



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

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αξιολόγηση της επίδρασης της διαχείρισης αρδευτικού νερού στο
περιβαλλοντικό αποτύπωμα επιτραπέζιας ελιάς ποικιλίας Κονσερβολιά

ΦΩΤΙΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ

ΒΟΛΟΣ, 2022

Αξιολόγηση της επίδρασης της διαχείρισης αρδευτικού νερού στο
περιβαλλοντικό αποτύπωμα επιτραπέζιας ελιάς ποικιλίας Κονσερβολιά

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

1. Γεώργιος Δ. Νάνος (Επιβλέπων)

Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Δενδροκομίας

2. Ιωάννης Α. Τσιρογιάννης (Μέλος)

Αν. Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Γεωπονίας, Εργαστήριο Παραγωγικής Γεωργίας και Φυτοϋγείας

3. Ανδρέας Μαμώλος (Μέλος)

Καθηγητής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Εργαστήριο Οικολογίας και Προστασίας περιβάλλοντος

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

1. Γεώργιος Δ. Νάνος

Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Δενδροκομίας

2. Ιωάννης Α. Τσιρογιάννης

Αν. Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Γεωπονίας, Εργαστήριο Παραγωγικής Γεωργίας και Φυτοϋγείας

3. Ανδρέας Μαμώλος

Καθηγητής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Εργαστήριο Οικολογίας και Προστασίας περιβάλλοντος

4. Νικόλαος Κατσούλας

Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος

5. Βασίλειος Αντωνιάδης

Αν. Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Εδαφολογίας

6. Περσεφόνη Μαλέτσικα

Επ. Καθηγήτρια, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Δενδροκομίας

7. Γεώργιος Κουμπούρης

Ερευνητής Β, Ινστιτούτο Ελιάς, Υποτροπικών Φυτών και Αμπέλου Χανίων, ΕΛΓΟ ΔΗΜΗΤΡΑ

ΦΩΤΙΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ

Αξιολόγηση της επίδρασης της διαχείρισης αρδευτικού νερού στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα επιτραπέζιας ελιάς ποικιλίας Κονσερβολιά

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας έχουν παρουσιαστεί στις παρακάτω δημοσιευμένες εργασίες:

Fotia, Konstantina, Mehmeti, A., Tsirogiannis, I., Nanos, G., Mamolos, A. P., Malamos, N., Barouchas P. and Todorovic, M. (2021). Lca-based environmental performance of olive cultivation in northwestern Greece: from rainfed to irrigated through conventional and smart crop management practices. *Water (Switzerland)*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/w13141954>

Fotia, Konstantina, Nanos, G., Barouchas, P., Giannelos, M., Linardi, A., Vallianatou, A., Mpeza P. and Tsirogiannis, I. (2022). Growth Development, Physiological Status and Water Footprint Assessment of Nursery Young Olive Trees (*Olea europaea* L. 'Konservolea') Irrigated with Urban Treated Wastewater. *Resources*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/resources11050040>

Fotia, K.; Tsirogiannis, I.; Baltzoi, P.; Barouchas, P.; Malamos, N.; Mantzos, N.; Zisis, K.; Nanos, G.D. (2019) Evaluation of water footprint for table olive groves of *Olea europaea* L. Konservolea IX Int. Symp. Irrig. Hortic. Crop. 39, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1335.50>

Fotia, K., Nanos, G., Malamos, N., Giannelos, M., Mpeza, P., Tsirogiannis, I., (2022) Water Footprint and performance assessment of a table olive cultivar (*Olea europaea* L. 'Konservolea') under various irrigation strategies. Proceedings of 31st International Horticultural Congress, ISHS (to be published in Acta Horticulturae -December 2022)



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF AGRICULTURAL SCIENCES
DEPARTMENT OF AGRICULTURE CROP PRODUCTION AND RURAL
ENVIRONMENT
LABORATORY OF POMOLOGY

PHD DISSERTATION

Evaluation of irrigation water management on the environmental footprint
of table olive trees cv. Konservolea

FOTIA KONSTANTINA

VOLOS, 2022

Φωτιά Κωνσταντίνα 2022, Αξιολόγηση της επίδρασης της διαχείρισης αρδευτικού νερού στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα επιτραπέζιας ελιάς ποικιλίας Κονσερβολιά. Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος

Προκαταρκτικές σελίδες: 27, Σελίδες: 154, Αριθμός Πινάκων: 37, Αριθμός Διαγραμμάτων: 23, Αριθμός Εικόνων: 28, Αριθμός Βιβλιογραφικών Αναφορών: 192

Περίληψη

Το ενδιαφέρον της ανθρωπότητας για την ανάπτυξη παραγωγικών πρακτικών συμβατών με τη δίκαιη ικανοποίηση των αναγκών του παγκόσμιου πληθυσμού, αλλά και του περιβάλλοντος που αποτελεί το ζωτικό πλαίσιο επιβίωσής του, έχει αυξηθεί στην εποχή μας, υπό το βάρος σημαντικών πιέσεων αναφορικά με τη διαθεσιμότητα φυσικών πόρων. Η υιοθέτηση φιλοπεριβαλλοντικών πρακτικών σε όλο και περισσότερους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, και πιο συγκεκριμένα της παραγωγής τροφίμων, έχει ενσωματωθεί στις νομοθετικές πράξεις των περισσότερων αναπτυγμένων κρατών και το ζητούμενο πλέον είναι η εφαρμογή τους, η παρακολούθηση της αποτελεσματικότητάς τους και η αναβάθμισή τους. Σημαντική συνεισφορά στο σχεδιασμό, την εφαρμογή και αξιολόγηση αυτών των πρακτικών έχουν τα εργαλεία και οι μεθοδολογίες αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, η ανάπτυξη των οποίων αποτελεί δυναμικό πεδίο έρευνας της επιστημονικής κοινότητας τις τελευταίες δυο δεκαετίες.

Ένας από τους πιο ευαίσθητους φυσικούς πόρους που απειλείται από τις άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στον πλανήτη είναι το νερό και η ανάπτυξη στρατηγικών βιώσιμης διαχείρισης των υδάτινων πόρων του πλανήτη αποτελεί στόχο πρωτοβουλιών σε παγκόσμιο επίπεδο όπως η Ατζέντα 2030 των κρατών μελών του ΟΗΕ για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη. Οι πρακτικές εξοικονόμησης νερού βρίσκουν κύρια εφαρμογή στη γεωργία, που αποτελεί το μεγαλύτερο χρήστη νερού παγκοσμίως και αναπτύσσονται σε πολλά επίπεδα, από τη μείωση της εφαρμοζόμενης ποσότητας νερού μέχρι την αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών νερού.

Τα ελαιοκομικά προϊόντα, λόγω της αποδεδειγμένης πλέον σύνδεσής τους με σημαντικά οφέλη για την υγεία του ανθρώπου, απέκτησαν τη θέση τους στο τραπέζι των περισσότερων καταναλωτών των ανεπτυγμένων χωρών. Η ζήτησή τους συνεχίζει να σημειώνει αυξητική τάση, με αποτέλεσμα η ελαιοκαλλιέργεια να αποτελεί σημαντικό οικονομικό πυλώνα για τις ελαιοπαραγωγικές χώρες και να επεκτείνεται σε πάρα πολλές περιοχές του πλανήτη. Η εντατικοποίηση αυτή απαιτεί την κατανάλωση περισσότερων φυσικών πόρων και ιδιαίτερα νερού, ενώ παράλληλα συνδέεται με την αύξηση των εκπεμπόμενων ρύπων και την υποβάθμιση του περιβάλλοντος.

Σε αυτό το πλαίσιο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να διερευνηθεί η δυνατότητα διασφάλισης της περιβαλλοντικής και εμπορικής βιωσιμότητας της εντατικοποίησης της καλλιέργειας της ελιάς με πρακτικές εξοικονόμησης νερού.

Στην παρούσα εργασία, με σκοπό τη διερεύνηση του παραπάνω ζητήματος, μελετήθηκε η επίδραση διαφορετικών πρακτικών εξοικονόμησης νερού στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα της επιτραπέζιας ποικιλίας Κονσερβολιά (*Olea europaea* L. 'Konservolea') που κατευθύνθηκαν είτε

στη μείωση της ποσότητας νερού εφαρμόζοντας, με τη βοήθεια εξειδικευμένων συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων άρδευσης (DSS), ορθολογική άρδευση είτε στην αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών νερού για άρδευση όπως τα επεξεργασμένα αστικά απόβλητα. Αξιολογήθηκε η επίδραση των πρακτικών αυτών στην ποσότητα και την ποιότητα των υδάτινων πόρων με την εφαρμογή της Ανάλυσης του Υδατικού Αποτυπώματος (WF), αλλά και πιο διευρυμένα στο περιβάλλον με την εφαρμογή της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment, LCA). Η διατριβή αποτελείται από 5 κεφάλαια όπου περιγράφονται οι δράσεις προσέγγισης του κύριου ζητήματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η υφιστάμενη κατάσταση όσον αφορά τη χρήση των παγκοσμίων υδατικών αποθεμάτων και τα προβλήματα που συνεπάγεται αυτή, αναλύονται οι δύο μεθοδολογίες αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που εφαρμόζονται στην παρούσα εργασία, γίνεται συζήτηση για τη σημασία της ελαιοκαλλιέργειας στην ελληνική οικονομία και τίθενται οι στόχοι της παρούσας έρευνας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται οι δράσεις για την αξιολόγηση της επίδρασης διαφορετικών πρακτικών άρδευσης της Κονσερβολιάς στα υδατικά αποθέματα και στην ποιότητα των υδάτινων αποδεκτών και τη σύνδεσή τους με την ποσοτική και ποιοτική απόδοση της καλλιέργειας. Για την αξιολόγηση αυτή ως κατάλληλο εργαλείο επιλέχθηκε η ανάλυση του WF. Αρχικά με τη διεξαγωγή μιας πιλοτικής μελέτης για ένα χρόνο (2018) σε ελαιώνες της περιοχής Άρτας αποτυπώθηκαν σε πρώτο επίπεδο οι επικρατούσες αγρονομικές πρακτικές στην ελαιοκαλλιέργεια της περιοχής και οι περιβαλλοντικές τους επιδράσεις. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής έδωσαν μια πρώτη εικόνα του WF της καλλιέργειας στην περιοχή και ανέδειξαν σημεία της μεθοδολογικής προσέγγισης που συνυπολογίστηκαν κατά το σχεδιασμό του κύριου πειράματος. Τα επόμενα τρία συνεχόμενα έτη, από το 2019 έως και το 2021, σε αντιπροσωπευτικό ελαιώνα της περιοχής εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές πρακτικές άρδευσης, σε επίπεδο εφαρμοζόμενης ποσότητας νερού, και αναλύθηκε το αντίστοιχο WF των καλλιεργειών. Εφαρμόστηκαν η ξηρική καλλιέργεια, η συμβατική άρδευση (με βάση την εμπειρία του παραγωγού) και η ορθολογική άρδευση με βάση τη συμβουλή που παρείχε το σύστημα DSS που λειτουργεί στην πεδιάδα της Άρτας, το IRMA_SYS. Για τη συσχέτιση με την απόδοση της καλλιέργειας έγινε παρακολούθηση παραμέτρων που αφορούσαν την ανάπτυξη του δένδρου, τη φυσιολογική του κατάσταση (μέσω του προσδιορισμού της συγκέντρωσης δεικτών καταπόνησης) και την ποιότητα των καρπών. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν τη μεγαλύτερη ευαισθησία της ξηρικής καλλιέργειας στην καταπόνηση που συνδέεται με το κλίμα γεγονός που μεγενθύνει το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα. Προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση της δυνατότητας να μειώσουν οι ξηρικές καλλιέργειες την εξάρτησή τους από τον ανασφαλή παράγοντα κλίμα μέσω της βελτίωσης της αξιοποίησης βρόχινου νερού, καθώς και της μείωσης του WF_{grey} των ξηρικών καλλιεργειών μέσω της εφαρμογής ορθολογικής ή βιολογικής λίπανσης ή της τμηματικής εφαρμογής της εφόσον υπάρχει πρόσβαση σε νερό. Το μικρότερο WF σημείωσε η μεταχείριση όπου η άρδευση βασίστηκε στις συμβουλές από το DSS. Η μεταχείριση αυτή έδειξε καλή επίδοση από πλευράς ανάπτυξης και ποιότητας παραγωγής, σημείωσε όμως οριακά μικρότερη ποσότητα παραγωγής σε σχέση με τη μεταχείριση που αρδεύτηκε με βάση την εμπειρία του παραγωγού. Η κατά 5% όμως μικρότερη παραγωγή της

μεταχείρισης DSS, αντισταθμίζει την κατά 77% περισσότερη εφαρμοζόμενη ποσότητα αρδευτικού νερού που εφαρμόστηκε στη μεταχείριση συμβατικής άρδευσης. Η ανάλυση του WF και τα συνολικά ευρήματα της συγκεκριμένης ενότητας εργασίας επιβεβαίωσε την συμβατότητα των DSS συστημάτων άρδευσης με τις φιλοπεριβαλλοντικές πρακτικές δίνοντας παράλληλα και προτάσεις για τη βελτίωση των δυνατοτήτων των πρακτικών εξοικονόμησης νερού.

