μπορεί να γεφυρώσει. Η ελλειμματική και η αισθητηριοκατευθυνόμενη άρδευση προσφέρουν ακριβώς αυτή τη γέφυρα. Σύμφωνα με ανασκόπηση των επιπτώσεων και των στρατηγικών προσαρμογής

της μεσογειακής ελαιοκαλλιέργειας, η ελλειμματική άρδευση συνιστά βιώσιμη επιλογή διαχείρισης, καθώς μειώνει τις αρδευτικές ανάγκες και αυξάνει την αποδοτικότητα χρήσης νερού, επιτρέποντας στους αρδευόμενους ελαιώνες να αποδίδουν ικανοποιητικά ακόμη και υπό θερμότερες και ξηρότερες μελλοντικές συνθήκες (Fraga et al., 2020). Η σημασία αυτής της προσέγγισης είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για χώρες όπως η Ελλάδα, όπου η ελαιοκαλλιέργεια αποτελεί πυλώνα της αγροτικής οικονομίας και όπου η λειψυδρία συγκαταλέγεται στις σοβαρότερες απειλές υπό τα προβλεπόμενα κλιματικά σενάρια. Η εφαρμογή ορθών πρακτικών διαχείρισης νερού και εδάφους έχει ήδη αποδείξει την αξία της στο ελληνικό πλαίσιο. Σε πολυετές πείραμα σε ελαιώνες της Κρήτης, η εφαρμογή βελτίωσε την αποδοτικότητα χρήσης του νερού και το σημαντικότερο, οδήγησε σε αυξημένες αποδόσεις ακριβώς κατά το πλέον ξηρό έτος της μελέτης, καταδεικνύοντας τη δυνατότητα ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των καλλιεργειών απέναντι στα κλιματικά ακραία φαινόμενα (Kourgialas et al., 2022). Συνεπώς, σε μακροοικονομικό επίπεδο, η επένδυση στην ευφυή άρδευση δεν αφορά μόνο την κερδοφορία της μεμονωμένης εκμετάλλευσης, αλλά τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας ολόκληρου του ελαιοκομικού τομέα και των αγροτικών κοινοτήτων που στηρίζονται σε αυτόν.

5.7 Προοπτικές εξέλιξης των τεχνολογιών στην ελαιοκαλλιέργεια

Οι τεχνολογίες που αναλύθηκαν στα κεφάλαια 4 και 5 βρίσκονται σε συνεχή εξέλιξη. Αρκετές αναδυόμενες τεχνολογίες, που σήμερα εφαρμόζονται κυρίως σε ερευνητικό επίπεδο, αναμένεται να αποκτήσουν πρακτική εφαρμογή στην ελαιοκαλλιέργεια τα επόμενα χρόνια, μεταβάλλοντας ριζικά τις δυνατότητες βελτιστοποίησης της άρδευσης και της ποιότητας. Η παρούσα ενότητα αναλύει τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογικές κατευθύνσεις, ομαδοποιημένες σε τρεις θεματικές περιοχές.

5.7.1 Τεχνητή νοημοσύνη Πραγμάτων (AIoT) και Γεωργία 5.0

Η σύγκλιση Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) και Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) - γνωστή ως Artificial Intelligence of Things (AIoT) - αντιπροσωπεύει το επόμενο βήμα μετά τα σημερινά IoT συστήματα. Ενώ τα τρέχοντα IoT συστήματα συλλέγουν δεδομένα και τα αποστέλλουν στο cloud για επεξεργασία, τα AIoT συστήματα ενσωματώνουν μοντέλα AI απευθείας στις συσκευές (edge computing), επιτρέποντας αυτόνομη λήψη αποφάσεων τοπικά, χωρίς σύνδεση στο διαδίκτυο. Η προσέγγιση αυτή, όπως επισημαίνεται στη βιβλιογραφία, φέρνει την υπολογιστική ισχύ κοντά στην πηγή των δεδομένων, μειώνοντας την καθυστέρηση και την εξάρτηση από τη συνεχή συνδεσιμότητα, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό για αγροτικές περιοχές με περιορισμένη κάλυψη δικτύου (O’Grady et al., 2019).

Στο πλαίσιο της Γεωργίας 5.0 (Agriculture 5.0), η τεχνολογία προχωρά από την αυτοματοποίηση (Γεωργία 4.0) προς την αυτονόμηση: ρομποτικά συστήματα, αυτόνομα UAV και γεωργικές μηχανές με AI μπορούν να διενεργούν παρακολούθηση, ψεκασμό ή ακόμα και παρέμβαση σε ανεπιθύμητα ζιζάνια, με ελάχιστη ανθρώπινη επίβλεψη (Mesías-Ruiz et al., 2023). Για την ελαιοκαλλιέργεια, οι πλέον υποσχόμενες αυτόνομες εφαρμογές είναι η παρακολούθηση υδατικής καταπόνησης ανά δέντρο με UAV swarms (σμήνος UAV) και η αυτόνομη ρύθμιση μεταβλητής δόσης άρδευσης (VRI).

5.7.2 Υπερφασματική απεικόνιση και φορητοί αισθητήρες ποιότητας

Η υπερφασματική (hyperspectral) απεικόνιση επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων σε εκατοντάδες συνεχείς φασματικές ζώνες, αποκαλύπτοντας πληροφορίες για τη χημική σύσταση των φύλλων και των καρπών που δεν είναι ορατές σε πολυφασματικές ή RGB

εικόνες. Πρόσφατες μελέτες αποδεικνύουν ότι τα υπερφασματικά δεδομένα από UAV, σε συνδυασμό με μοντέλα μηχανικής μάθησης, μπορούν να εκτιμούν με ικανοποιητική ακρίβεια παραμέτρους υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας, με τάση μετάβασης από τη μεμονωμένη απεικόνιση προς προσεγγίσεις σύντηξης πολλαπλών αισθητήρων (Sharma et al., 2025). Αυτό ανοίγει την προοπτική πρόβλεψης ποιοτικών χαρακτηριστικών από αεροφωτογραφίες, πριν ακόμα πραγματοποιηθεί η συγκομιδή.

Παράλληλα, αναπτύσσονται ταχύτατα φορητοί αισθητήρες χαμηλού κόστους για άμεση εκτίμηση ποιοτικών παραμέτρων του ελαιολάδου απευθείας στον ελαιώνα ή στο ελαιοτριβείο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί φορητό σύστημα αισθητήρα που επιτρέπει την ταχεία, επιτόπια μέτρηση του δείκτη υπεροξειδίων και της ολικής φαινολικής περιεκτικότητας (TPC) σε δείγματα ελαιολάδου, ιδιαίτερα χρήσιμο για μικρές μονάδες παραγωγής που δεν διαθέτουν εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου (Grossi et al., 2023).

5.7.3 Ψηφιακοί δίδυμοι ελαιώνας και προβλεπτική μοντελοποίηση

Ο ψηφιακός δίδυμος (digital twin) ελαιώνας, αναμένεται να εξελιχθεί από ερευνητικό εργαλείο σε πρακτική πλατφόρμα διαχείρισης. Ένας πλήρως ολοκληρωμένος ψηφιακός δίδυμος ελαιώνας θα ενσωματώνει: μοντέλο υδατικού ισοζυγίου εδάφους βαθμονομημένο από αισθητήρες και δενδρόμετρα, μοντέλο ανάπτυξης βαθμονομημένο από NDVI και δενδρόμετρα, μοντέλο ποιότητας ελαιολάδου βαθμονομημένο από ιστορικά δεδομένα φαινολικών ανά επέμβαση άρδευσης και μετεωρολογικό μοντέλο πρόβλεψης 7-14 ημερών (Manocha et al., 2024). Με αυτόν τον συνδυασμό, ο ψηφιακός δίδυμος μπορεί να προσομοιώνει διαφορετικά σενάρια άρδευσης και να εκτιμά εκ των προτέρων τόσο την παραγωγή όσο και το ποιοτικό προφίλ, επιτρέποντας βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων. Στον τομέα της μοντελοποίησης τα μοντέλα μηχανικής μάθησης εκπαιδευμένα σε ιστορικά δεδομένα πολλαπλών ετών και πολλαπλών ελαιώνων αναμένεται να επιτρέψουν μεταφορά γνώσης μεταξύ διαφορετικών ποικιλιών και περιοχών, μειώνοντας τον χρόνο βαθμονόμησης που σήμερα αποτελεί σοβαρό εμπόδιο εφαρμογής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΖΗΤΗΣΗ

6.1 Ανάλυση βιβλιογραφικών δεδομένων: συνέπεια, ετερογένεια και ερμηνευτικά ζητήματα

Η κριτική σύνθεση των δεδομένων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια αποκαλύπτει μια σύνθετη εικόνα, στην οποία συνυπάρχουν σημεία σύγκλισης με ουσιαστικές πηγές ετερογένειας. Η ταυτόχρονη σύγκριση μελετών που προέρχονται από διαφορετικά γεωγραφικά, κλιματικά και αγρονομικά πλαίσια επιτρέπει τη διάκριση ανάμεσα σε ευρήματα που μπορούν να θεωρηθούν γενικεύσιμα και σε εκείνα που παραμένουν εξαρτημένα από τις ειδικές συνθήκες κάθε πειράματος. Η ενότητα αυτή επιχειρεί μια τέτοια διάκριση, αναλύοντας πρώτα τα σημεία συμφωνίας της βιβλιογραφίας, στη συνέχεια τις βασικές πηγές της παρατηρούμενης ετερογένειας και τέλος τα ερμηνευτικά ζητήματα που περιορίζουν την ασφαλή γενίκευση των συμπερασμάτων.