Στο τρίτο κεφάλαιο διερευνήθηκε η αξιολόγηση της γενικότερης επίδρασης των τριών πρακτικών άρδευσης στο περιβάλλον. Καταλληλότερο εργαλείο για την αξιολόγηση αυτή αποτελεί η LCA. Έτσι πραγματοποιήθηκε μια LCA των συστημάτων ελαιοκαλλιέργειας στην πεδιάδα της Άρτας συγκρίνοντας τρεις διαφορετικές αρδευτικές πρακτικές: την ξηρική, τη συμβατική άρδευση με βάση την εμπειρία του παραγωγού, και την άρδευση με βάση τη συμβουλή άρδευσης που παρέχει το DSS που λειτουργεί στην περιοχή. Δεκαοκτώ επιπτώσεις ενδιαμέσου σημείου (κλιματική αλλαγή, έλλειψη νερού, οξίνιση, ευτροφισμός υδάτων κτλ.), δυο κατηγορίες επιπτώσεων τελικού σημείου (ζημιά στην ανθρώπινη υγεία και στην ποιότητα του οικοσυστήματος) και ένα ενιαίο αποτέλεσμα (οι συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις) υπολογίστηκαν με τη μέθοδο εκτίμησης επιπτώσεων κύκλου ζωής IMPACT World+ χρησιμοποιώντας το λογισμικό OpenLCA v1.10.3. Η LCA πραγματοποιήθηκε για δυο λειτουργικές μονάδες, την ποσότητα του παραγόμενου προϊόντος (1 τόνος) και την καλλιεργούμενη έκταση (1 ha) ώστε να διερευνηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε επίπεδο παραγωγής και σε επίπεδο καλλιέργειας. Τα όρια του συστήματος καθορίστηκαν εντός των ορίων του ελαιώνα, «από τη γέννηση μέχρι την πύλη» (from cradle-to-farm gate). Με βάση τα αποτελέσματα της LCA για λειτουργική μονάδα τον 1 τόνο παραγόμενου προϊόντος οι αρδευόμενες μεταχειρίσεις είχαν τις χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς είχαν υψηλότερη παραγωγή σε σύγκριση με την ξηρική. Σε επίπεδο όμως καλλιεργήσιμης έκτασης, με λειτουργική μονάδα το 1 ha, οι αρδευόμενες μεταχειρίσεις επέδειξαν τις υψηλότερες επιπτώσεις. Η ορθολογική άρδευση με τη βοήθεια του DSS μείωσε τη χρήση νερού και ενέργειας κατά 42,1% σε σύγκριση με τη συμβατική άρδευση. Αυτό μεταφράστηκε σε μια μείωση των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων της τάξης του 5,3% για κάθε τόνο παραγόμενου προϊόντος και 10,4% για κάθε εκτάριο καλλιεργήσιμης έκτασης. Η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε έδειξε ότι τα οφέλη θα μπορούσαν να αυξηθούν μέχρι και 18% για κάθε τόνο παραγόμενου προϊόντος και 22,6% για κάθε εκτάριο καλλιεργήσιμης γης. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας ενισχύουν την επιλογή των DSS ως υποσχόμενα εργαλεία για την υποστήριξη της βιώσιμης εντατικοποίησης των καλλιεργητικών συστημάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αξιολογήθηκε η επίδραση της εφαρμογής εναλλακτικών πηγών νερού για άρδευση στα υδατικά αποθέματα και στην ποιότητα των υδάτινων αποδεκτών. Για την αξιολόγηση αυτή αξιοποιήθηκε το WF. Επιλέχθηκε να εξεταστεί η εφαρμογή επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων σε δενδρύλλια Κονσερβολιάς. Αρχικά αξιολογήθηκαν οι επιδράσεις των επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων στην ανάπτυξη με παρακολούθηση σχετικών παραμέτρων αύξησης του φυτού και της βιομάζας του και τη φυσιολογική κατάσταση των φυτών με παρακολούθηση της συγκέντρωσης φωτοσυνθετικών χρωστικών και δεικτών καταπόνησης. Συγκρίθηκε η επίδοσή τους στις παραμέτρους αυτές με την αντίστοιχη των φυτών που αρδεύτηκαν με «καθαρό» νερό (νερό δικτύου) και των φυτών των οποίων το εδαφικό υπόστρωμα εμπλουτίστηκε με ζεόλιθο. Σε κάθε μεταχείριση προσδιορίστηκε και η συγκέντρωση των μακρό- και μικρό-θρεπτικών στο εδαφικό υπόστρωμα αλλά και στα μέρη των φυτών (φύλλα

και ρίζες). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η άρδευση των δενδρυλλίων με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα δεν επέφερε επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανάπτυξη και τη φυσιολογική κατάσταση των φυτών. Στις περισσότερες παραμέτρους ανάπτυξης τα φυτά που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα απόβλητα έδειξαν εφάμιλλη και, σε μερικές περιπτώσεις, καλύτερη επίδοση σε σύγκριση με τα φυτά που αρδεύτηκαν με καθαρό νερό. Κατά την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδρασης της πρακτικής αυτής, το WF υπολογίστηκε με μια νέα προσέγγιση, η οποία εισάγει στον υπολογισμό το διαχωρισμό της πηγής προέλευσης του νερού. Η ανάλυση του WF έδειξε ότι η εφαρμογή των εναλλακτικών πηγών άρδευσης αποτελεί σημαντικό μέτρο εξοικονόμησης επιφανειακών πόρων νερού, καθώς μπορούν να αντικαταστήσουν το 90% της εφαρμοζόμενης ποσότητας καθαρού νερού. Παράλληλα υπολογίστηκε το WF σε δενδρύλλια ελιάς που αναπτύσσονται σε τοπικά φυτώρια, όπου εφαρμόζεται η συνήθης αρδευτική πρακτική της περιοχής, για να δοθεί μια πραγματική τάξη μεγέθους της συνεισφοράς των εναλλακτικών πηγών άρδευσης στην εξοικονόμηση και προστασία των υδάτινων πόρων της περιοχής. Το συμπέρασμα που προέκυψε από τη συγκεκριμένη ενότητα εργασίας ήταν ότι τα επεξεργασμένα αστικά απόβλητα για την άρδευση δενδρυλλίων Κονσερβολιάς, τουλάχιστον για μικρή περίοδο της ανάπτυξής τους, μπορεί με ασφάλεια να αντικαταστήσει τους επιφανειακούς υδάτινους πόρους συνεισφέροντας στη διασφάλιση της ποσότητας αλλά και της ποιότητάς τους.

Συνδυάζοντας τα επιμέρους ευρήματα στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται τα συνολικά συμπεράσματα και οι μελλοντικές προοπτικές της παρούσας εργασίας. Γενικά υπογραμμίζεται η σημαντική συμβολή των πρακτικών εξοικονόμησης νερού στην προστασία των υδάτινων πόρων και του περιβάλλοντος, αλλά και στη διασφάλιση της ποιοτικής και ποσοτικής απόδοσης της καλλιέργειας όπως προκύπτει από τα ευρήματα της παρούσας εργασίας. Η αποτύπωση των επιπτώσεων στα υδατικά αποθέματα ή και γενικότερα στο περιβάλλον των διάφορων πρακτικών εξοικονόμησης επιφανειακών υδάτων που αξιολογήθηκαν στην παρούσα εργασία, ανέδειξε ζητήματα η ανάλυση των οποίων συμβάλλει στη βελτίωση του σχεδιασμού στρατηγικών ορθολογικής διαχείρισης των υδάτων τουλάχιστον σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης. Έτσι, η επισήμανση της πιθανότητας χαμηλής περιβαλλοντικής απόδοσης των ξηρικών καλλιεργειών λόγω της άμεσης εξάρτησής τους από τις κλιματολογικές συνθήκες, όπως προέκυψε και από την ανάλυση WF αλλά και από την LCA, έδωσε μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για τη διαχείριση μιας πρακτικής άρδευσης που γενικά αναμένεται να έχει χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Και οι δυο μεθοδολογίες (WF και LCA) εντόπισαν στην ξηρική καλλιέργεια, ως αιτία του υψηλού περιβαλλοντικού της αποτυπώματος, τη χαμηλή τελική παραγωγή, η οποία αυξάνει και το μέγεθος των επιπτώσεων των εφαρμοζόμενων καλλιεργητικών πρακτικών και ιδιαίτερα της λίπανσης. Στο πλαίσιο αυτό προτάθηκε η διερεύνηση της δυνατότητας «εμπλουτισμού» της άρδευσης κατά τα κρίσιμα στάδια της καλλιέργειας μέσω της συλλογής βρόχινου νερού για τη διασφάλιση της τελικής παραγωγής αλλά και την τμηματική εφαρμογή της λίπανσης. Ακόμα και αν αυτό μετατρέπει την ξηρική καλλιέργεια σε ορθολογικά αρδευόμενη αξίζει να διερευνηθεί περαιτέρω το περιβαλλοντικό κέρδος μιας τέτοιας πρακτικής. Η τελευταία παρατήρηση ενδυναμώνει το κοινό εύρημα των δύο μεθοδολογιών, ότι η ορθολογική άρδευση που βασίζεται στη συμβουλή που παρέχει ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων άρδευσης είναι η πρακτική που «αφήνει» το χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, επιβεβαιώνοντας το ρόλο της στην προστασία των υδάτινων πόρων και γενικότερα του περιβάλλοντος. Επιπλέον η θετική συσχέτιση με την απόδοση των φυτών είτε αναφερόμαστε στην ανάπτυξη και τη φυσιολογική κατάσταση του ελαιόδεντρου είτε στην τελική παραγωγή και την ποιότητα των καρπών του

ενισχύει την αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης αρδευτικής πρακτικής. Η αξιολόγηση της εφαρμογής εναλλακτικών πηγών νερού για την άρδευση στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας διεύρυνε τις περιβαλλοντικές δυνατότητες της ορθολογικής άρδευσης. Η θετική επίδραση της εφαρμογής των επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων στην ανάπτυξη και τη φυσιολογική κατάσταση νεαρών δενδρυλλίων ελιάς παρείχε την επιβεβαίωση της δυνατότητας αξιοποίησης τους για τη μερική ή ολική αντικατάσταση των επιφανειακών υδάτων ως μια ασφαλής εναλλακτική πηγή άρδευσης. Στο πλαίσιο αυτό προτείνεται η διεύρυνση της αξιολόγησης και άλλων εναλλακτικών πηγών άρδευσης όπως τα επεξεργασμένα απόβλητα ελαιοουργείων ή της εφαρμογής τους σε μεγαλύτερη κλίμακα. Η μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας εργασίας, που αξιοποίησε δυο διαφορετικές μεθοδολογίες αποτίμησης των επιπτώσεων μιας διεργασίας στους υδάτινους πόρους και αποδέκτες (WF) και στο περιβάλλον γενικότερα (LCA) παρείχε μια ολοκληρωμένη εικόνα και έδωσε τη δυνατότητα λεπτομερούς εντοπισμού των “hotspots” των διαφορετικών πρακτικών άρδευσης της ελαιοκαλλιέργειας της περιοχής. Η περαιτέρω διερεύνηση της προοπτικής της συνδυαστικής εφαρμογής των δύο μεθοδολογιών αναμένεται να προσφέρει περισσότερο ακριβή αποτύπωση της συσχέτισης των διεργασιών με το περιβάλλον και τους φυσικούς πόρους, παρέχοντας περισσότερη πληροφορία για το σχεδιασμό φιλοπεριβαλλοντικών πρακτικών παραγωγής. Τα ευρήματα της παρούσας εργασίας εμπλουτίζουν τις βάσεις WF και LCA δεδομένων για τη συγκεκριμένη καλλιέργεια και μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω στο πεδίο του σχεδιασμού σχετικών στρατηγικών διαχείρισης των υδατικών πόρων.

Abstract

Increasing signs of pressure on natural resources have lead humanity's interest in developing eco-compatible production patterns that meet, in a fair manner, all people's needs and sustain environment's life-supporting capacities. The adoption of environmentally-friendly production practices across the economic sectors has been incorporated in the legislation of most of the world's developed countries setting their implementation, and monitoring their efficiency and improvement as the next goal. Environmental Impact Assessment tools and methodologies make a significant contribution to the planning, implementation and evaluation of such eco-friendly strategies and their development is a dynamic field of research during the last two decades.