6.1.1 Σημεία σύγκλισης: ο πυρήνας των ευρημάτων

Το πλέον ισχυρό και συνεπές εύρημα που διατρέχει το σύνολο της εξατασθείσας βιβλιογραφίας είναι ότι η ελεγχόμενη μείωση της άρδευσης οδηγεί σε αύξηση της συγκέντρωσης των φαινολικών ενώσεων στο ελαιολάδο, χωρίς να υποβαθμίζει τις παραμέτρους ποιότητας που ορίζουν την κατηγορία του εξαιρετικού παρθένου ελαιολάδου. Η συνέπεια αυτού του ευρήματος είναι αξιοσημείωτη, καθώς προκύπτει από μελέτες που διεξήχθησαν σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Στην Κρήτη οι Psarras et al. (2011) κατέγραψαν υψηλότερα ολικά φαινολικά στο ελαιολάδο των ελλειμματικά αρδευόμενων δέντρων ποικιλίας Κορωνέικης, με τις παραμέτρους οξύτητας, αριθμού υπεροξειδίων και αντοχής στην οξείδωση να παραμένουν ανεπηρέαστες. Σε εντελώς διαφορετικό πλαίσιο, σε υπερυψηλής πυκνότητας ελαιώνα Arbequina στη Χιλή, οι Ahumada-Orellana et al. (2018), επιβεβαίωσαν ακριβώς την ίδια τάση: οι ολικές πολυφαινόλες αυξήθηκαν σημαντικά υπό υδατικό έλλειμμα, με στατιστικά σημαντική γραμμική σχέση με το ολοκλήρωμα υδατικού στρες, ενώ η ελεύθερη οξύτητα και τα υπεροξείδια παρέμειναν εντός των ορίων του εξαιρετικού παρθένου ελαιολάδου. Η σύγκλιση αυτή ενισχύεται περαιτέρω από μελέτες σε ισπανικούς ελαιώνες υψηλής πυκνότητας. Οι García-Garvía et al. (2022), μελετώντας τη ρυθμιζόμενη ελλειμματική άρδευση σε Arbequina, διαπίστωσαν αύξηση της ολικής φαινολικής περιεκτικότητας υπό συνθήκες ελλείμματος χωρίς αρνητικές επιπτώσεις στις βασικές ποιοτικές παραμέτρους, ενώ οι Gucci et al. (2019) κατέγραψαν υψηλότερη φαινολική συγκέντρωση στους καρπούς υπό στοχευμένο υδατικό στρες. Το γεγονός ότι τέσσερις ανεξάρτητες μελέτες, σε τρεις διαφορετικές χώρες και με δύο τουλάχιστον διαφορετικές ποικιλίες, καταλήγουν στο ίδιο ποιοτικό συμπέρασμα, προσδίδει στο εύρημα αυτό έναν βαθμό αξιοπιστίας. Πρόκειται, επομένως για τον πυρήνα της βιβλιογραφίας, πάνω στον οποίο μπορεί να σταθεί με ασφάλεια η επιχειρηματολογία υπέρ της ελεγχόμενης ελλειμματικής άρδευσης ως εργαλείου ποιοτικής αναβάθμισης. Ο φυσιολογικός μηχανισμός που εξηγεί αυτή τη συνέπεια έχει επίσης τεκμηριωθεί. Οι Petridis et al (2012), μελετώντας τέσσερις ελληνικές ποικιλίες, έδειξαν ότι το υδατικό στρες επάγει στη συσσώρευση φαινολικών ενώσεων και ιδίως ελευρωπαΐνης, ως μέρος της αμυντικής απόκρισης του φυτού στη καταπόνηση. Αυτή η φυσιολογική βάση προσφέρει μια αιτιολογική εξήγηση για το εύρημα, η αύξηση συγκέντρωσης των φαινολικών ενώσεων δεν αποτελεί απλή συσχέτιση, αλλά αντανακλά μια αλληλένδετη βιοχημική ακολουθία που οδηγεί στη βιοσύνθεση τους.

6.1.2 Πηγές ετερογένειας : μεταβλητότητα αριθμητικών δεδομένων

Παρά τη συμφωνία ως προς τη γενική κατεύθυνση, τα συγκεκριμένα αριθμητικά αποτελέσματα των μελετών παρουσιάζουν σημαντική διασπορά, η οποία δεν πρέπει να ερμηνεύεται ως αντίφαση, αλλά ως αποτέλεσμα της επίδρασης διακριτών παραγόντων. Η κατανόηση των πηγών αυτής της ετερογένειας είναι κρίσιμη για τη σωστή ερμηνεία της βιβλιογραφίας.

Ο πρώτος και ίσως σημαντικότερος παράγοντας είναι η ποικιλία. Οι διαφορετικές ποικιλίες ελιάς παρουσιάζουν διακριτές αποκρίσεις στο υδατικό έλλειμμα, τόσο ως προς την ανθεκτικότητά τους όσο και ως προς τη φαινολική τους απόκριση. Χαρακτηριστικά, οι Petridis et al. (2012) ανέδειξαν ότι, μεταξύ των τεσσάρων ελληνικών ποικιλιών που μελέτησαν, η Γαϊδουρελιά —και όχι η ευρέως καλλιεργούμενη Κορωνέικη— αποδείχθηκε η πλέον ανθεκτική στην ξηρασία. Η παρατήρηση αυτή καταδεικνύει ότι

συμπεράσματα που εξάγονται για μία ποικιλία δεν μπορούν να μεταφερθούν αυτούσια σε άλλη, και ότι η βέλτιστη στρατηγική άρδευσης είναι κατ' ανάγκη ποικιλιοεξαρτώμενη.

Ο δεύτερος καθοριστικός παράγοντας είναι ο χρονισμός εφαρμογής του στρες σε σχέση με το φαινολογικό στάδιο της καλλιέργειας. Οι Gómez-del-Campo (2013), συγκρίνοντας τέσσερις μεταχειρίσεις σε Arbequina, έδειξαν ότι η ίδια περίπου ένταση ελλείμματος οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με το πότε εφαρμόζεται: η μεταχείριση με περιορισμένο στρες πριν τη σκλήρυνση του πυρήνα (DI-J) διατήρησε την παραγωγή ελαίου σχεδόν αμετάβλητη με 16% εξοικονόμηση νερού, ενώ η εφαρμογή στρες στη φάση συσσώρευσης ελαίου (DI-A) προκάλεσε τη μεγαλύτερη απώλεια παραγωγής (21%). Αντίστοιχα, οι Gucci et al. (2019) κατέδειξαν ότι το υδατικό έλλειμμα πριν τη σκλήρυνση του πυρήνα παρήγαγε καρπούς με την υψηλότερη φαινολική συγκέντρωση. Η σύγκλιση των δύο αυτών μελετών στο ότι ο χρονισμός είναι καθοριστικός αποτελεί από μόνη της ισχυρό εύρημα, αλλά ταυτόχρονα εξηγεί γιατί μελέτες με διαφορετικά πρωτόκολλα χρονισμού καταλήγουν σε διαφορετικά νούμερα.

Ο τρίτος παράγοντας είναι η ένταση του ελλείμματος και το κλιματικό πλαίσιο. Η μελέτη των Psarras et al. (2011) είναι ιδιαίτερα διαφωτιστική ως προς αυτό, καθώς ανέδειξε την ύπαρξη ενός «παραθύρου» μέτριου ελλείμματος εντός του οποίου η παραγωγή ουσιαστικά διατηρείται: η άρδευση στο 70% της εξατμισοδιαπνοής δεν διέφερε σημαντικά από την πλήρη άρδευση ως προς την παραγωγή καρπού, ενώ μόνο τα εντονότερα ελλείμματα — στο 40% της εξατμισοδιαπνοής και η πλήρως ξερική καλλιέργεια — προκάλεσαν μειώσεις της τάξης του 16,6% και 32% αντίστοιχα. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι η σχέση μεταξύ έντασης στρες και απόκρισης δεν είναι γραμμική, αλλά χαρακτηρίζεται από κατώφλια, η θέση των οποίων μεταβάλλεται ανάλογα με τις τοπικές εδαφοκλιματικές συνθήκες. Συνεπώς, η μεταφορά ενός συγκεκριμένου αρδευτικού πρωτοκόλλου από τη μία περιοχή στην άλλη, χωρίς προσαρμογή, ενέχει τον κίνδυνο είτε υπερβολικού στρες είτε απώλειας του ποιοτικού οφέλους.

6.1.3 Ο χρονισμός ως καθοριστικός παράγοντας της σχέσης μεταξύ άρδευσης και ποιότητας

Η αναγνώριση του χρονισμού ως κρίσιμης μεταβλητής λειτουργεί ως ενοποιητική αρχή που γεφυρώνει φαινομενικά αποκλίνοντα ευρήματα. Όταν τα δεδομένα διαφορετικών μελετών εξετάζονται όχι μόνο ως προς την ένταση του ελλείμματος αλλά και ως προς το φαινολογικό στάδιο εφαρμογής του, η φαινομενική αντίφαση υποχωρεί και αναδεικνύεται μια συνεκτική εικόνα. Η σύγκλιση των Gómez-del-Campo (2013) και Gucci et al. (2019) — δύο ανεξάρτητων μελετών που, με διαφορετική μεθοδολογία, καταλήγουν στο ίδιο συμπέρασμα ως προς τη σημασία του σταδίου πριν τη σκλήρυνση του πυρήνα — προσφέρει μια ισχυρή ερμηνευτική βάση. Αυτό υποδηλώνει ότι το ερώτημα δεν είναι απλώς «πόσο νερό πρέπει να αφαιρεθεί», αλλά κυρίως «πότε πρέπει να επιβληθεί το έλλειμμα», μετατοπίζοντας το επίκεντρο από την ποσότητα στη χρονική ακρίβεια. Αυτή η μετανόηση έχει άμεσες πρακτικές συνέπειες. Εφόσον το βέλτιστο αποτέλεσμα εξαρτάται από την ακριβή αντιστοίχιση του υδατικού ελλείμματος με συγκεκριμένα φαινολογικά στάδια, η παραδοσιακή άρδευση αποδεικνύεται ανεπαρκής. Απαιτείται, αντ' αυτής, συνεχής παρακολούθηση της υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας, ώστε η εφαρμογή του στρες να ρυθμίζεται με βάση τις πραγματικές, τρέχουσες ανάγκες και το φαινολογικό στάδιο του δέντρου.

6.1.4 Η γεωργία ακριβείας ως γέφυρα μεταξύ πειραματικού και πρακτικού

Ένα κρίσιμο ερμηνευτικό ζήτημα αφορά τη μεταφορά των πειραματικών ευρημάτων από το ελεγχόμενο περιβάλλον του πειραματικού αγρού στην πραγματική, ετερογενή συνθήκη του εμπορικού ελαιώνα. Εδώ η γεωργία ακριβείας αναδεικνύεται ως ο αναγκαίος συνδετικός κρίκος. Η βιβλιογραφία τεκμηριώνει ότι η υδατική κατάσταση εντός ενός ελαιώνα δεν είναι ομοιογενής: οι Agam et al. (2013), αξιοποιώντας θερμική απεικόνιση, κατέγραψαν σημαντική χωρική μεταβλητότητα της υδατικής κατάστασης ακόμη και μεταξύ γειτονικών δέντρων. Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική, διότι σημαίνει ότι η εφαρμογή ενός ενιαίου αρδευτικού προγράμματος σε έναν ετερογενή ελαιώνα οδηγεί αναπόφευκτα σε ταυτόχρονη υπεράρδευση ορισμένων δέντρων και υποάρδευση άλλων, με αντίστοιχη απώλεια του ποιοτικού οφέλους. Οι τεχνολογίες αισθητήρων και τηλεπισκόπησης προσφέρουν τα εργαλεία για την αντιμετώπιση αυτής της ετερογένειας. Οι González-Dugo et al. (2013) και οι Egea et al. (2017) κατέδειξαν ότι ο δείκτης υδατικού στρες καλλιέργειας, υπολογιζόμενος από θερμικές εικόνες μη επανδρωμένων αεροσκαφών, συσχετίζεται ισχυρά με την υδατική κατάσταση των δέντρων και επιτρέπει τη χαρτογράφηση ζωνών διαφορετικών αναγκών. Αντίστοιχα, η αξιοποίηση του υδατικού δυναμικού βλαστού ως κριτηρίου ελέγχου, όπως στη μελέτη των Ahumada-Orellana et al. (2018), επιτρέπει τη «σχεδίαση» του ποιοτικού προφίλ μέσω της ακριβούς ρύθμισης του στρες. Με τον τρόπο αυτό, η γεωργία ακριβείας μετατρέπει τα πειραματικά ευρήματα από θεωρητικές δυνατότητες σε εφαρμόσιμες πρακτικές, αντιμετωπίζοντας ακριβώς τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα που, διαφορετικά, θα υπονόμειε την εφαρμογή τους.

6.2 Αξιολόγηση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας

Οι επιμέρους τεχνολογίες της γεωργίας ακριβείας βρίσκονται σε διαφορετικά στάδια ωριμότητας και παρουσιάζουν διαφορετικά προφίλ επίδοσης και αξιοπιστίας. Η θερμική τηλεπισκόπηση μέσω μη επανδρωμένων αεροσκαφών αποτελεί μία από τις πλέον ώριμες και αξιόπιστες εφαρμογές, με τεκμηριωμένη ικανότητα χαρτογράφησης της χωρικής μεταβλητότητας της υδατικής κατάστασης (González-Dugo et al., 2013· Egea et al., 2017). Η αξιοπιστία της εξαρτάται, ωστόσο, από τη σωστή βαθμονόμηση και από τις συνθήκες λήψης, ενώ η πρακτική αξιοποίησή της απαιτεί την ενσωμάτωση σε ολοκληρωμένα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων. Οι αισθητήρες συνεχούς παρακολούθησης, όπως τα όργανα μέτρησης του υδατικού δυναμικού βλαστού, προσφέρουν υψηλή ακρίβεια σε επίπεδο μεμονωμένου δέντρου και έχουν αποδείξει την αξία τους ως κριτήρια ελέγχου της άρδευσης για τη ρύθμιση της ποιότητας (Ahumada-Orellana et al., 2018).

Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι παρέχουν σημειακή πληροφορία, η οποία πρέπει να συνδυαστεί με μεθόδους χωρικής επέκτασης για να καλύψει ολόκληρο τον ελαιώνα. Η δορυφορική τηλεπισκόπηση, από την άλλη, προσφέρει ευρεία χωρική και χρονική κάλυψη για τη διαχρονική παρακολούθηση, αλλά με χαμηλότερη χωρική ανάλυση και με χρονική υστέρηση στην απόκριση, γεγονός που την καθιστά καταλληλότερη για την ανίχνευση μακροπρόθεσμων τάσεων παρά για την άμεση παρέμβαση (Crespo et al., 2025).

Η συνολική αποτίμηση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι καμία μεμονωμένη τεχνολογία δεν επαρκεί από μόνη της· η μέγιστη αξιοπιστία επιτυγχάνεται μέσω της συμπληρωματικής αξιοποίησης πολλαπλών πηγών δεδομένων. Όπως τεκμηριώνεται από τη συστηματική ανασκόπηση των Alexopoulos et al. (2023), η σύντηξη δεδομένων από επίγειους αισθητήρες, μη επανδρωμένα αεροσκάφη και δορυφόρους —με την καθεμία τεχνολογία να καλύπτει διαφορετική χωρική και χρονική κλίμακα— αποτελεί την πλέον ολοκληρωμένη και αξιόπιστη προσέγγιση για την πρακτική διαχείριση του ελαιώνα.

6.3 Πλεονεκτήματα εφαρμογής γεωργίας ακριβείας στην παραγωγή ποιοτικού ελαιολάδου

Η συστηματική αποτίμηση των πλεονεκτημάτων της γεωργίας ακριβείας στην παραγωγή ποιοτικού ελαιολάδου μπορεί να οργανωθεί σε τρία διακριτά επίπεδα, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές κλίμακες οφέλους: το αγρονομικό-ποιοτικό επίπεδο της μεμονωμένης καλλιέργειας, το περιβαλλοντικό επίπεδο της διαχείρισης των πόρων, και το οικονομικό επίπεδο της εκμετάλλευσης και του τομέα.