Water is one of the most vulnerable, directly and indirectly, natural resources due to anthropogenic activities. The development of sustainable water management strategies constitutes a goal of many global initiatives such as the Agenda 2030 for Sustainable Development, adopted by all United Nations' Member States. Fresh water saving practices, developed either towards the minimization of the applied quantity or towards its substitution by alternative water resources, are largely applied in agriculture, the major fresh water user globally.

Olive products have attracted the interest of most consumers living in developed countries, mainly due to their scientifically-proven healthy attributes. The increasing demand for such products has set olive sector as an important economic pillar in olive producing countries but also has led to the expansion of olive cultivation in many other countries around the world. This intensification in olive production is supported by the overexploitation of natural resources, especially fresh water resources, while it is also linked to increased emissions and environmental degradation.

In this framework, it is interesting to investigate the potential that the application of fresh water saving practices has on ensuring the environmental and commercial sustainability of intensified olive cultivation.

In order to address the aforementioned issue, the present dissertation investigates the effect of different fresh water saving practices on the environmental impact of a Greek table olive cultivar, Konservolea (*Olea europaea* L. 'Konservolea'). These practices aimed at the minimization of the applied irrigation quantity, through the implementation of rational irrigation based on the advice of Decision Support Systems (DSS) and at the substitution of freshwater through the utilization of alternative water resources such as Treated Waste Water (TWW). The effect of these practices on the quantity of water resources and the quality of receiving water bodies was evaluated conducting a Water Footprint (WF) accounting, while the overall environmental effect was evaluated by the Life Cycle Assessment (LCA). The thesis is comprised of five chapters that describe the main activities implemented in order to approach the core issue.

The first chapter provides the introductory framework of the present work. The current situation regarding water use and global and regional pressure on water resources is described, the environmental impact assessment methodologies used in the present work are analysed, the olive market situation, trends and perspectives are discussed, and, finally, the goals and scope of the present work are set.

Chapter two describes the activities on the assessment of the effect of water saving irrigation practices on water resources and receiving water bodies and their correlation to the crop's performance. WF accounting was considered as the most adequate tool to perform the assessment. At first place, a one-year pilot study was performed at olive orchards in the plain of Arta (NW Greece) that provided a general depiction of the local agronomic practices and their environmental impact. The findings were taken into consideration during the drawing of the main experimental design which was conducted at a representative olive orchard at the same site the following three subsequent years (2019-2021). Three irrigation practices were evaluated: rainfed (no irrigation), irrigation according to farmer's experience (conventional irrigation), and irrigation based on the advice of IRMA_SYS, a DSS that operates in the area (rational irrigation management). The crop's performance assessment was achieved by monitoring parameters related to the trees' development, physiological status, and yield and fruit quality. Results emphasized the greater sensitivity of rainfed cultivation to climatic conditions (drought) which increases its WF despite the fact that it is generally considered to be the most water saving method. The possibility of decreasing the rainfed's dependence on the insecure weather factor by collecting and applying rain water at least during the critical stages of plant and fruit growth was discussed. Additionally, the WF_{grey} decrease through the application of rational or organic fertilisation or the application of lower quantities of fertilisers in doses over time throughout the cultivation period was also proposed to be further examined. The DSS treatment had the smallest WF among all treatments. Olive trees irrigated based on the DSS advice performed equally or in some cases better in terms of plant development, physiological status or fruit quality, when compared to the conventionally irrigated trees. Their 5% decreased yield offsets the 77% more water that was applied to the conventionally irrigated treatment. The present section's findings confirmed the compatibility of DSS irrigation with environmentally friendly practices and define the potentials of water saving strategies' improvement.

In the third chapter the assessment of the effect of water saving practices was extended to the overall environmental level. For this, an LCA study was performed as the most relevant methodology. The environmental impact of three irrigation practices (rainfed, conventional irrigation and DSS irrigation) at olive orchards in the plain of Arta was assessed. Eighteen midpoints, two endpoints, and a single score (overall environmental impact) were quantified using the IMPACT World+ life cycle impact assessment method. The LCA model was set up using the OpenLCA software v1.10.3. The study was performed using two functional units: the final yield (1 Mg of table olives) and the cultivated area (1 ha of olive orchard) and on a cradle-to-farm gate perspective. Irrigated systems had the lowest environmental impacts at the product level (per mass unit) due to higher yields, but showed the highest impacts per cultivated area unit. The DSS-based irrigation management could reduce water and energy use by 42.1% compared to conventional irrigation. This could achieve a reduction of 5.3% per 1 Mg and 10.4% per 1 ha of the total environmental impact. A sensitivity analysis of impact assessment models demonstrated that the benefits could be up to 18% for 1 Mg of product or 22.6% for 1 ha of cultivated land. These results outline that DSS-based irrigation is a promising option to support less resource-intensive and sustainable intensification of irrigated agricultural systems in the plain of Arta.

The fourth chapter describes the evaluation of the impact the application of alternative water resources for irrigation has on water resources and receiving water bodies. The WF accounting was performed on nursery young olive trees irrigated with treated waste water. Initially, the suitability of treated waste water for short time irrigation of young olive trees was assessed by monitoring their development and physiological status. The results showed that irrigation with TWW did not have any adverse effect on plant growth and development. Plants irrigated with TWW performed equally, if not better, in the growth and physiological parameters measured when compared to plants irrigated with tap water. Stress indicators such as total phenols and proline revealed that TWW did not induce any additional stress. WF was computed with an approach which introduces already from the computational phase the distinguishing of the water resources. The WF results showed that the TWW application for irrigation could save up to 90% of freshwater resources. The WF was also computed for local olive nurseries in order to provide a magnitude of water saving that could be achieved through the application of TWW. The overall findings of this section underline the potential of TWW to replace freshwater safely for irrigation purposes for at least a short period during olive nursery plant development contributing in this way to freshwater resources protection.

Combining the findings of each section, the fifth chapter provides the overall conclusions and future perspectives of the present work. The important contribution of water saving irrigation practices in the protection of fresh water resources and the environment but also in crop performance is underlined. The assessment of the impacts of different irrigation practices on freshwater resources and the environment brought on surface issues that can improve the drawing of water management strategies at least at water basin level. Both WF accounting and LCA highlighted the low environmental performance a rainfed cultivation is prone to adverse climatic conditions (drought), which affect its final yield. Both WF and LCA pointed out that the low final yield of rainfed olive trees is the main reason for their high environmental footprint. Because of the low final yield the impact of other agronomic practices applied, such as fertilisation, becomes greater. In this context, further investigation of rainwater harvesting and its application during the critical stages of a rainfed olive cultivation in order to ensure final yield and the incremental fertiliser application are proposed, even if this practice automatically converts rainfed to rationally irrigated cultivation. The latter emphasizes the joint finding of both methodologies that rational irrigation practices based on a DSS advice is the irrigation strategy with the lowest environmental impacts, confirming its contribution to freshwater resources and environmental protection. Furthermore, the positive correlation with plant's performance and fruit quality enhances DSS's efficiency. The alternative water application for irrigation assessment expanded the environmental possibilities of rational irrigation. The positive effect of TWW irrigation on young olive trees' performance and physiological status confirmed their application as a safe and eco-compatible alternative of freshwater resources. In this context, further investigation of the suitability of other alternative water resources such as the olive mill waste water or their broader application is proposed. Finally, the present dissertation's methodological approach that combined two different environmental impact assessment methodologies is discussed. WF computation provided a detailed evaluation of a procedure's impact on water

resources and receiving waterbodies quality, and LCA provided an overall environmental impact assessment. The combination of both methodologies clearly depicted the impacts and identified the hotspots of different irrigation practices applied in olive cultivation. The further investigation of the joint application of these methodologies for the more accurate definition of the correlation between a procedure and its impact on the environment and the natural resources is proposed. This could provide additional information needed for the drawing of environmentally friendly production practices. The present work's findings enrich the WF and LCA data basis for the particular crop and can be further exploited in the field of water saving strategies development.

Ευχαριστίες

Όμως κάποια αποτυπώματα αξίζει να παραμένουν. Σε όλη αυτή τη διαδικασία, η συνεργασία και η αλληλεπίδραση με υπέροχους ανθρώπους άφησαν το σημαντικότερο αποτύπωμα.

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου, τη βαθύτατη εκτίμηση και σεβασμό στον Επιβλέποντα της διδακτορικής διατριβής, κύριο Νάνο Γεώργιο, Καθηγητή Δενδροκομίας του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η επιστημονική του πληρότητα και η πολύχρονη πείρα του αποτέλεσαν οδηγό στο σχεδιασμό και στη εκπόνηση της παρούσας διατριβής. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου για την ευκαιρία που μου έδωσε, την υποστήριξη και κυρίως την καθοδήγησή του σε όλη τη διάρκεια της διατριβής καθώς και για το παράδειγμα δουλειάς και ζωής που δίνει. Οι επιστημονικές συμβουλές του, οι καταλυτικές παρατηρήσεις και διορθώσεις του καθώς επίσης και η διάθεση των μέσων και των υποδομών του εργαστηρίου του, κατέστησαν δυνατή την ολοκλήρωση του έργου αυτού.

Με την ίδια θερμή θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Τσιρογιάννη Ιωάννη, μέλος της τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, Αν. Καθηγητή Αρδεύσεων του Τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, έναν άνθρωπο και επιστήμονα που σέβομαι και θαυμάζω βαθύτατα και που ο χαρακτήρας του, η προσωπικότητά του και η δουλειά του αποτελούν έμπνευση χρόνια τώρα. Μαζί με τον Καθηγητή Νάνο Γεώργιο αποτέλεσαν τον πυρήνα του σχεδιασμού αυτού του έργου. Χωρίς την καθοριστική συμβολή του, την καθοδήγησή του, τις συμβουλές του, τις διορθώσεις του, τις πολύωρες συζητήσεις, την υποστήριξη και συμπαράστασή του σε κάθε επίπεδο καθώς και τη διάθεση των απαιτούμενων πόρων δε θα μπορούσε να γίνει δυνατή η πραγματοποίηση της παρούσας διατριβής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Μαμώλο Ανδρέα, Καθηγητή στο τμήμα Γεωπονίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης και τρίτο μέλος της Συμβουλευτικής Επιτροπής. Οι παρατηρήσεις του και συμβουλές στο πεδίο των περιβαλλοντικών αποτυπωμάτων και επιπτώσεων και ειδικότερα στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής ήταν σημαντικές για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω από καρδιάς τον αγαπημένο και χειμαρρώδη κύριο Κίττα Κωνσταντίνο, Ομότιμο Καθηγητή στο Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Παν/μίου Θεσσαλίας για τη συμβολή του στην πραγματοποίηση του όλου εγχειρήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, τον κύριο Νικόλαο Κατσούλα, Καθηγητή Γεωργικών Κατασκευών και Θερμοκηπίων του Παν/μίου Θεσσαλίας, τον κύριο Βασίλειο Αντωνιάδη, Αν. Καθηγητή Εφαρμοσμένης Εδαφολογίας του Παν/μίου Θεσσαλίας, την κυρία Περσεφόνη Μαλέτσικα, Επ. Καθηγήτρια Δενδροκομίας-Ελαιοκομίας του Παν/μίου Θεσσαλίας και τον κύριο Γεώργιο Κουμπούρη, Κύριο Ερευνητή στο Ινστιτούτο Ελιάς, Υποτροπικών Φυτών και Αμπέλου του ΕΛΓΟ ΔΗΜΗΤΡΑ, για το χρόνο τους και τη συμβολή τους στην βελτίωση της παρούσας διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω και όλους εκείνους που συνεργάστηκα και με βοήθησαν σε πολλά επίπεδα. Θα ήθελα να ευχαριστήσω οπωσδήποτε και ιδιαίτερα την κυρία Γεωργουδάκη Τριανταφυλλιά, υποψήφια Διδάκτορα του Εργ. Δενδροκομίας του Παν/μίου Θεσσαλίας για τη

βοήθειά της στις μετρήσεις ποιότητας καρπών και γενικά για την υποστήριξή της σε όλη τη διάρκεια της διατριβής και φυσικά την κυρία Παναγιωτάκη Ευαγγελία, μέλος ΕΔΙΠ του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος για τις συμβουλές της πάνω στις αναλυτικές διαδικασίες. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Παντελή Μπαρούχα, Αν. Καθηγητή του τμήματος Γεωπονίας του Παν/μίου Πατρών και την κα Μπέζα Βιβή, Επ. Καθηγήτρια στο τμήμα Γεωπονίας του Παν/μίου Ιωαννίνων για τη διάθεση των εργαστηρίων τους και τη βοήθειά τους στην διεξαγωγή των εργαστηριακών αναλύσεων που έλαβαν χώρα στο πλαίσιο της διατριβής. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω για τη βοήθειά τους τις συναδέλφους μου και Υπ. Διδ. του Τμήματος Γεωπονίας του Παν/μίου Ιωαννίνων Μπαλτζώη Πηνελόπη και Λαμπράκη Ελένη και τις/τους φοιτήτριες/τες Μάρκο Γιαννέλο, Κατερίνα Λιναρδή, Κατερίνα Βαλλιανάτου καθώς και τον Andi Mehmeti PhD., επιστημονικό συνεργάτη στο Mediterranean Agronomic Institute of Bari (MAIB). Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα λατρεμένα μου Ανθή Βρατσίστα και Βασίλη Βρατσίστα για την πολύτιμη παρουσία και βοήθεια στους χώρους των πειραμάτων, τον αγαπημένο Βασίλη Μπουκουβάλα για τη βοήθεια στις αγρονομικές εργασίες που έλαβαν χώρα σε όλα τα πειράματα, καθώς και τους ελαιοκαλλιεργητές της Γραμμενίτσας Άρτας που διέθεσαν τους ελαιώνες τους για την πραγματοποίηση των πειραμάτων της παρούσας διατριβής.