Επίπεδο Α — Αγρονομικά και ποιοτικά πλεονεκτήματα

Στο πρώτο επίπεδο, το κεντρικό πλεονέκτημα της γεωργίας ακριβείας είναι η δυνατότητα στοχευμένης βελτιστοποίησης της ποιότητας του ελαιολάδου. Όπως αναλύθηκε, η ακριβής ρύθμιση του υδατικού ελλείμματος σε συγκεκριμένα φαινολογικά στάδια επιτρέπει την ελεγχόμενη ενίσχυση του φαινολικού προφίλ. Η αξιοποίηση του υδατικού δυναμικού βλαστού ως κριτηρίου ελέγχου, όπως στη μελέτη των Ahumada-Orellana et al. (2018), επιτρέπει στην πράξη τη «σχεδίαση» των ποιοτικών χαρακτηριστικών, με τις ολικές πολυφαινόλες να αυξάνονται κατά τρόπο που συσχετίζεται γραμμικά με το επιβαλλόμενο επίπεδο στρες. Πέραν της ποιοτικής αναβάθμισης, η γεωργία ακριβείας προσφέρει και τη δυνατότητα διατήρησης της παραγωγής εντός αποδεκτών ορίων: η κατάλληλη επιλογή χρονισμού, όπως στη στρατηγική DI-J των Gómez-del-Campo (2013), επιτυγχάνει εξοικονόμηση νερού χωρίς ουσιαστική απώλεια παραγωγής ελαίου. Το σημαντικότερο αγρονομικό πλεονέκτημα, ωστόσο, είναι η δυνατότητα αντιμετώπισης της χωρικής ετερογένειας του ελαιώνα: αντί της ενιαίας μεταχείρισης που οδηγεί σε ταυτόχρονη υπερ- και υποάρδευση, η ζωνική διαχείριση βάσει χαρτογράφησης (González-Dugo et al., 2013) επιτρέπει την προσαρμογή της άρδευσης στις πραγματικές ανάγκες κάθε τμήματος, βελτιώνοντας την ομοιομορφία της τελικής ποιότητας.

Επίπεδο Β — Περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα

Στο δεύτερο επίπεδο, τα πλεονεκτήματα αφορούν τη βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων. Το πλέον άμεσο όφελος είναι η εξοικονόμηση νερού, η οποία σε ένα από τα πλέον υδατοεντατικά αγροτικά συστήματα της Μεσογείου αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής ελαιοκαλλιεργειών στην Ελλάδα, όπως τεκμηριώνεται από τους Fotia et al. (2021), έδειξε ότι η διαχείριση της άρδευσης βάσει συστήματος υποστήριξης αποφάσεων μπορεί να μειώσει την κατανάλωση νερού και ενέργειας κατά 42,1% σε σχέση με τις συμβατικές πρακτικές, με αντίστοιχη μείωση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Η σημασία της εξοικονόμησης αυτής ενισχύεται από την κρισιμότητα του «γαλάζιου» νερού στους αρδευόμενους ελαιώνες (Salmoral et al., 2011) και από την αυξανόμενη πίεση στους υδατικούς πόρους της Μεσογείου. Πέραν του νερού, η ακριβέστερη διαχείριση των εισροών συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου: η μετα-ανάλυση των Lan & Ban (2025) απέδειξε μέση μείωση των

εκπομπών κατά 9,4% και βελτίωση της αποδοτικότητας χρήσης αζώτου κατά 15,1% με την υιοθέτηση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας. Τέλος, η αποφυγή της υπεράρδευσης προστατεύει την εδαφική υγεία, περιορίζοντας την έκπλυση θρεπτικών και διατηρώντας την εδαφική μικροβιακή κοινότητα (Pascazio et al., 2018).

Επίπεδο Γ — Οικονομικά πλεονεκτήματα

Στο τρίτο επίπεδο, τα πλεονεκτήματα αφορούν την οικονομική βιωσιμότητα της εκμετάλλευσης και του τομέα. Η υιοθέτηση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας συνδέεται με βελτιωμένη οικονομική απόδοση: η μετα-ανάλυση των Lan & Ban (2025) κατέγραψε μέση αύξηση της απόδοσης της επένδυσης κατά 22,3% και του καθαρού κέρδους κατά 18,5% σε σχέση με τις συμβατικές πρακτικές. Πέραν της άμεσης μείωσης του κόστους νερού και ενέργειας, ιδιαίτερη οικονομική σημασία έχει η αξία της ποιοτικής αναβάθμισης. Η ευρωπαϊκή νομοθεσία αναγνωρίζει επίσημο ισχυρισμό υγείας για ελαιόλαδα με υψηλή φαινολική περιεκτικότητα, ενώ στην επιστημονική βιβλιογραφία προτείνεται η κατηγορία του «ελαιολάδου υψηλού φαινολικού περιεχομένου» για προϊόντα άνω των 500 mg/kg (Diamantakos et al., 2021). Εφόσον η αισθητηριοκατευθυνόμενη άρδευση επιτυγχάνει την αύξηση της φαινολικής περιεκτικότητας, ένα προϊόν μπορεί δυνητικά να εντάσσεται σε υψηλότερη εμπορική κατηγορία, με αντίστοιχη υπεραξία. Επιπλέον, η αυτόματη τεκμηρίωση των πρακτικών μέσω συστημάτων IoT εξυπηρετεί τις απαιτήσεις πιστοποίησης και ιχνηλασιμότητας, χαρακτηριστικά που, όπως τεκμηριώνεται από τους Aparicio-Ruiz et al. (2022), αυξάνουν την προθυμία πληρωμής των καταναλωτών, ιδίως στις εξαγωγικές αγορές όπου ανταγωνίζεται το ελληνικό ελαιόλαδο.

6.4 Περιορισμοί και δυσκολίες εφαρμογής

Παρά τα τεκμηριωμένα πλεονεκτήματα, η ευρεία εφαρμογή της γεωργίας ακριβείας στην ελαιοκαλλιέργεια προσκρούει σε μια σειρά πραγματικών περιορισμών και δυσκολιών, η ειλικρινής αναγνώριση των οποίων είναι απαραίτητη για μια ισορροπημένη αποτίμηση. Τρεις βασικοί περιορισμοί αναδεικνύονται ως ιδιαίτερα σημαντικοί.

Περιορισμός 1 — Η δομή της ελληνικής ελαιοκαλλιέργειας.

Ένα από τα σημαντικότερα εμπόδια αφορά τον κατακερματισμό του ελληνικού ελαιοκομικού τοπίου σε μικρές, συχνά μη συνεχόμενες εκμεταλλεύσεις. Ο μικρός μέσος κλήρος καθιστά οικονομικά δυσχερή την απόσβεση του κόστους εξοπλισμού γεωργίας ακριβείας, ο οποίος σχεδιάστηκε αρχικά για εκτατικές, ομοιογενείς καλλιέργειες. Η πρόκληση της εφαρμογής σε μικρές εκμεταλλεύσεις αναγνωρίζεται ευρέως στη βιβλιογραφία ως κρίσιμο ζήτημα για τη διάχυση των τεχνολογιών (Mizik, 2023· Kakkavou et al., 2024).

Περιορισμός 2 — Το κόστος και η τεχνολογική πολυπλοκότητα.

Το αρχικό κόστος εγκατάστασης αισθητήρων, πλατφορμών και υποδομής, σε συνδυασμό με την απαιτούμενη τεχνική εξειδίκευση για τη λειτουργία και την ερμηνεία των δεδομένων, αποτελεί σημαντικό εμπόδιο εισόδου, ιδίως για τους μικρούς παραγωγούς. Η ανάγκη βαθμονόμησης των συστημάτων στις τοπικές συνθήκες, όπως αναλύθηκε, προσθέτει ένα επιπλέον επίπεδο πολυπλοκότητας που απαιτεί χρόνο και τεχνογνωσία.

Περιορισμός 3 — Η ανεπαρκής υποδομή συνδεσιμότητας.

Πολλές ελαιοκαλλιεργητικές περιοχές, ιδίως οι ορεινές και απομακρυσμένες, χαρακτηρίζονται από ανεπαρκή κάλυψη δικτύου, γεγονός που δυσχεραίνει τη λειτουργία συστημάτων που βασίζονται στη συνεχή μετάδοση δεδομένων. Αν και αναδυόμενες προσεγγίσεις, όπως η τοπική επεξεργασία δεδομένων στο άκρο του δικτύου (edge computing), προσφέρουν μερική λύση επιτρέποντας την αυτόνομη λειτουργία χωρίς συνεχή σύνδεση (O'Grady et al., 2019), ωστόσο το ζήτημα της υποδομής παραμένει πρακτικός περιορισμός.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Βασικά συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία μέσα από συστηματική ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας διερεύνησε την επίδραση της άρδευσης στην ποιότητα του ελαιολάδου και τον ρόλο των εργαλείων γεωργίας ακριβείας στη βελτιστοποίηση αυτής της σχέσης. Από τη συνολική ανάλυση προκύπτουν πέντε βασικά συμπεράσματα.

Πρώτον, η ελεγχόμενη ελλειμματική άρδευση αποτελεί τεκμηριωμένο εργαλείο ποιοτικής αναβάθμισης του ελαιολάδου. Το πλέον συνεπές εύρημα της βιβλιογραφίας είναι ότι η ελεγχόμενη μείωση της άρδευσης οδηγεί σε αύξηση της συγκέντρωσης των φαινολικών ενώσεων, χωρίς υποβάθμιση των παραμέτρων ποιότητας του εξαιρετικού παρθένου ελαιολάδου. Η σύγκλιση μελετών από διαφορετικές χώρες και ποικιλίες προσδίδει στο συμπέρασμα αυτό υψηλό βαθμό αξιοπιστίας, ενώ ο υποκείμενος φυσιολογικός μηχανισμός —η επαγωγή βιοσύνθεσης φαινολικών υπό υδατική καταπόνηση— προσφέρει αιτιολογική βάση.

Δεύτερον, ο χρονισμός εφαρμογής του υδατικού στρες είναι εξίσου, αν όχι περισσότερο, καθοριστικός με την έντασή του. Η ανάλυση κατέδειξε ότι το ίδιο επίπεδο ελλείμματος μπορεί να οδηγήσει σε ριζικά διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με το φαινολογικό στάδιο εφαρμογής του, με το στάδιο πριν τη σκλήρυνση του πυρήνα να αναδεικνύεται ιδιαίτερα σημαντικό τόσο για την ποιότητα όσο και για τη διατήρηση της παραγωγής. Η αναγνώριση αυτή μετατοπίζει το ερώτημα από το «πόσο νερό» στο «πότε», με άμεσες συνέπειες για τον σχεδιασμό των αρδευτικών στρατηγικών.

Τρίτον, η σχέση άρδευσης-ποιότητας χαρακτηρίζεται από έντονη εξάρτηση από την ποικιλία, το κλίμα και τις τοπικές συνθήκες. Δεν υφίσταται ένα καθολικά εφαρμόσιμο αρδευτικό πρωτόκολλο· αντιθέτως, η βέλτιστη στρατηγική είναι κατ' ανάγκη προσαρμοσμένη στο εκάστοτε πλαίσιο. Η ύπαρξη ενός «παραθύρου» μέτριου ελλείμματος, εντός του οποίου η παραγωγή διατηρείται ενώ η ποιότητα ενισχύεται, αποτελεί κεντρικό πρακτικό εύρημα, η ακριβής όμως θέση του οποίου μεταβάλλεται ανά περιοχή και ποικιλία.

Τέταρτον, η γεωργία ακριβείας αποτελεί τον αναγκαίο συνδετικό κρίκο μεταξύ της πειραματικής γνώσης και της πρακτικής εφαρμογής. Δεδομένης της σημαντικής χωρικής ετερογένειας της υδατικής κατάστασης εντός του ελαιώνα, η ενιαία αρδευτική μεταχείριση οδηγεί αναπόφευκτα σε ταυτόχρονη υπερ- και υποάρδευση. Οι τεχνολογίες αισθητήρων και τηλεπισκόπησης (θερμικές κάμερες, αισθητήρες υδατικού δυναμικού βλαστού, δορυφορικοί δείκτες) επιτρέπουν την αντιμετώπιση αυτής της ετερογένειας μέσω χωρικά και χρονικά διαφοροποιημένης διαχείρισης, μετατρέποντας τα θεωρητικά οφέλη σε εφαρμόσιμες πρακτικές.

Πέμπτον, τα οφέλη της ευφυούς διαχείρισης της άρδευσης εκτείνονται πέρα από την ποιότητα, καλύπτοντας την περιβαλλοντική και οικονομική διάσταση. Η εξοικονόμηση νερού και ενέργειας, η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, η προστασία της εδαφικής υγείας, καθώς και η οικονομική υπεραξία που συνδέεται με την ποιοτική αναβάθμιση και την ιχνηλασιμότητα, συνθέτουν μια πολυδιάστατη πρόταση αξίας. Η σύζευξη αυτών των διαστάσεων καθιστά την ευφυή άρδευση όχι απλώς τεχνική βελτίωση, αλλά στρατηγική επιλογή για τη βιωσιμότητα του ελαιοκομικού τομέα.

7.2 Συμβολή της γεωργίας ακριβείας στη βιώσιμη ελαιοκαλλιέργεια

Η συμβολή της γεωργίας ακριβείας στη βιωσιμότητα της ελαιοκαλλιέργειας μπορεί να αποτιμηθεί σε τέσσερις αλληλένδετες διαστάσεις, οι οποίες αντιστοιχούν στους πυλώνες της βιώσιμης ανάπτυξης.

Α. Περιβαλλοντική βιωσιμότητα

Η ακριβής διαχείριση της άρδευσης συμβάλλει άμεσα στη διατήρηση των υδατικών πόρων, ζήτημα κρίσιμο για τη Μεσόγειο όπου η λειψυδρία εντείνεται. Η τεκμηριωμένη μείωση της κατανάλωσης νερού και ενέργειας, σε συνδυασμό με τον περιορισμό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και την προστασία της εδαφικής υγείας από την έκπλυση θρεπτικών, καθιστά τη γεωργία ακριβείας βασικό εργαλείο για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ελαιοκαλλιέργειας.

Β. Οικονομική βιωσιμότητα

Σε επίπεδο εκμετάλλευσης, η βελτιωμένη απόδοση της επένδυσης, η μείωση του λειτουργικού κόστους και η δυνατότητα παραγωγής ελαιολάδου υψηλής προστιθέμενης αξίας ενισχύουν την οικονομική βιωσιμότητα. Η αξία αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της αγοράς premium ελαιολάδου υψηλού φαινολικού περιεχομένου και της αυξανόμενης ζήτησης για πιστοποιημένα και ιχνηλάσιμα προϊόντα.

Γ. Κοινωνική βιωσιμότητα

Η τεκμηρίωση των καλλιεργητικών πρακτικών και η διασφάλιση της ποιότητας ενισχύουν την εμπιστοσύνη του καταναλωτή και τη θέση των παραγωγών στην αλυσίδα αξίας. Παράλληλα, η εκδημοκρατικοποίηση των τεχνολογιών μέσω προσιτών λύσεων αποτελεί προϋπόθεση ώστε τα οφέλη να μην περιοριστούν στις μεγάλες εκμεταλλεύσεις, αλλά να καταστούν προσβάσιμα και στις μικρές, οικογενειακές μονάδες που χαρακτηρίζουν την ελληνική ελαιοκαλλιέργεια.

Δ. Ανθεκτικότητα στην κλιματική αλλαγή

Υπό το πρίσμα των κλιματικών προβλέψεων για αυξανόμενη ξηρασία και πίεση στους υδατικούς πόρους της Μεσογείου, η ευφυής διαχείριση της άρδευσης αναδεικνύεται σε στρατηγική προσαρμογής. Η ικανότητα διατήρησης της παραγωγής και της ποιότητας υπό συνθήκες περιορισμένου νερού καθιστά τη γεωργία ακριβείας αναγκαίο εργαλείο για τη μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα και βιωσιμότητα του ελαιοκομικού τομέα.

7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με βάση τα κενά και τους περιορισμούς που εντοπίστηκαν, διατυπώνονται τέσσερις προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Πρώτον, προτείνεται η διεξαγωγή μελετών που να συνδέουν άμεσα την άρδευση με τη φαινολική και οργανοληπτική σύσταση του ελαιολάδου των κυρίαρχων ελληνικών ποικιλιών, υπό τις τοπικές εδαφοκλιματικές συνθήκες.

Δεύτερον, προτείνεται η ανάπτυξη πολυετών πειραμάτων που να λαμβάνουν υπόψη την παρενιαυτοφορία, ώστε να αποτιμηθούν οι μακροπρόθεσμες επιδράσεις των αρδευτικών στρατηγικών πέρα από τις βραχυχρόνιες διακυμάνσεις του κύκλου καρποφορίας.

Τρίτον, προτείνεται η έρευνα προς την κατεύθυνση προσιτών, χαμηλού κόστους τεχνολογικών λύσεων, ειδικά προσαρμοσμένων στη δομή της ελληνικής ελαιοκαλλιέργειας με τις μικρές και συχνά ετερογενείς εκμεταλλεύσεις, ώστε να αρθούν τα εμπόδια υιοθέτησης.

Τέταρτον, προτείνεται η διερεύνηση της ολοκληρωμένης σύζευξης των αναδυόμενων ψηφιακών τεχνολογιών —τεχνητής νοημοσύνης, υπερφασματικής απεικόνισης, ψηφιακών διδύμων— με στόχους ταυτόχρονης βελτιστοποίησης ποιότητας, εξοικονόμησης πόρων και κλιματικής προσαρμογής, ώστε η ευφυής άρδευση να εξελιχθεί σε ένα πλήρως ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων.