Αφήνω για το τέλος το πιο σημαντικό κομμάτι της ζωής μου, την οικογένειά μου καθώς και τους ανθρώπους που έχω την τύχη να αποκαλώ οικογένειά μου. Ένα τεράστιο ευχαριστώ από καρδιάς πρώτα από όλα στα παιδιά μου, την Ανθή μου και το Βασίλη μου, στο σύντροφό μου και σε όλους τους δικούς μου ανθρώπους για τη στήριξη, την κατανόηση και την υπομονή τους όλο αυτό το διάστημα.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	vi
Abstract	xi
Ευχαριστίες.....	xv
Πίνακας Εικόνων.....	xx
Πίνακας Πινάκων	xxii
Πίνακας Διαγραμμάτων	xxv
Πίνακας Εξισώσεων	xxvii
Πίνακας Συντομογραφιών –Ακρωνυμίων – Συμβόλων*	xxix
1 Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή.....	1
1.1 Παγκόσμια αποθέματα και χρήση νερού σήμερα	1
1.2 Υφιστάμενη και μελλοντική πίεση στα υδατικά αποθέματα σε παγκόσμιο επίπεδο (ως συνέπεια της κλιματικής αλλαγής)	5
1.2.1 Παγκόσμιες δράσεις για την προστασία των υδατικών αποθεμάτων	6
1.3 Εκτίμηση Υδατικού Αποτυπώματος	7
1.3.1 Μεθοδολογία Εκτίμησης του Υδατικού Αποτυπώματος EYA (Water Footprint Assessment – WFA)	9
1.3.2 Μεθοδολογία υπολογισμού του Υδατικού Αποτυπώματος καλλιεργειών	17
1.4 Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) –Life Cycle Assessment (LCA)	21
1.4.1 Μεθοδολογία διεξαγωγής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA).....	21
1.5 Διαφορές στην υπολογιστική προσέγγιση των διαφορετικών WF.....	29
1.6 Ελιά.....	30
1.6.1 Καλλιέργεια ελιάς στη μεσόγειο και στον κόσμο	30
1.6.2 Βασικά στοιχεία καλλιέργειας ελιάς	31
1.6.3 Κονσερβολιά.....	33
1.7 Σκοπός Διατριβής	34
2 Κεφάλαιο 2^ο: Υπολογισμός Υδατικού Αποτυπώματος και εκτίμηση απόδοσης καλλιέργειας ελιάς ποικιλίας «Κονσερβολιά Άρτας» υπό διαφορετικές πρακτικές άρδευσης.....	36
2.1 Περίληψη.....	36
2.2 Εισαγωγή	37
2.3 Σκοπός ενότητας εργασίας.....	38
2.4 Γενικά στοιχεία περιοχής διεξαγωγής των πειραμάτων.....	39
2.5 ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ: Υπολογισμός WF Κονσερβολιάς Άρτας σε 4 ελαιώνες.....	42
2.5.1 Υλικά και Μέθοδοι	42

2.5.2	Αποτελέσματα – Συζήτηση	45
2.5.3	Συμπεράσματα	51
2.6	ΚΥΡΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑ: Υπολογισμός Υδατικού Αποτυπώματος τριών διαφορετικών πρακτικών αρδευσης και η επίδραση τους στην ανάπτυξη, φυσιολογική κατάσταση, παραγωγή και ποιότητα καρπών	52
2.6.1	Υλικά και Μέθοδοι	52
2.6.2	Αποτελέσματα – Συζήτηση	63
2.6.3	Συμπεράσματα	76
3	Κεφάλαιο 3 ^ο : Ανάλυση Κύκλου Ζωής καλλιέργειας ελιάς στη Βορειοδυτική Ελλάδα: Από την ξηρική στη συμβατικά αρδευόμενη και στην αρδευόμενη μέσω πρακτικών ευφυούς γεωργίας	78
3.1	Περίληψη	78
3.2	Εισαγωγή	78
3.3	Υλικά και μέθοδοι	80
3.3.1	Περιοχή μελέτης	80
3.3.2	Μεθοδολογία	82
3.3.3	Καθορισμός του σκοπού και του πεδίου εφαρμογής της LCA	83
3.3.4	Απογραφικά Δεδομένα LCA	85
3.3.5	Εκτίμηση επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (Life Cycle Impact Assessment)	87
3.4	Αποτελέσματα – Συζήτηση	90
3.4.1	Συγκριτικά αποτελέσματα των επιπτώσεων μέσου σημείου (Midpoint)	90
3.4.2	Κυριες κατηγορίες επιπτώσεων	93
3.4.3	Επιπτώσεις τελικού σημείου και συνολική περιβαλλοντική επίπτωση	95
3.4.4	Ανάλυση αβεβαιότητας	97
3.4.5	Ανάλυση ευαισθησίας της μεθόδου LCA	101
3.5	Συμπεράσματα	105
4	Κεφάλαιο 4 ^ο : Εκτίμηση της Ανάπτυξης, Φυσιολογικής Κατάστασης και Υδατικού Αποτυπώματος δενδρυλλίων ελιάς ποικιλίας Κονσερβολιάς Άρτας αρδευόμενες με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα	106
4.1	Περίληψη	106
4.2	Εισαγωγή	107
4.2.1	Ελαιοκαλλιέργεια επιτραπέζιες ελιές Άρτα Ελλάδα	107
4.2.2	Χρήση επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων για άρδευση	107
4.2.3	Δείκτες καταπόνησης φυτών	113
4.2.4	Χρήση ζεόλιθου	114

4.2.5	Υδατικό αποτύπωμα.....	114
4.3	Σκοπός	115
4.4	Υλικά και μέθοδοι.....	116
4.4.1	Πειραματική περιοχή και περίοδος	116
4.4.2	Φυτικό Υλικό και πειραματικές συνθήκες	116
4.4.3	Μεταχειρίσεις.....	116
4.4.4	Πηγές νερού άρδευσης	117
4.4.5	Υδατικές ανάγκες και πρόγραμμα άρδευσης	118
4.4.6	Μετρήσεις	119
4.4.7	Στατιστική ανάλυση.....	121
4.4.8	Υπολογισμός Υδατικού Αποτυπώματος	121
4.4.9	Υπολογισμός Υδατικού Αποτυπώματος στο τοπικό Φυτώριο	122
4.5	Αποτελέσματα – Συζήτηση.....	122
4.5.1	Ανάπτυξη φυτών	122
4.5.2	Φυσιολογική κατάσταση και καταπόνηση φυτών.....	124
4.5.3	Συγκέντρωση μακρό- και μικρό-στοιχείων στο έδαφος και στους φυτικούς ιστούς 127	
4.5.4	Υδατικό Αποτύπωμα (WF) δενδρυλλίων ελιάς αρδευόμενα με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα	131
4.5.5	Υδατικό Αποτύπωμα τοπικών φυτωρίων Κονσερβολιάς.....	132
4.6	Συμπεράσματα	133
5	Κεφάλαιο 5 ^ο : Συμπεράσματα.....	135
	Μελλοντικές προοπτικές	137
	Βιβλιογραφία	139

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.1 Χρήση νερού στον πλανήτη από το 1900 (προσαρμοσμένο από G IGB).....	1
Εικόνα 1.2 Φάσεις ανάλυσης του WF	9
Εικόνα 1.3 Ο υπολογισμός του WF μιας διεργασίας αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό όλων των υπολοίπων επιπέδων WF.....	11
Εικόνα 1.4 Βήματα εκτίμησης της βιωσιμότητας του WF σε μια γεωγραφική περιοχή	16
Εικόνα 1.5 Φάσεις LCA	21
Εικόνα 1.6 Φάσεις ΕΕΚΖ	23
Εικόνα 2.1 Πειραματική περιοχή στη Γραμμενίτσα Άρτας στη Βορειοδυτική Ελλάδα	39
Εικόνα 2.2 Συγκομιδή Κονσερβολιάς στην περιοχή. Ο καρπός συγκομίζεται πράσινος και ταυτόχρονα πραγματοποιείται ελαφρύ κλάδεμα	40
Εικόνα 2.3 Οι περιοχές του Αμβρακικού Κόλπου και της Άρτας που συμμετέχουν στο δίκτυο Natura (https://natura2000.eea.europa.eu/)	41
Εικόνα 2.4 Τοποθεσία ελαιώνων του πιλοτικού πειράματος.....	42
Εικόνα 2.5 Στιγμιότυπα από τη μηχανική ανάλυση των δειγμάτων χώματος από τους ελαιώνες	44
Εικόνα 2.6 Υδρόμετρα εγκατεστημένα στους χαρακτηριστικούς αγωγούς εφαρμογής του δικτύου άρδευσης για μέτρηση της ποσότητας εφαρμοζόμενης άρδευσης	44
Εικόνα 2.7 Πειραματική διάταξη.....	53
Εικόνα 2.8 Μέτρηση ανάπτυξης βλαστού. Διακρίνεται ο σημειωμένος βλαστός. Η μέτρηση ανάπτυξης πραγματοποιήθηκε από το σημείο σύμφυσης του ποδίσκου του 1ου καρπού μέχρι την άκρη του βλαστού πριν το σημείο έκπτυξης των νέων φύλλων (μπλε βέλος).	55
Εικόνα 2.9 Στιγμιότυπα από τη διαδικασία προσδιορισμού περιεκτικότητας ολικών φαινολικών στα φύλλα ελιάς.....	57
Εικόνα 2.10 Στιγμιότυπα από τη διαδικασία προσδιορισμού περιεκτικότητας προλίνης στα φύλλα ελιάς	58
Εικόνα 2.11 Στιγμιότυπα από τη διαδικασία προσδιορισμού περιεκτικότητας χρωστικών στα φύλλα ελιάς.....	58
Εικόνα 2.12 Δειγματοληψία ελαιόκαρπου στον αγρό.....	59
Εικόνα 2.13 Δείγματα ελαιόκαρπου για προσδιορισμό των ποιοτικών χαρακτηριστικών τους. Διακρίνονται οι καρποί των διαφορετικών επαναλήψεων των τριών μεταχειρίσεων τα τρία χρόνια του πειράματος	59
Εικόνα 2.14 Ζύγιση πυρήνων ελαιόκαρπου.....	60
Εικόνα 2.15 Μέτρηση της σκληρότητας της σάρκας του ελαιόκαρπου με τη βοήθεια του πενετρόμετρου.....	60

Εικόνα 2.16 Ζύγιση επιμήκων φετών από το περικάρπιο του ελαιόκαρπου και προετοιμασία για ξήρανση για τον προσδιορισμό του ξηρού βάρους της σάρκας	61
Εικόνα 2.17 Ο τρισδιάστατος ομοιόμορφος χρωματικός χώρος CIELAB.....	62
Εικόνα 2.18 Μέτρηση χρώματος φλοιού καρπού	63
Εικόνα 3.1 Χάρτης της Ελλάδας, της περιφέρειας Ηπείρου και της πεδιάδας της Άρτας στη Νοτιοδυτική Ελλάδα.....	81
Εικόνα 3.2 Διάγραμμα του πλαισίου LCA της παρούσας εργασίας	83
Εικόνα 3.3 Τα όρια του συστήματος για την LCA των συστημάτων παραγωγής επιτραπέζιας ελιάς	85
Εικόνα 4.1 Στιγμιότυπα από την πειραματική εγκατάσταση στο θερμοκήπιο	117

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά ελαιώνων.....	42
Πίνακας 2.2 Ιδιότητες των εδαφών των τεσσάρων ελαιώνων	46
Πίνακας 2.3 Αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης για τον προσδιορισμό του τύπου εδάφους των πειραματικών ελαιώνων	46
Πίνακας 2.4 Δεδομένα εφαρμοζόμενης άρδευσης και λίπανσης και συγκομιδή σε κάθε ελαιώνα για το έτος 2018	47
Πίνακας 2.5 Συνολικό Υδατικό Αποτύπωμα για κάθε ελαιώνα και η ανάλυση στην κάθε συνιστώσα. Περιλαμβάνονται και τα ποσοστά συμμετοχής της κάθε συνιστώσας στο WF_{total} .	48
Πίνακας 2.6 Χαρακτηριστικά πειραματικού ελαιώνα	52
Πίνακας 2.7 Συγκεντρωτικά για τα έτη 2019, 2020 και 2021 το ύψος βροχόπτωσης (mm) ανά εποχή, η μέγιστη θερμοκρασία (T_{max} , °C) κατά την περίοδο άνθισης και οι ώρες από 0°C έως 7.2 °C κατά τη διάρκεια του Δεκεμβρίου και Ιανουαρίου.....	66
Πίνακας 2.8 Αγρονομικά δεδομένα για τις τρεις μεταχειρίσεις τα τρία χρόνια του πειράματος (2019, 2020, 2021)	66
Πίνακας 2.9 Το συνολικό Υδατικό Αποτύπωμα WF_{tot} και τα επιμέρους συστατικά του για κάθε μεταχείριση (ξηρικό, παραγωγός και DSS) για κάθε πειραματικό έτος (2019, 2020, 2021).....	67
Πίνακας 2.10 Μέσοι όροι της συγκέντρωσης ολική χλωροφύλλης και καροτενοειδών στα φύλλα των δένδρων που δεχθηκαν τις διαφορετικές μεταχειρίσεις. (Διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη δείχνουν στατιστικά σημαντικά διαφορά σε $p>0,05$).....	72
Πίνακας 2.11 Μέσοι όροι της συγκέντρωσης ολικών φαινολών στα φύλλα των δένδρων που δέχθηκαν τις διαφορετικές μεταχειρίσεις. (Διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη δείχνουν στατιστικά σημαντικά διαφορά σε $p>0,05$).....	72
Πίνακας 2.12 Ποιοτικά χαρακτηριστικά που αφορούν το μέγεθος των καρπών, τη σκληρότητα και το σχήμα τους για τις τρεις μεταχειρίσεις τα τρία χρόνια του πειράματος. (Διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη δείχνουν στατιστικά σημαντικά διαφορά σε $p>0,05$).....	75
Πίνακας 2.13 Χρώμα φλοιού καρπών των διαφορετικών μεταχειρίσεων για τα τρία χρόνια του πειράματος (Διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη δείχνουν στατιστικά σημαντικά διαφορά σε $p>0,05$).....	75
Πίνακας 3.1 Κλιματικά δεδομένα της περιοχής μελέτης (EMY, 2022)	82
Πίνακας 3.2 Καλλιεργητικές εργασίες ανά εκτάριο ελαιώνα στους ελαιώνες στην πεδιάδα της Άρτας	84
Πίνακας 3.3 Απογραφικά δεδομένα για της LCA των συστημάτων ελαιοκαλλιέργειας στην πεδιάδα της Άρτας ανά εκτάριο καλλιεργούμενης έκτασης. Δίνεται ο μέσος όρος (μ.ο.) για κάθε παράμετρο καθώς και η ελάχιστη (min) και η μέγιστη τιμή (max).	86
Πίνακας 3.4 Οι κατηγορίες επιπτώσεων μέσου σημείου της IMPACT World+ μεθόδου και οι συντελεστές κανονικοποίησης και στάθμισης.	88

Πίνακας 3.5 Οι δείκτες ποιότητας των δεδομένων (Data Quality Indicators - DQI) των εισροών και εκροών για την ανάλυση αβεβαιότητας.	89
Πίνακας 3.6. Αποτελέσματα της LCA για 1 t παραγόμενου προϊόντος (ελαιόκαρπος) στην πεδιάδα της Άρτας για τα ξηρικά, τη συμβατική άρδευση (Παραγωγός) και τη DSS άρδευση. Σημείωση για τη χρωματική κλίμακα: πράσινο=χαμηλή επίπτωση, πορτοκαλί = μέτρια επίπτωση και κόκκινη = υψηλή επίπτωση	91
Πίνακας 3.7 Αποτελέσματα της LCA για 1 ha καλλιεργήσιμης έκτασης (ελαιώνας) στην πεδιάδα της Άρτας για τα ξηρικά, τη συμβατική άρδευση (Παραγωγός) και τη DSS άρδευση. Σημείωση για τη χρωματική κλίμακα: πράσινο=χαμηλή επίπτωση, πορτοκαλί = μέτρια επίπτωση και κόκκινη = υψηλή επίπτωση.	92
Πίνακας 3.8 Αποτελέσματα των δεικτών επιπτώσεων τελικού σημείου και ενιαίο αποτέλεσμα (single scores) για 1 t παραγόμενου ελαιόκαρπου και 1 ha καλλιεργήσιμης έκτασης ελαιώνα στην πεδιάδα της Άρτας για τα ξηρικά, τη συμβατική άρδευση (Παραγωγός) και τη DSS άρδευση (DSS).	98
Πίνακας 3.9 Αποτελέσματα της ανάλυσης αβεβαιότητας με τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo.	100
Πίνακας 3.10 Τα αποτελέσματα της LCA με τη μέθοδο ReCiPe 2016l.....	103
Πίνακας 3.11 Τα αποτελέσματα LCA με τη μέθοδο του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος (EF).	104
Πίνακας 4.1 Χημικά χαρακτηριστικά των δυο ειδών νερού που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα, νερό δικτύου (TaW), και επεξεργασμένα αστικά απόβλητα (TWW).....	118
Πίνακας 4.2 Συνολική μηνιαία ποσότητα άρδευσης που εφαρμόστηκε σε κάθε φυτό κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου.....	118
Πίνακας 4.3 Παράμετροι ανάπτυξης φυτών κάθε μεταχείρισης στο τέλος του πειράματος	124
Πίνακας 4.4 Περιεκτικότητα χλωροφύλλη α, χλωροφύλλη β, συνολική χλωροφύλλη και καροτενοειδή στα φύλλα των δενδρυλλίων ελιάς των διαφορετικών μεταχειρίσεων στο τέλος του πειράματος.....	124
Πίνακας 4.5 Συγκέντρωση των ολικών φαινολών στα φύλλα των δενδρυλλίων ελιάς των διαφορετικών μεταχειρίσεων στο τέλος τους πειράματος και κατά την ενδιάμεση δειγματοληψία).....	126
Πίνακας 4.6 Συγκέντρωση προλίνης στα φύλλα των δενδρυλλίων ελιάς των διαφορετικών μεταχειρίσεων στο τέλος τους πειράματος και κατά την ενδιάμεση δειγματοληψία.....	126
Πίνακας 4.7 Συγκέντρωση ολικού CaCO_3 , οργανικής ουσίας και ανταλλάξιμων βάσεων στο εδαφικό υπόστρωμα των δενδρυλλίων των διαφορετικών μεταχειρίσεων	129
Πίνακας 4.8 Συγκέντρωση μακρό- και μικρό-στοιχείων στο εδαφικό υπόστρωμα των δενδρυλλίων κάθε μεταχείρισης.....	129
Πίνακας 4.9 Συγκέντρωση μακρό- και μικρό-στοιχείων στα φύλλα των δενδρυλλίων κάθε μεταχείρισης	130

Πίνακας 4.10 Συγκέντρωση μακρό- και μικρό-στοιχείων στις ρίζες των δενδρυλλίων κάθε μεταχείρισης	130
Πίνακας 4.11 Υπολογισμός του WF των δενδρυλλίων ελιάς που αρδεύτηκαν με καθαρό νερό και με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα κατά τη διάρκεια του πειράματος	131
Πίνακας 4.12 Ποσότητα κατανάλωσης νερού και Wfb _{blue} για κάθε δενδρύλλιο ελιάς στο τοπικό φυτώριο.....	132
Πίνακας 4.13 WF _{grey} για κάθε δενδρύλλιο ελιάς στο τοπικό φυτώριο	133

Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1.1 Χρήση νερού και ανανεώσιμες πηγές νερού στις 5 ηπείρους (από επεξεργασία δεδομένων της AQUASTAT για το 2018 (FAO, 2022a)).....	1
Διάγραμμα 1.2 Ποσοστιαία (%) κατανομή της χρήσης νερού στους τρεις τομείς ανθρώπινης δραστηριότητας (γεωργία, βιομηχανία νοικοκυριά) στις ηπείρους του πλανήτη(από επεξεργασία δεδομένων AQUASTAT για το 2018 (FAO, 2022a))	2
Διάγραμμα 1.3 Ποσοστιαία (%) κατανομή της χρήσης νερού στους τρεις τομείς ανθρώπινης δραστηριότητας (γεωργία, βιομηχανία νοικοκυριά) στις πιο ανεπτυγμένες περιοχές του πλανήτη (από επεξεργασία δεδομένων AQUASTAT για το 2018 (FAO, 2022a))......	2
Διάγραμμα 1.4 Χρήση νερού και ανανεώσιμες πηγές νερού και ποσοστιαία (%) συμμετοχή της γεωργίας, της βιομηχανίας και των νοικοκυριών στη συνολική χρήση νερού στη Δυτική και τη Μεσογειακή Ευρώπη (από επεξεργασία δεδομένων AQUASTAT για το 2018 (FAO, 2022a)).	3
Διάγραμμα 1.5 Χρήση νερού και ανανεώσιμες πηγές νερού και ποσοστιαία (%) συμμετοχή της γεωργίας, της βιομηχανίας και των νοικοκυριών στη συνολική χρήση νερού στη Μεσογειακή Ευρώπη (από επεξεργασία δεδομένων AQUASTAT για το 2018 (FAO, 2022a)).	3
Διάγραμμα 1.6 Ο λόγος της ποσότητας αρδευτικού νερού προς την καλλιεργούμενη έκταση στις χώρες της Μεσογειακής Ευρώπης	4
Διάγραμμα 1.7 Χρήση νερού και ανανεώσιμες πηγές νερού στη λεκάνη της Μεσογείου (από επεξεργασία δεδομένων της AQUASTAT για το 2018 (FAO, 2022a))	4
Διάγραμμα 1.8 Συμμετοχή της γεωργίας, της βιομηχανίας και των νοικοκυριών στη συνολική χρήση νερού στη Μεσόγειο (από επεξεργασία δεδομένων AQUASTAT για το 2018 (FAO, 2022a)).	5
Διάγραμμα 2.1 Ομβροθερμικό διάγραμμα Άρτας και κρίσιμα στάδια στην ανάπτυξη της ελιάς. Τα κλιματικά δεδομένα προέρχονται από καταγεγραμμένα δεδομένα της ΕΜΥ για περίοδο από το 1976 έως το 2010 (http://www.emy.gr/emv/el/climatology/climatology_city?perifereia=Epirus&poli=Arta)	40
Διάγραμμα 2.2 Μετεωρολογικά δεδομένα για το έτος 2018 στην πειραματική περιοχή (Γραμμενίτσα Άρτας). Σημειώνεται η μέση μηνιαία θερμοκρασία, η μέση μηνιαία ακτινοβολία (Wm^{-2}), το συνολικό μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm) και η συνολική μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ελιάς ETc (mm).....	45
Διάγραμμα 2.3 Εφαρμοζόμενη ποσότητα λίπανσης (ποσότητα N) στους ελαιώνες του πειράματος και σε ελαιώνες στο Bari της Ιταλίας (στοιχεία από Pellegrini et al., 2016)	47
Διάγραμμα 2.4 Απεικόνιση των συνολικών Υδατικών Αποτυπωμάτων (WF_{tot}) και των επιμέρους συστατικών τους (WF_{green} , WF_{blue} , WF_{grey}) σε κάθε ελαιώνα για το έτος 2018	48
Διάγραμμα 2.5 Μετεωρολογικά δεδομένα για τον πειραματικό ελαιώνα για το έτος 2019. Σημειώνεται η μέση μηνιαία θερμοκρασία, η μέση μηνιαία ακτινοβολία (Wm^{-2}), το συνολικό μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm) και η συνολική μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ελιάς ETc (mm).....	64