Επίλογος

Η επίδραση της άρδευσης στην ποιότητα του ελαιολάδου αποτελεί ένα πεδίο όπου η αγρονομική επιστήμη, η φυσιολογία του φυτού και η σύγχρονη τεχνολογία συναντώνται με άμεσες πρακτικές συνέπειες. Η παρούσα εργασία ανέδειξε ότι η σχέση αυτή, αν και σύνθετη και πολυπαραγοντική, διέπεται από κατανοητές αρχές: η ελεγχόμενη υδατική καταπόνηση, εφαρμοσμένη στο σωστό φαινολογικό στάδιο και με την κατάλληλη ένταση, μπορεί να ενισχύσει το φαινολικό προφίλ του ελαιολάδου διατηρώντας την παραγωγή σε αποδεκτά επίπεδα. Το κρίσιμο ζήτημα δεν είναι πλέον το «αν», αλλά το «πώς» —και εδώ

ακριβώς η γεωργία ακριβείας προσφέρει τα εργαλεία που μετατρέπουν τη γνώση σε εφαρμογή. Για την ελληνική ελαιοκαλλιέργεια, που συνδυάζει μακρά παράδοση με σημαντικές προκλήσεις δομής, κλίματος και ανταγωνισμού, η ευφυής διαχείριση της άρδευσης δεν αποτελεί πολυτέλεια αλλά αναγκαιότητα. Η αξιοποίηση των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας, προσαρμοσμένων στις ελληνικές συνθήκες και προσβάσιμων στους μικρούς παραγωγούς, μπορεί να συμβάλει καθοριστικά τόσο στην ποιοτική αναβάθμιση του ελληνικού ελαιολάδου όσο και στη βιωσιμότητα ενός τομέα που παραμένει θεμελιώδης για την αγροτική οικονομία και την πολιτιστική ταυτότητα της χώρας. Η μετάβαση αυτή απαιτεί συντονισμένη προσπάθεια έρευνας, πολιτικής και πρακτικής εφαρμογής, ώστε οι δυνατότητες που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία να μετουσιωθούν σε απτό όφελος για τον Έλληνα ελαιοπαραγωγό και καταναλωτή.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Ακολουθούν οι βιβλιογραφικές αναφορές (πηγές) της Διπλωματικής Εργασίας.

Agam, N., Segal, E., Peeters, A., Levi, A., Dag, A., Yermiyahu, U. & Ben-Gal, A.

(2013) 'Spatial distribution of water status in irrigated olive orchards by thermal imaging', *Precision Agriculture*, 14(6), pp. 660–676.

Ahumada-Orellana, L.E., Ortega-Farías, S. & Searles, P.S. (2018) 'Olive oil quality response to irrigation cut-off strategies in a super-high density orchard', *Agricultural Water Management*, 202, pp. 81–88.

Alexopoulos, A., Koutras, K., Ben Ali, S., Puccio, S., Carella, A., Ottaviano, R. & Kalogeras, A. (2023) 'Complementary use of ground-based proximal sensing and airborne/spaceborne remote sensing techniques in precision agriculture: a systematic review', *Agronomy*, 13(7), 1942.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO.

Aparicio-Ruiz, R., Tena, N. & García-González, D.L. (2022) 'An international survey on olive oils quality and traceability: opinions from the involved actors', *Foods*, 11(7), 1045.

Avşar, E. & Mowla, M.N. (2022) 'Wireless communication protocols in smart agriculture: A review on applications, challenges and future trends', *Ad Hoc Networks*, 136, 102982

Ayars J.E., Zaccaria D. & Khaled M. Bali (2024) 'Introduction', Chapter 1 in *Microirrigation for Crop Production: Design, Operation and Management*. Elsevier, pp. 1–26.

- Barazani O., Dag A. & Zachary Dunseth (2023)** 'Olive history and domestication in the Southern Levant', *Frontiers in Plant Science*, 14:1131557.
- Barranco, D., Fernández-Escobar, R. & Rallo, L. (2017)** *El Cultivo del Olivo*. 7th edn. Madrid: Mundi-Prensa.
- Beauchamp G. K., Russell S. J. Keast, Diane Morel, Jianming Lin, Jana Pika, Qiang Han, Chi-Ho Lee, Amos B. Smith & Paul A. S. Breslin (2005)** 'Phytochemistry: ibuprofen-like activity in extra-virgin olive oil', *Nature*, 437(7055), pp. 45–46.
- Beltrán G. , Aguilera M.P., Del Rio C., Sanchez S. & Martinez, L. (2005)** 'Influence of fruit ripening process on the natural antioxidant content of Hojiblanca virgin olive oils', *Food Chemistry*, 89(2), pp. 207–215.
- Ben-Gal, A., Dag, A., Basheer, L., Yermiyahu, U., Zipori, I. & Kerem, Z. (2011)** 'The influence of bearing cycles on olive oil quality response to irrigation', *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(21), pp. 11667–11675.
- Berenguer, M.J., Vossen, P.M., Grattan, S.R., Connell, J.H. & Polito, V.S. (2006)** 'Tree irrigation levels for optimum chemical and sensory properties of olive oil', *HortScience*, 41(2), pp. 427–432.
- Calderón, R., Navas-Cortés, J.A. & Zarco-Tejada, P.J. (2015)** 'Early detection and quantification of Verticillium wilt in olive using hyperspectral and thermal imagery over large areas', *Remote Sensing*, 7(5), pp. 5584–5610.
- Caruso, G., Gucci, R., Sifola, M.I., Selvaggini, R., Urbani, S., Esposto, S., Taticchi, A. & Servili, M. (2017)** 'Irrigation and fruit canopy position modify oil quality of olive trees (cv. Frantoio)', *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(11), pp. 3530–3539.
- Clodoveo, M.L. (2012)** 'Malaxation: influence on virgin olive oil quality.' Past, present and future – an overview', *Trends in Food Science & Technology*, 25(1), pp. 13–23.
- Colombo, S. & Perujo-Villanueva, M. (2017)** 'Analysis of the spatial relationship between small olive farms...', *Land Use Policy*, 63, pp. 226–235.
- Connor, D.J. & Fereres, E. (2005)** 'The physiology of adaptation and yield expression in olive', *Horticultural Reviews*, 31, pp. 155–229.
- Connor, D.J., Gómez-del-Campo, M., Rousseaux, M.C. & Searles, P.S. (2014)** 'Structure, management and productivity of hedgerow olive orchards: a review', *Scientia Horticulturae*, 169, pp. 71–93.
- Corwin, D.L. & Lesch, S.M. (2005)** 'Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture', *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1–3), pp. 11–43.
- Covas, M.-I. (2008)** 'Bioactive effects of olive oil phenolic compounds in humans...', *Inflammopharmacology*, 16(5), pp. 216–218.

- Cramer W., Guiot, J., Fader M., Garrabou J., Gattuso J.-P., Iglesias A., Lange M.A., Lionello P., Llasat M.C., Paz S., Peñuelas J., Snoussi M., Toreti A., Tsimplis M.N. & Xoplaki E. (2018)** 'Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean', *Nature Climate Change*, 8, pp. 972–980.
- Crespo, N., Pádua, L., Paredes, P., Rebollo, F.J., Moral, F.J., Santos, J.A. & Fraga, H. (2025)** 'Spatial–temporal dynamics of vegetation indices in response to drought across two traditional olive orchard regions in the Iberian Peninsula', *Sensors*, 25(6), 1894.
- Czerwińska, M., Kiss, A.K. & Naruszewicz, M. (2012)** 'A comparison of antioxidant activities of oleuropein and its dialdehydic derivative, oleacein', *Food Chemistry*, 131(3), pp. 940–947.
- Diamantakos, P., Ioannidis, K., Papanikolaou, C., Tsolakou, A., Rigakou, A., Melliou, E. & Magiatis, P. (2021)** 'A new definition of the term "high-phenolic olive oil" based on large scale statistical data of Greek olive oils analyzed by qNMR', *Molecules*, 26(4), 1115.
- Díez, C.M., Trujillo, I., Martinez-Urdiroz, N., Barranco, D., Rallo, L., Marfil, P. & Gaut, B.S. (2015)** 'Olive domestication and diversification in the Mediterranean Basin', *New Phytologist*, 206(1), pp. 436–447.
- Egea, G., Padilla-Díaz, C.M., Martinez-Guanter, J., Fernández, J.E. & Pérez-Ruiz, M. (2017)** 'Assessing a crop water stress index derived from aerial thermal imaging and infrared thermometry in super-high density olive orchards', *Agricultural Water Management*, 187, pp. 210–221.
- El Riachy M., Priego-Capote F., León L., Rallo L. & Luque de Castro M.D. (2011)** 'Hydrophilic antioxidants of virgin olive oil. Part 2: Biosynthesis and biotransformation of phenolic compounds in virgin olive oil as affected by agronomic and processing factors', *European Journal of Lipid Science and Technology*, 113(6), pp. 692–707.
- Espadas-Aldana, G., Vialle, C., Belaud, J.-P., Vaca-Garcia, C. & Sablayrolles, C. (2019)** 'Analysis and trends for life cycle assessment of olive oil production', *Sustainable Production and Consumption*, 19, pp. 216–230.
- European Commission (2012)** Commission Regulation (EU) No 432/2012 of 16 May 2012, OJ L 136, pp. 1–40.
- FAO (2023)** AQUASTAT: FAO Global *Information System on Water and Agriculture*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fernández, J.E. (2014)** 'Understanding olive adaptation to abiotic stresses as a tool to increase crop performance', *Environmental and Experimental Botany*, 103, pp. 158–179.