Διάγραμμα 2.6 Μετεωρολογικά δεδομένα για τον πειραματικό ελαιώνα για το έτος 2020. Σημειώνεται η μέση μηνιαία θερμοκρασία, η μέση μηνιαία ακτινοβολία (Wm^{-2}), το συνολικό μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm) και η συνολική μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ελιάς ETc (mm).....	65
Διάγραμμα 2.7 Μετεωρολογικά δεδομένα για τον πειραματικό ελαιώνα για το έτος 2021. Σημειώνεται η μέση μηνιαία θερμοκρασία, η μέση μηνιαία ακτινοβολία (Wm^{-2}), το συνολικό μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm) και η συνολική μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ελιάς ETc (mm).....	65
Διάγραμμα 2.8 Το συνολικό Υδατικό Αποτύπωμα (WF_{total}) και των επιμέρους συστατικών του (WF_{green} , WF_{blue} , WF_{grey}) των διαφορετικών μεταχειρίσεων για τα τρία πειραματικά έτη	68
Διάγραμμα 2.9 Βλαστική ανάπτυξη των ελαιόδενδρων (στήλες) των τριών μεταχειρίσεων και συνολική τελική συγκομιδή (γραμμή) για τα τρία χρόνια του πειράματος	71
Διάγραμμα 2.10 Συγκέντρωση προλίνης και σχετική συγκέντρωση υγρασίας (LRWC) στα φύλλα δένδρων των διαφορετικών μεταχειρίσεων. (Διαφορετικά γράμματα δείχνουν στατιστικά σημαντικά διαφορά σε $p>0,05$)	73
Διάγραμμα 3.1 Συμμετοχή των κυριων κατηγοριών επιπτώσεων στις κατηγορίες ενδιάμεσων επιπτώσεων για τα ξηρικά, τη συμβατική άρδευση (Παραγωγός) και τη DSS άρδευση (DSS). Σημείωση: CC = κλιματική αλλαγή, FEU = χρήση ορυκτής και πυρηνικής ενέργειας, FA = οξίνιση υδάτων, FET = τοξικότητα υδάτων, FE = ευτροφισμός υδάτων, HTc = καρκινογόνος ανθρωπο-τοξικότητα, HTnc = μη καρκινογόνος ανθρωπο-τοξικότητα, IR = ιονίζουσα ακτινοβολία, LO = χρήση γης, LT = αλλαγή χρήσης γης, ME = ευτροφισμός θαλάσσιου οικοσυστήματος.....	94
Διάγραμμα 3.2 Οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, το οικοσύστημα και οι συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ελαιοκαλλιέργειας για τα ξηρικά τη συμβατική άρδευση (Παραγωγός) και τη DSS άρδευση (DSS).....	96
Διάγραμμα 3.3 Τα αποτελέσματα της Monte Carlo ανάλυση αβεβαιότητας για κάθε κατηγορία επιπτώσεων της IW+ μεθόδου για τα διαφορετικά συστήματα ελαιοκαλλιέργειας.....	99
Διάγραμμα 3.4 Η συνεισφορά των επί μέρους διαδικασιών στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ελαιοκαλλιέργειας ως ενιαίο αποτέλεσμα (single score) εφαρμόζοντας τις μεθόδους LCA EF 3.0 και ReCiPe 2016.....	102
Διάγραμμα 4.1 Το WF των δενδρυλλίων ελιάς που αρδεύτηκαν με καθαρό νερό (TaW) και επεξεργασμένα αστικά απόβλητα (TWW), καθώς και τα συστατικά τους ανάλογα με την πηγή προέλευσης (WF_{blue} για το νερό δικτύου και WF_{black} για τα επεξεργασμένα αστικά απόβλητα).	132

Πίνακας Εξισώσεων

1.1 Δείκτης Water Stress SDG6	6
1.2 Δείκτης Water Stress γενική.....	7
1.3 Εξίσωση συνολικού ΥΑ ($WF_{proc,tot}$) γενική	12
1.4 Εξίσωση πράσινου ΥΑ ($WF_{proc,green}$) γενική.....	12
1.5 Εξίσωση μπλε ΥΑ ($WF_{proc,blue}$) γενική.....	12
1.6 Εξίσωση γκρι ΥΑ ($WF_{proc,gray}$) γενική	13
1.7 Δείκτης έλλειψης πράσινου νερού (green Water Scarcity - WS_{green})	14
1.8 Διαθεσιμότητα πράσινου νερού (Green Water Availability – WA_{green})	14
1.9 Δείκτης έλλειψης μπλε νερού (blue Water Scarcity - WS_{blue})	14
1.10 Διαθεσιμότητα μπλε νερού (Blue Water Availability – WA_{blue})	15
1.11 Δείκτης έλλειψης γκρι νερού (grey Water Scarcity - WS_{gray}).....	15
1.12 Συνολικό ΥΑ ($WF_{proc,tot}$) γενική	17
1.13 Πράσινο ΥΑ συναρτήσει της υδατοκατανάλωσης	17
1.14 Πράσινη χρήση νερού – υδατοκατανάλωσης (Crop Water Use – CWU).....	17
1.15 Πράσινο ΥΑ τελική (WF_{green})	17
1.16 Μπλε ΥΑ συναρτήσει της υδατοκατανάλωσης.....	18
1.17 Μπλε χρήσης νερού – υδατοκατανάλωσης (blue Crop Water Use – CWU_{blue})	18
1.18 Εξίσωση μπλε ΥΑ τελική (WF_{blue}).....	18
1.19 Εξίσωση γκρι ΥΑ (WF_{gray})	18
1.20 Εξίσωση γκρι ΥΑ (WF_{gray}) τελική	18
1.21 Υδατικές ανάγκες καλλιέργειας Crop Water Requirements (CWR).....	19
1.22 Ανάγκες αρδευσης καλλιέργειας (Irrigation Requirements – IR)	19
1.23 Πράσινη εξατμισοδιαπνοή (ET_{green}).....	19
1.24 Μπλε εξατμισοδιαπνοή (ET_{blue}).....	20
1.25 Μπλε εξατμισοδιαπνοή (ET_{blue}).....	20
1.26 Πράσινη εξατμισοδιαπνοή (ET_{green}).....	20
1.27 Εξίσωση LCIA στάθμησης	24
1.28 Εξίσωση συντελεστή χαρακτηρισμού CF_{AWARE}	27
1.29 Εξίσωση δείκτη AMD_{AWARE}	27
1.30 Εξίσωση δείκτη WTA	28

1.31 Υδατικό Αποτύπωμα κατά LCA	28
2.1 Μεταβολή αναπτυξης βλαστού	54
2.2 Εξίσωση LRWC.....	56
2.3 Ξηρό Βάρος φυτού	61
2.4 Εξίσωση Chroma.....	62
2.5 Εξίσωση Hue.....	62
4.1 Εξίσωση μεταβολής υψους φυτού	119
4.2 Εξίσωση μεταβολής αριθμού φύλλων φυτού	119
4.3 Εξίσωση μεταβολής διαμέτρου βλαστού	119
4.4 Εξίσωση WF_{total}	121

Πίνακας Συντομογραφιών –Ακρωνυμίων – Συμβόλων*

AMD	Availability Minus Demand ($\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ month}^{-1}$) - Διαθεσιμότητα μείον Ζήτηση
a*	απόχρωση από πράσινο (-a*) στο κόκκινο (+a*)
AusAgLCI	Australian Agriculture LCI - Πρότυπο Αυστραλίας για LCI των γεωργικών προϊόντων
AWARE	Available Water Remaining - Διαθέσιμο Υπόλοιπο Νερό - διαθέσιμο νερό που εναπομένει σε μια υδρολογική λεκάνη αφού καλυφθούν οι απαιτήσεις των ανθρώπων και του οικοσυστήματος
b*	απόχρωση από μπλε (-b*) στο κίτρινο (+b*)
C*	παράμετρος καθαρότητας χρώματος
CC_lt	Climate change, long term ($\text{kg CO}_2 \text{ eq -long}$) - Κλιματική αλλαγή, μακροπρόθεσμα
CC_st	Climate change, short term ($\text{kg CO}_2 \text{ eq -short}$) - Κλιματική αλλαγή, βραχυπρόθεσμα
CF	Characterization Factor - Συντελεστής Χαρακτηρισμού
C _{max}	maximum concentration of a pollutant (kg m^{-3}) - μέγιστη συγκέντρωση ρυπαντή
C _{nat}	natural concentration of a pollutant (kg m^{-3}) - φυσική συγκέντρωση ρυπαντή
CTU	Comparative Toxic Units - Συγκριτικές μονάδες τοξικότητας
CWR	Crop Water Requirements (mm) - Υδατικές ανάγκες καλλιέργειας
CWU (LCA)	Consumptive Water Use ($\text{m}^3 \text{ H}_2\text{O eq}$) - Συνιστώσα Κατανάλωσης νερού (LCA)
CWU (WF)	Crop Water Use ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) - Υδατοκατανάλωση
CWU _{blue}	blue Crop Water Use ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) - Υδατοκατανάλωση μπλε νερού
CWU _{green}	green Crop Water Use ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) - Υδατοκατανάλωση πράσινου νερού
d	days - ημέρες
DALY	Disability Adjusted Life Years - Χρόνια ζωής σε συνθήκες αναπηρίας
DQI	Data Quality Indicators - Δείκτες ποιότητας δεδομένων
DSS	Decision Support System - Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων
DW	Dry Weight (g) - Ξηρό Βάρος
DWU (LCA)	Degradative Water Use (volume) - Συνιστώσα Υποβάθμισης υδατικού αποτυπώματος (LCA)
EF	Environmental Footprint (points t^{-1}) - Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα
EFR	Environmental Flow Requirement (volume / time) - Απαιτήσεις Περιβαλλοντικής Ροής
ET	Evapotranspiration (mm) - Εξατμισοδιαπνοή
ET _a	actual Evapotranspiration (mm) - πραγματική Εξατμισοδιαπνοή
ET _{blue}	blue Evapotranspiration (mm) - μπλε Εξατμισοδιαπνοή
ET _c	crop Evapotranspiration (mm) - Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας
ET _{green}	green Evapotranspiration (mm) - πράσινη Εξατμισοδιαπνοή
ET _o	reference Evapotranspiration (mm) - Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς
FA	Freshwater acidification ($\text{kg SO}_2 \text{ eq}$) - Οξίνιση γλυκών υδάτων
FAO	Food and Agriculture Organization - Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας
FE	Freshwater eutrophication ($\text{kg PO}_4 \text{ P-lim eq}$) - Ευτροφισμός γλυκών υδάτων
FET	Freshwater ecotoxicity (CTUe) - Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων
FEU	Fossil and nuclear energy use (MJ deprived) - Χρήση ορυκτής και πυρηνικής ενέργειας
FU	Functional Unit - Λειτουργική μονάδα
FW	Fresh Weight (g) - Νωπό Βάρος
GTP100	Global Temperature Potential for a 100-year time horizon - Δυναμικό της Θερμοκρασίας του Πλανήτη σε ορίζοντα 100 χρόνων

GWP100	Global Warming Potential for a 100-year time horizon - Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη σε ορίζοντα 100 χρόνων
H°	παράμετρος απόχρωσης χρώματος
HTc	Human toxicity cancer (CTUh) - Ανθρώπινη τοξικότητα καρκινογόνα
HTnc	Human toxicity non-cancer (CTUh) - Ανθρώπινη τοξικότητα μη καρκινογόνα
Ic	Impact score - Τιμή των επιπτώσεων
IDW	Inverse Distance Weighting - Μέθοδος της αντίστροφα σταθμισμένης απόστασης
IR	Irrigation Requirements (mm) - Ανάγκες Άρδευσης
IR (LCA)	Ionizing radiations (Bq C-14 eq) - Ιονίζουσες ακτινοβολίες
K _c	crop coefficient - Συντελεστής καλλιέργειας
K _s	stress coefficient - Συντελεστής καταπόνησης καλλιέργειας
L	Load of a pollutant (kg ha ⁻¹) - Ρυπαντικό φορτίο
L*	παράμετρος φωτεινότητας
LCA	Life Cycle Analysis - Ανάλυση Κύκλου Ζωής
LCI	Life Cycle Inventory - Απογραφή Κύκλου Ζωής
LCIA	Life Cycle Impact Assessment - Εκτίμηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής
I _{gp}	length of growing period (ημέρες) - διάρκεια περιόδου ανάπτυξης
LO	Land occupation, biodiversity (m ² arable land eq. yr) - Χρήση γης, βιοποικιλότητα
LRWC	Leaf Relative Water Content (%) - Σχετικό περιεχόμενο νερού στα φύλλα
LSD	Least Significant Difference - Ελάχιστη Σημαντική Διαφορά
LT	Land transformation, biodiversity (m ² arable land eq) - Αλλαγή χρήσης γης, βιοποικιλότητα
ME	Marine eutrophication (kg N N-lim eq) - Θαλάσσιος ευτροφισμός
MRU	Mineral resources use (kg deprived) - Χρήση ορυκτών πόρων
NGO	Non-governmental Organisation - Μη Κυβερνητική Οργάνωση
NMVO	Non-Methane Volatile Organic Compounds - Πτητικές Οργανικές Ενώσεις πλην Μεθανίου
OD	Ozone layer depletion (kg CFC-11 eq) - Καταστροφή της στιβάδας του όζοντος
PDF	Potentially Disappeared Fraction of species - Δυνητικά υπό εξαφάνιση κλάσμα ειδών
P _{eff}	Effective Precipitation (mm) - Αποτελεσματική βροχόπτωση
PM	Particulate matter formation (kg PM _{2,5} eq) - Σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων
POF	Photochemical oxidant formation (kg NMVOC eq) - Σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών παραγόντων
R _{nat}	Natural run-off - φυσική απορροή
ROS	Reactive Oxygen Species - Δραστικές Μορφές Οξυγόνου
SIWI	Stockholm International Water Institute - Διεθνές Ινστιτούτο Νερού της Στοκχόλμης
TA	Terrestrial acidification (kg SO ₂ eq) - Εδαφική οξίνιση
T _{max}	max Temperature (°C) - μέγιστη Θερμοκρασία
TRWR	Total Renewable Water Resources - Συνολικά Ανανεώσιμα Υδατικά Αποθέματα
TW	Turgid weight (g) - Βάρος στη σπαργή
TWW	Treated Waste Water - Επεξεργασμένα Αστικά Λύματα
USDA	U.S. Department of Agriculture - Υπουργείο Γεωργίας των ΗΠΑ
WA	Water Availability - Διαθεσιμότητα νερού
WF	Water Footprint (m ³ Mg ⁻¹) - Υδατικό Αποτύπωμα
WFA	Water Footprint Assessment - Εκτίμηση Υδατικού Αποτυπώματος
WF _{black}	black Water Footprint (m ³ / φυτό, L / φυτό) – μαύρο Υδατικό Αποτύπωμα
WF _{blue}	blue Water Footprint (m ³ Mg ⁻¹) - μπλε Υδατικό Αποτύπωμα

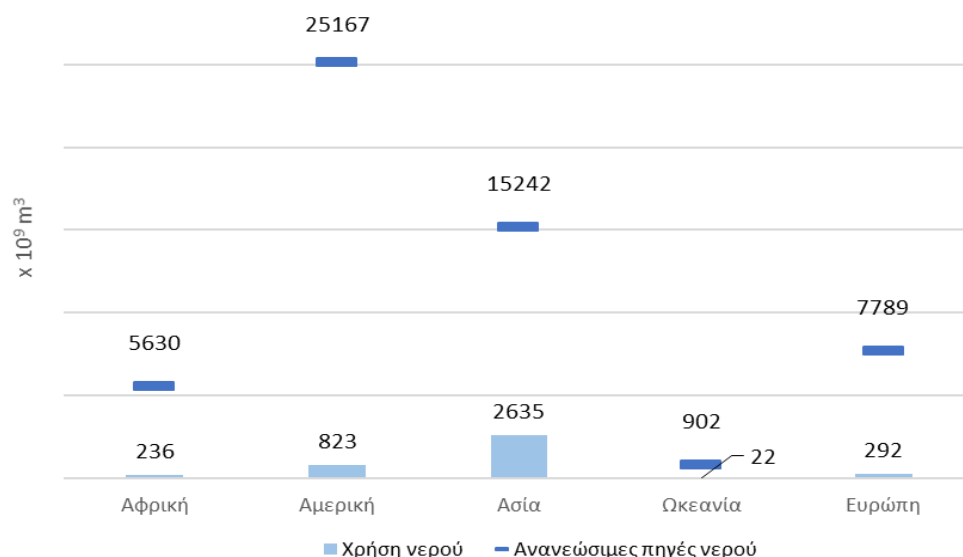
WFC	Weighting Factor – Συντελεστής Στάθμισης
WF _{green}	green Water Footprint ($\text{m}^3 \text{Mg}^{-1}$) - πράσινο Υδατικό Αποτύπωμα
WF _{grey}	grey Water Footprint ($\text{m}^3 \text{Mg}^{-1}$) - γκρι Υδατικό Αποτύπωμα
WFLDB	World Food LCA Database - Παγκόσμια Βάση Δεδομένων LCA για τρόφιμα
WFN	Water Footprint Network - Δίκτυο Υδατικού Αποτυπώματος
WF _{proc,blue}	blue Water Footprint of a procedure ($\text{m}^3 \text{Mg}^{-1}$) - μπλε Υδατικό Αποτύπωμα διεργασίας
WF _{proc,green}	green Water Footprint of a procedure ($\text{m}^3 \text{Mg}^{-1}$) - πράσινο Υδατικό Αποτύπωμα διεργασίας
WF _{proc,grey}	grey Water Footprint of a procedure ($\text{m}^3 \text{Mg}^{-1}$) - γκρι Υδατικό Αποτύπωμα διεργασίας
WF _{proc,total}	total Water Footprint of a procedure ($\text{m}^3 \text{Mg}^{-1}$) - Συνολικό Υδατικό Αποτύπωμα διεργασίας
WF _{total}	total Water Footprint ($\text{m}^3 \text{Mg}^{-1}$) - Συνολικό Υδατικό Αποτύπωμα
WPL	Water Pollution Level (%) - Επίπεδο Ρύπανσης Νερού
WS	Water Stress (%) - Πίεση στα υδατικά αποθέματα
WS (LCA)	Water scarcity ($\text{m}^3 \text{ world eq}$) - Έλλειψη νερού
WS _{blue} (WF)	blue Water Scarcity (%) - Δείκτης Έλλειψης μπλε νερού
WS _{green} (WF)	green Water Scarcity (%) - Δείκτης Έλλειψης πράσινου νερού
WSI	Water Stress Index - Δείκτης Πίεσης στα υδατικά αποθέματα
WTA	Withdrawal to Availability - Άντληση προς Διαθεσιμότητα
WU	Water Use - Χρήση νερού
WW	Water Withdrawal - Άντληση νερού
Y	Yield (Mg ha^{-1}) - παραγωγή (συγκομιζόμενη ποσότητα)
AKZ	Ανάλυση Κύκλου Ζωής
EEKZ	Εκτίμηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής
EYA	Εκτίμηση Υδατικού Αποτυπώματος
KB	Κύριος Βλαστός
NB	Νωπό Βαρος (g)
ΞB	Ξηρό Βάρος (g)
ΠB	Πλευρικός Βλαστός
ΠΓΕ	Προϊόν Γεωγραφικής Ένδειξης
ΥA	Υδατικό Αποτύπωμα ($\text{m}^3 \text{Mg}^{-1}$)

* Αναφέρονται σε παρένθεση οι μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν στο κείμενο

1 Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

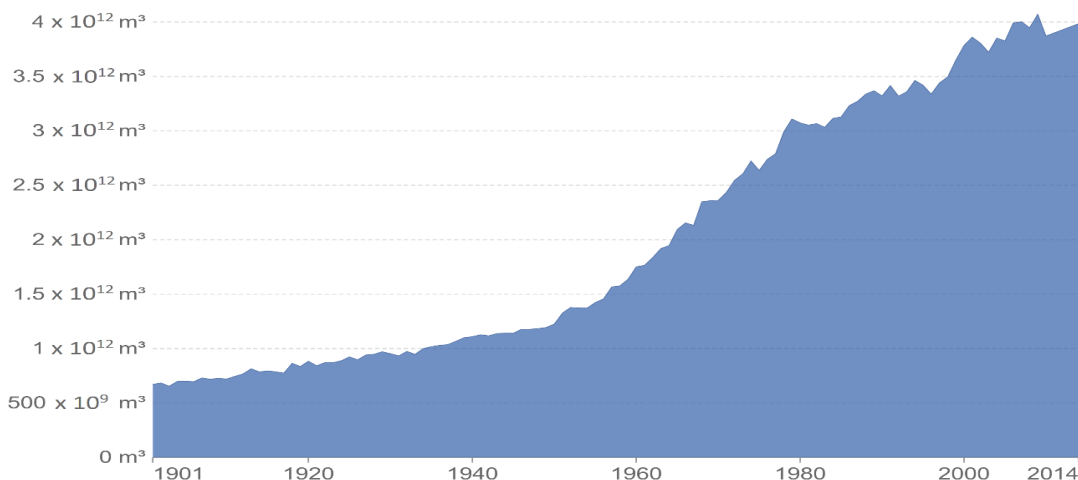
1.1 Παγκόσμια αποθέματα και χρήση νερού σήμερα

Με βάση τα δεδομένα του Οργανισμού Τροφίμων και Γεωργίας (Food and Agriculture Organisation –FAO) η συνολική άντληση νερού το 2018 εκτιμήθηκε περίπου στα $4000 \times 10^9 \text{ m}^3$, όταν οι συνολικές ανανεώσιμες πηγές νερού παρείχαν $54730 \times 10^9 \text{ m}^3$ (FAO, 2022a) (Διάγραμμα 1.1).



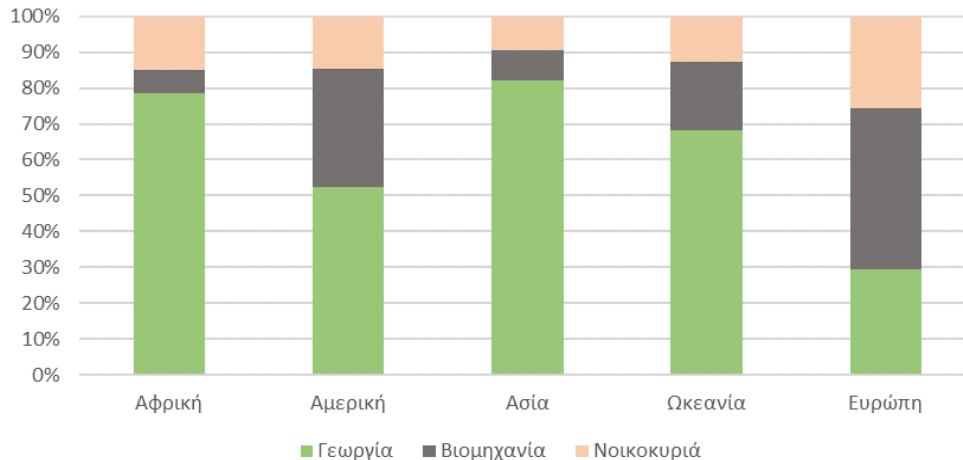
Διάγραμμα 1.1 Χρήση νερού και ανανεώσιμες πηγές νερού στις 5 ηπείρους (από επεξεργασία δεδομένων της AQUASTAT για το 2018 (FAO, 2022a))

Το στιγμιότυπο αυτό ίσως να μη λέει πολλά αν δεν τοποθετηθεί σε συγκριτικό πλαίσιο. Σύμφωνα με την ίδια πηγή δεδομένων, το 1962 οι ανανεώσιμες πηγές νερού παρείχαν $48947 \times 10^9 \text{ m}^3$, όταν η παγκόσμια άντληση ήταν $1840 \times 10^9 \text{ m}^3$ (FAO, 2022a). Αυτό οδηγεί σε μια μείωση στη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πόρων νερού σε κάθε άνθρωπο κατά 50% τα τελευταία 60 χρόνια. Από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα η παγκόσμια χρήση νερού έχει εξαπλασιαστεί (UN-Water, 2021) (Εικόνα 1.1).



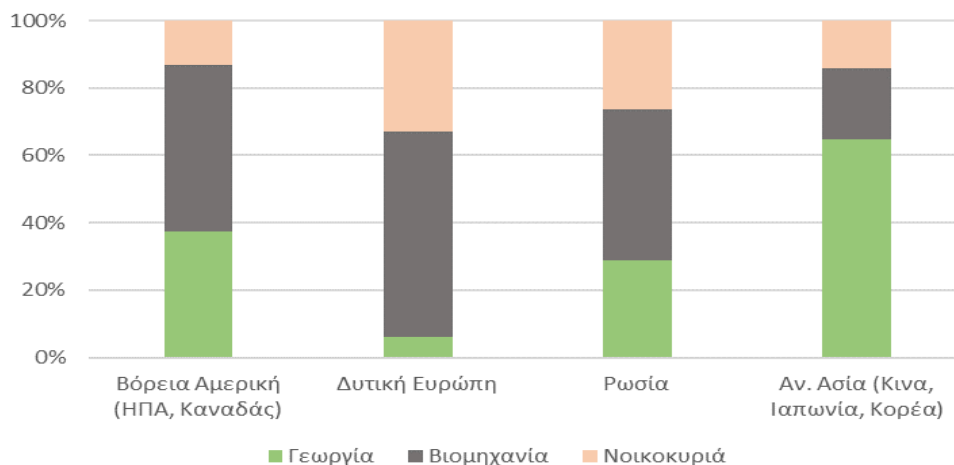
Εικόνα 1.1 Χρήση νερού στον πλανήτη από το 1900 (προσαρμοσμένο από G IGB)

Η αύξηση στην άντληση και χρήση νερού συνδέεται αφενός με την επέκταση του αδιαμφισβήτητου δικαιώματος της πρόσβασης στα θεμελιώδη αγαθά (υγιεινή και διατροφική επάρκεια) σε μεγαλύτερη μερίδα, σε σχέση με το παρελθόν, ενός αυξανόμενου πληθυσμού και αφετέρου με τη συμμόρφωση στις απαιτήσεις του νεοφιλεύθερου μοντέλου παραγωγής και κατανάλωσης. Οι κύριοι τομείς ανθρώπινης δραστηριότητας που καταναλώνουν νερό είναι η βιομηχανία, η γεωργία και τα νοικοκυριά. Η γεωργία είναι παγκοσμίως ο μεγαλύτερος χρήστης νερού, καθώς καταναλώνει το 72% ($2882 \times 10^9 \text{ m}^3$ το 2018) του συνολικά καταναλισκόμενου νερού. Η βιομηχανία και τα νοικοκυριά συμμετέχουν στη χρήση νερού κατά 16% ($647 \times 10^9 \text{ m}^3$) και 12% ($480 \times 10^9 \text{ m}^3$), αντίστοιχα (με δεδομένα για το 2018 - FAO, 2022) (Διάγραμμα 1.2).