- Fernández, J.E., Alcón, F., Díaz-Espejo, A., Hernández-Santana, V. & Cuevas, M.V. (2020)** 'Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard', *Agricultural Water Management*, 237, 106074.
- Fernández, J.E., Perez-Martin, A., Torres-Ruiz, J.M., Cuevas, M.V., Rodriguez-Dominguez, C.M., Elsayed-Farag, S., Morales-Sillero, A., García, J.M., Hernandez-Santana, V. & Diaz-Espejo, A. (2013)** 'A regulated deficit irrigation strategy for hedgerow olive orchards with high plant density', *Plant and Soil*, 372(1–2), pp. 279–295.
- Fotia, K., Mehmeti, A., Tsirogiannis, I., Nanos, G., Mamolos, A.P., Malamos, N., Barouchas, P. & Todorović, M. (2021)** 'LCA-based environmental performance of olive cultivation in Northwestern Greece: from rainfed to irrigated through conventional and smart crop management practices', *Water*, 13(14), 1954.
- Fountas, S., Aggelopoulou, K., Bouloulis, C., Nanos, G.D., Wulfsohn, D., Gemtos, T.A., Paraskevopoulos, A. & Galanis, M. (2011)** 'Site-specific management in an olive tree plantation', *Precision Agriculture*, 12(2), pp. 179–195.
- Fraga, H., Moriondo, M., Leolini, L. & Santos, J.A. (2020)** 'Mediterranean olive orchards under climate change: a review of future impacts and adaptation strategies', *Agronomy*, 11(1), 56.
- Freixa, E., Gil, J.M., Tous, J. & Hermoso, J.F. (2011)** 'Comparative study of the economic viability of high- and super-high-density olive orchards in Spain', *Acta Horticulturae*, 924, pp. 247–254.
- García-Garvía, J.M., Sánchez-Bravo, P., Hernández, F., Sendra, E., Corell, M., Moriana, A., Burgos-Hernández, A. & Carbonell-Barrachina, Á.A. (2022)** 'Effect of regulated deficit irrigation on the quality of Arbequina extra virgin olive oil produced on a super-high-intensive orchard', *Agronomy*, 12(8), 1892.
- Gómez-del-Campo, M. (2013)** 'Summer deficit-irrigation strategies in a hedgerow olive orchard cv. Arbequina: effect on fruit characteristics and yield', *Irrigation Science*, 31(3), pp. 259–269.
- Gómez-Rico, A., Salvador, M.D., Moriana, A., Pérez, D., Olmedilla, N., Ribas, F. & Fregapane, G. (2007)** 'Phenolic and volatile compounds of extra virgin olive oil (*Olea europaea* L. cv. Cornicabra) with regard to fruit ripening and irrigation management', *Food Chemistry*, 100(2), pp. 568–578.
- González-Dugo, V., Zarco-Tejada, P., Nicolás, E., Nortes, P.A., Alarcón, J.J., Intrigliolo, D.S. & Fereres, E. (2013)** 'Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard', *Precision Agriculture*, 14(6), pp. 660–678.

- Grattan, S.R., Berenguer, M.J., Connell, J.H., Polito, V.S. & Vossen, P.M. (2006)** 'Olive oil production as influenced by different quantities of applied water', *Agricultural Water Management*, 85(1–2), pp. 133–140.
- Grossi, M., Palagano, R., Bendini, A., Riccò, B., Servili, M., García-González, D.L. & Gallina Toschi, T. (2023)** 'Field-deployable determinations of peroxide index and total phenolic content in olive oil using a promising portable sensor system', *Sensors*, 23(11), 5002.
- Gu, Z., Qi, Z., Burghate, R., Yuan, S., Jiao, X. & Xu, J. (2020)** 'Irrigation scheduling approaches and applications: A review', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(6), 04020007.
- Gucci, R. & Cantini, C. (2000)** *Pruning and Training Systems for Modern Olive Growing*. CSIRO Publishing.
- Gucci, R., Caruso, G., Gennai, C., Esposto, S., Urbani, S. & Servili, M. (2019)** 'Fruit growth, yield and oil quality changes induced by deficit irrigation at different stages of olive fruit development', *Agricultural Water Management*, 212, pp. 88–98.
- Hellenic Republic, Ministry of Foreign Affairs (n.d.)** A Taste of Greece: Famous Products. Available at: mfa.gr
- Iniesta, F., Testi, L., Orgaz, F. & Villalobos, F.J. (2009)** 'The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees', *European Journal of Agronomy*, 30(4), pp. 258–265.
- International Olive Council (2023)** World Olive Oil and Table Olive Figures: World Market. Madrid: IOC.
- International Olive Council (2025)** World Olive Oil and Table Olive Figures: Production. Madrid: IOC.
- International Society of Precision Agriculture (ISPA) (2019)** Precision Ag Definition. Available at: ispag.org (Accessed: 11 June 2026).
- IPCC (2022)** Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability (AR6, WGII). Cambridge University Press.
- Jones, S.B., Wraith, J.M. & Or, D. (2005)** 'Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors', *Vadose Zone Journal*, 4, pp. 1048–1058.
- Kakkavou, K., Gemtou, M. & Fountas, S. (2024)** 'Drivers and barriers to the adoption of precision irrigation technologies in olive and cotton farming—Lessons from Messenia and Thessaly regions in Greece', *Smart Agricultural Technology*, 7, 100401.
- Kamienski, C., Soininen, J.P., Taumberger, M., Dantas, R., Toscano, A., Cinotti, T.S., Maia, R.F. & Torre Neto, A. (2019)** 'Smart Water Management Platform: IoT-Based Precision Irrigation for Agriculture', *Sensors*, 19(2), 276.

- Kaniewski, D., Marriner, N., Terral, J.-F., Besnard, G., Tsitsou, L., Topsakal, J., Morhange, C., Otto, T., Luce, F. & Cheddadi, R. (2025)** 'Olive production in the 21st century will be threatened by water stress and declining solar activity', *Communications Earth & Environment*, 6, 268.
- Kourgialas, N.N., Psarras, G., Morianou, G., Pisinaras, V., Koubouris, G., Digalaki, N., Malliaraki, S., Aggelaki, K., Motakis, G. & Arampatzis, G. (2022)** 'Good agricultural practices related to water and soil as a means of adaptation of Mediterranean olive growing to extreme climate-water conditions', *Sustainability*, 14(20), 13673.
- Lamm, F.R. & Camp, C.R. (2007)** 'Subsurface drip irrigation', Chapter 13 in *Microirrigation for Crop Production*. Elsevier, pp. 473–551.
- Lan, J. & Ban, Q. (2025)** 'The farm-level economic and environmental benefits of precision agriculture technology adoption: a meta-analysis of global evidence', *Sustainability*, 17(24), 11223.
- Langgut, D., Cheddadi, R., Carrión, J.S., Cavanagh, M., Colombaroli, D., Eastwood, W.J., Greenberg, R., Litt, T., Mercuri, A.M., Miebach, A., Roberts, C.N., Woldring, H. & Woodbridge, J. (2019)** 'The origin and spread of olive cultivation in the Mediterranean Basin: The fossil pollen evidence', *The Holocene*, 29(5), pp. 902–922.
- Lavee, S. (1996)** 'Biology and physiology of the olive', in *World Olive Encyclopaedia*. Barcelona: Plaza & Janés, pp. 59–110.
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J. & Rhind, D.W. (2015)** *Geographic Information Systems and Science*. 4th edn. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Loures, L., Chamizo, A., Ferreira, P., Loures, A., Castanho, R. & Panagopoulos, T. (2020)** 'Assessing the effectiveness of precision agriculture management systems in Mediterranean small farms', *Sustainability*, 12(9), 3765.
- Maes, W.H. & Steppe, K. (2012)** 'Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review', *Journal of Experimental Botany*, 63(13), pp. 4671–4712.
- Manocha, A., Sood, S.K. & Bhatia, M. (2024)** 'IoT-digital twin-inspired smart irrigation approach for optimal water utilization', *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 41, 100947.
- Mansoor S., Iqbal S., Popescu S.M., Kim S.L., Chung Y.S. & Baek J.-H. (2025)** 'Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture: trends, challenges and future perspectives', *Frontiers in Plant Science*.
- Mendes, J., Lima, J., Costa, L. & Pereira, A.I. (2025)** 'Empowering olive cultivation with artificial intelligence: a systematic literature review on advancements and prospects', *Soft Computing*, 29.

- Mesías-Ruiz, G.A., Pérez-Ortiz, M., Dorado, J., de Castro, A.I. & Peña, J.M. (2023)** 'Boosting precision crop protection towards agriculture 5.0 via machine learning and emerging technologies: a contextual review', *Frontiers in Plant Science*, 14, 1143326.
- Mizik, T. (2023)** 'How can precision farming work on a small scale? A systematic literature review', *Precision Agriculture*, 24, pp. 384–406.
- Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M. & Fereres, E. (2003)** 'Yield responses of a mature olive orchard to water deficits', *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(3), pp. 425–431.
- National Research Council (1997)** *Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management*. Washington, DC: National Academies Press.
- O'Grady, M.J., Langton, D. & O'Hare, G.M.P. (2019)** 'Edge computing: a tractable model for smart agriculture?', *Artificial Intelligence in Agriculture*, 3, pp. 42–51.
- Olive Oil Times (2023)** Bulk Exports from Greece Help Fuel the Italian Olive Oil Industry. Available at: oliveoiltimes.com (Accessed: 10 June 2026).
- Orgaz, F., Testi, L., Villalobos, F.J. & Fereres, E. (2006)** 'Water requirements of olive orchards – II', *Irrigation Science*, 24, pp. 77–84.
- Pagano, A., Amato, F., Ippolito, M., De Caro, D., Croce, D., Motisi, A., Provenzano, G. & Tinnirello, I. (2023)** 'Machine learning models to predict daily actual evapotranspiration of citrus orchards under regulated deficit irrigation', *Computers and Electronics in Agriculture*, 199, 107145.
- Pascazio, S., Crecchio, C., Scagliola, M., Mininni, A.N., Dichio, B., Xiloyannis, C. & Sofo, A. (2018)** 'Microbial-based soil quality indicators in irrigated and rainfed soil portions of Mediterranean olive and peach orchards under sustainable management', *Agricultural Water Management*, 195, pp. 172–179.
- Patumi, M., d'Andria, R., Marsilio, V., Fontanazza, G., Morelli, G. & Lanza, B. (2002)** 'Olive and olive oil quality after intensive monocone olive growing (*Olea europaea* L., cv. Kalamata) in different irrigation regimes', *Food Chemistry*, 77(1), pp. 27–34.
- Petridis, A., Therios, I., Samouris, G., Koundouras, S. & Giannakoula, A. (2012)** 'Effect of water deficit on leaf phenolic composition, gas exchange, oxidative damage and antioxidant activity of four Greek olive cultivars', *Plant Physiology and Biochemistry*, 60, pp. 1–11.
- Psarras, G., Kasapakis, I., Stefanoudaki, E., Papadakis, I. & Chartzoulakis, K.S. (2011)** 'Effect of different irrigation regimes on olive tree (*Olea europaea* L., Koroneiki) physiology, yield and fruit quality', *Acta Horticulturae*, 888, pp. 79–85.
- Rallo, L., Barranco, D., Díez, C.M., Rallo, P., Suárez, M.P., Trapero, C. & Pliego-Alfaro, F. (2018)** 'Strategies for Olive (*Olea europaea* L.) Breeding: Cultivated

- Genetic Resources and Crossbreeding’, in Al-Khayri, J.M., Jain, S.M. & Johnson, D.V. (eds.) *Advances in Plant Breeding Strategies: Fruits*. Cham: Springer, pp. 535–600.
- Ramos, A., Rapoport, H.F., Cabello, D. & Rallo, L. (2018)** ‘Chilling accumulation, dormancy release temperature, and the role of leaves in olive reproductive budburst...’, *Scientia Horticulturae*, 231, pp. 241–252.
- Romero-Gámez, M., Castro-Rodríguez, J. & Suárez-Rey, E.M. (2017)** ‘Optimization of olive growing practices in Spain from a life cycle assessment perspective’, *Journal of Cleaner Production*, 149, pp. 25–37.
- Rugini E., Baldoni L., Muleo R. & Sebastiani L. (eds.) (2016)** *The Olive Tree Genome. Compendium of Plant Genomes*. Cham: Springer.
- Salmoral, G., Aldaya, M.M., Chico, D., Garrido, A. & Llamas, R. (2011)** ‘The water footprint of olives and olive oil in Spain’, *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4), pp. 1089–1104.
- Sena-Moreno, E., Pardo, J.E., Álvarez-Ortí, M., Gómez, R. & Martínez-Larrañaga, M.Á. (2018)** ‘Influence of water deficit in bioactive compounds of olive paste and oil content’, *Journal of the American Oil Chemists’ Society*, 95(4), pp. 513–524.
- Servili M., Esposto S., Fabiani R., Urbani S., Taticchi A., Moriucci F., Selvaggini R. & Montedoro G.F. (2009)** ‘Phenolic compounds in olive oil: antioxidant, health and organoleptic activities according to their chemical structure’, *Inflammopharmacology*, 17(2), pp. 76–84.
- Sharma, H., Sidhu, H. & Bhowmik, A. (2025)** ‘Remote sensing using unmanned aerial vehicles for water stress detection: a review focusing on specialty crops’, *Drones*, 9(4), 241.
- Siakou, M., Bruggeman, A., Eliades, M., Zoumides, C., Djuma, H., Kyriacou, M.C., Emmanouilidou, M.G., Spyros, A., Manolopoulou, E. & Moriana, A. (2021)** ‘Effects of deficit irrigation on ‘Koroneiki’ olive tree growth, physiology and olive oil quality at different harvest dates’, *Agricultural Water Management*, 258, 107200.
- Solomou, A.D. & Sfougaris, A.I. (2021)** ‘Contribution of Agro-Environmental Factors to Yield and Plant Diversity of Olive Grove Ecosystems (*Olea europaea* L.) in the Mediterranean Landscape’, *Agronomy*, 11(1), 161.
- Torres M., Pierantozzi P., Searles P., Rousseaux M.C., García-Inza G., Miserere A., Bodoira R., Contreras C. & Maestri D. (2017)** ‘Olive cultivation in the Southern Hemisphere: flowering, water requirements and oil quality responses to new crop environments’, *Frontiers in Plant Science*.
- Tsouros, D.C., Bibi, S. & Sarigiannidis, P.G. (2019)** ‘A review on UAV-based applications for precision agriculture’, *Information*, 10(11), 349.

- Tzerakis, K., Psarras, G. & Kourgialas, N.N. (2023)** ‘Developing an open-source IoT platform for optimal irrigation scheduling and decision-making: implementation at olive grove parcels’, *Water*, 15(9), 1739.
- Velasco, J. & Dobarganes, C. (2002)** — "Oxidative stability of virgin olive oil." *European Journal of Lipid Science and Technology*, 104(9-10), 661-676.
- Villa-Henriksen, A., Edwards, G.T.C., Pesonen, L.A., Green, O. & Sørensen, C.A.G. (2020)** 'Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential', *Biosystems Engineering*, 191, pp. 60–84.
- Wahbi, S., Wakrim, R., Aganchich, B., Tahi, H. & Serraj, R. (2005)** 'Effects of partial rootzone drying (PRD) on adult olive tree (*Olea europaea*) in field conditions under arid climate. I. Physiological and agronomic responses', *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 106(2–3), pp. 289–301.
- Whalley, W.R., Ober, E.S. & Jenkins, M. (2013)** 'Measurement of the matric potential of soil water in the rhizosphere', *Journal of Experimental Botany*, 64(13), pp. 3951–3966.
- Zarco-Tejada P.J., Camino C., Beck P.S.A., Calderon R., Hornero A., Hernández-Clemente R., Kattenborn T., Montes-Borrego M., Susca L., Morelli M., Gonzalez-Dugo V., North P.R.J., Landa B.B., Boscia D., Saponari M. & Navas-Cortes J.A. (2018)** ‘Previsual symptoms of *Xylella fastidiosa* infection revealed in spectral plant-trait alterations’, *Nature Plants*, 4(7), pp. 432–439.
- Zarco-Tejada, P.J., González-Dugo, V. & Berni, J.A.J. (2012)** 'Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera', *Remote Sensing of Environment*, 117, pp. 322–337.
- Zhang, N., Wang, M. & Wang, N. (2002)** 'Precision agriculture—a worldwide overview', *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2–3), pp. 113–132.

Κούνας - Μαχαίρας Θεόδωρος “Η επίδραση της άρδευσης στην ποιότητα ελαιολάδου με τη χρήση εργαλείων γεωργίας ακριβείας στην ελαιοκαλλιέργεια.”

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.