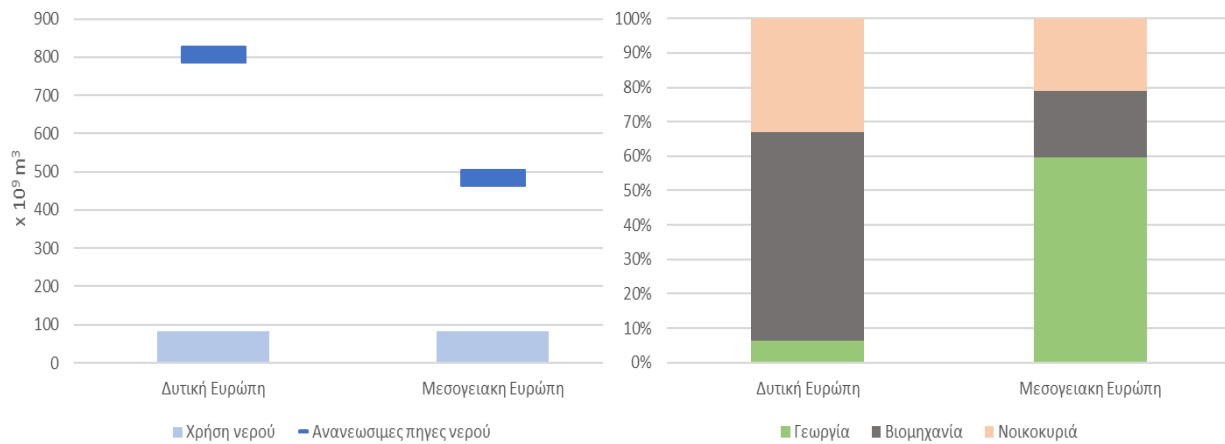
Διάγραμμα 1.2 Ποσοστιαία (%) κατανομή της χρήσης νερού στους τρεις τομείς ανθρώπινης δραστηριότητας (γεωργία, βιομηχανία, νοικοκυριά) στις ηπείρους του πλανήτη (από επεξεργασία δεδομένων AQUASTAT για το 2018 (FAO, 2022a))

Αυτό φαίνεται λογικό, καθώς η πλειοψηφία των χωρών της γης είναι αναπτυσσόμενες και ο βαθμός βιομηχανοποίησης σε αυτές είναι χαμηλός. Στις αναπτυγμένες χώρες όμως (εκτός από τις χώρες της Αν. Ασίας) ο μεγαλύτερος καταναλωτής νερού είναι η βιομηχανία (Διάγραμμα 1.3).



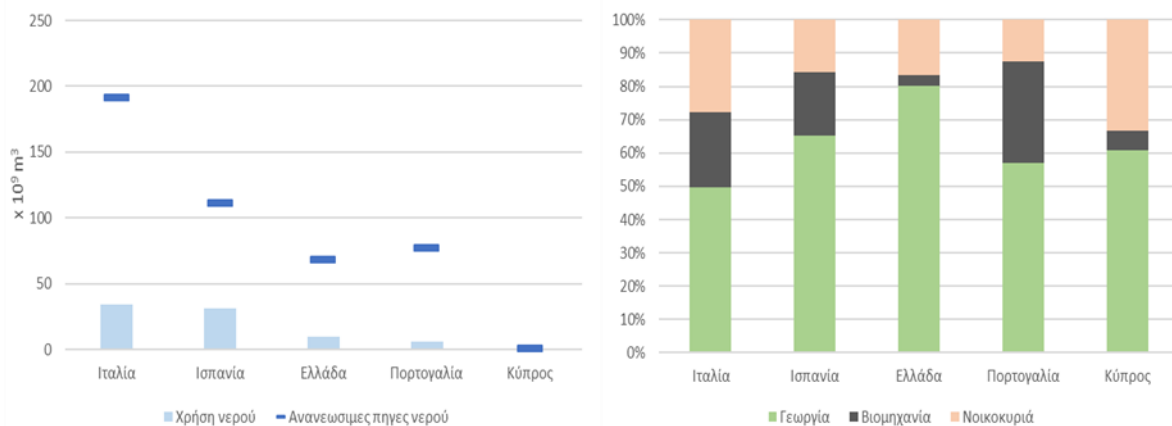
Διάγραμμα 1.3 Ποσοστιαία (%) κατανομή της χρήσης νερού στους τρεις τομείς ανθρώπινης δραστηριότητας (γεωργία, βιομηχανία, νοικοκυριά) στις πιο ανεπτυγμένες περιοχές του πλανήτη (από επεξεργασία δεδομένων AQUASTAT για το 2018 (FAO, 2022a)).

Στην Ευρώπη, που αντλεί το 7,28% των παγκοσμίων υδατικών αποθεμάτων, το σκηνικό αλλάζει σε σχέση με τις υπόλοιπες ηπείρους και η βιομηχανία αποτελεί το μεγαλύτερο χρήστη νερού απορροφώντας το 45% ($131 \times 10^9 \text{ m}^3$) του συνολικού νερού που καταναλώνει η ήπειρος. Η γεωργία απορροφάει το 29% ($86 \times 10^9 \text{ m}^3$) ενώ τα νοικοκυριά το 26% ($75 \times 10^9 \text{ m}^3$). Η κατανομή αυτή αλλάζει ανάλογα την περιοχή της Ευρώπης και έτσι ενώ οι ευρωπαϊκές χώρες της Μεσογείου αντλούν την ίδια περίπου ποσότητα με τις χώρες της Δυτικής Ευρώπης ($83,70 \times 10^9 \text{ m}^3$ και $82,74 \times 10^9 \text{ m}^3$, αντίστοιχα, για το 2018), στις πρώτες η γεωργία αποτελεί το μεγαλύτερο χρήστη νερού ενώ στις δεύτερες η βιομηχανία. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι οι Μεσογειακές χώρες διαθέτουν λίγο παραπάνω από τα μισά αποθέματα νερού ($486 \times 10^9 \text{ m}^3$, 2018) σε σχέση με τις χώρες της Δυτικής Ευρώπης ($803 \times 10^9 \text{ m}^3$, 2018) (Διάγραμμα 1.4).



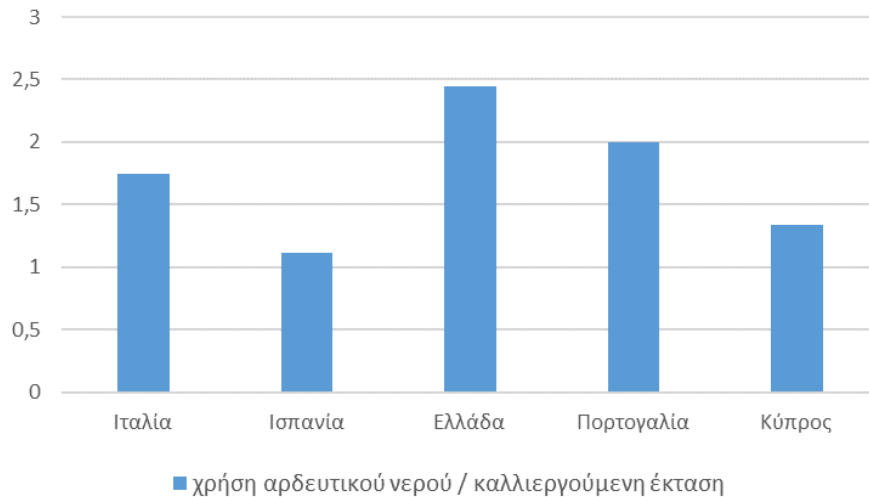
Διάγραμμα 1.4 Χρήση νερού και ανανεώσιμες πηγές νερού και ποσοστιαία (%) συμμετοχή της γεωργίας, της βιομηχανίας και των νοικοκυριών στη συνολική χρήση νερού στη Δυτική και τη Μεσογειακή Ευρώπη (από επεξεργασία δεδομένων AQUASTAT για το 2018 (FAO, 2022a)).

Στις μεσογειακές χώρες της Ευρώπης το ποσοστό διάθεσης της χρήσης νερού στο μεγαλύτερο καταναλωτή, τη γεωργία, διαφοροποιείται ανάλογα το βαθμό εκβιομηχάνισης της κάθε χώρας αλλά και τον πληθυσμό της. Η Ελλάδα διαθέτει στην αγροτική παραγωγή το 80,1% του συνολικού νερού που καταναλώνει, ενώ η Ιταλία το 49,7%, η Ισπανία το 65,2% και η Πορτογαλία το 57% (Διάγραμμα 1.5).



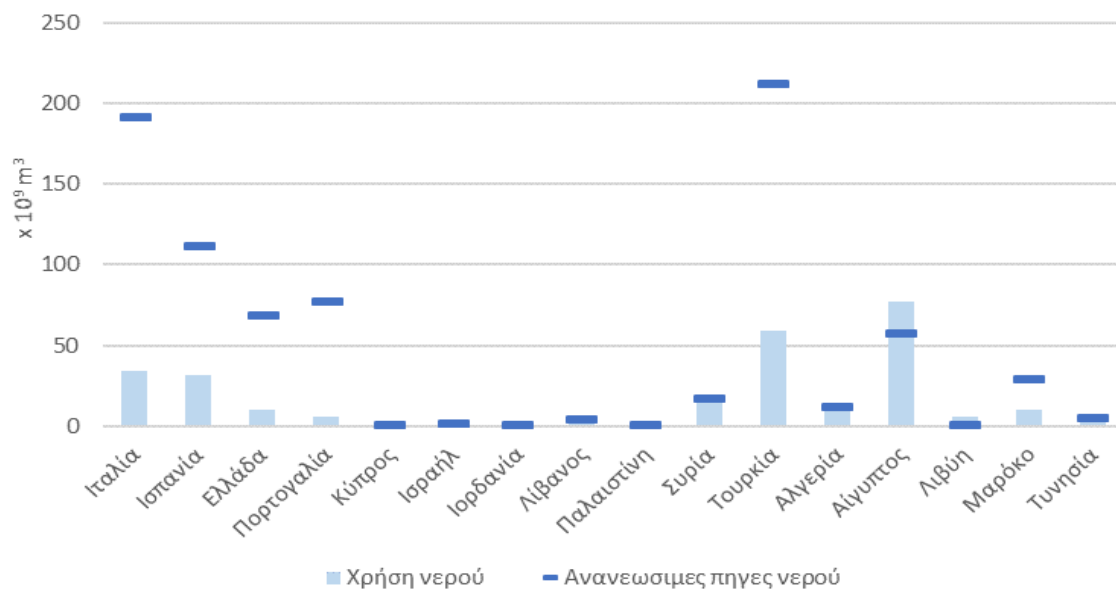
Διάγραμμα 1.5 Χρήση νερού και ανανεώσιμες πηγές νερού και ποσοστιαία (%) συμμετοχή της γεωργίας, της βιομηχανίας και των νοικοκυριών στη συνολική χρήση νερού στη Μεσογειακή Ευρώπη (από επεξεργασία δεδομένων AQUASTAT για το 2018 (FAO, 2022a)).

Ανάλογα με την επιφάνεια των καλλιεργούμενων εκτάσεων η Ελλάδα αντλεί μεγαλύτερη ποσότητα αρδευτικού νερού σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεσογειακές χώρες της Ευρώπης, με την αναλογία ποσότητα αρδευτικού νερού/ καλλιεργούμενη έκταση ($\times 10^3 \text{ m}^3 / \text{ha}$) να είναι 2,44 όταν για την Ισπανία η αντίστοιχη αναλογία είναι 1,11, την Ιταλία 1,74 και τη Πορτογαλία 1,99 (Διάγραμμα 1.6).



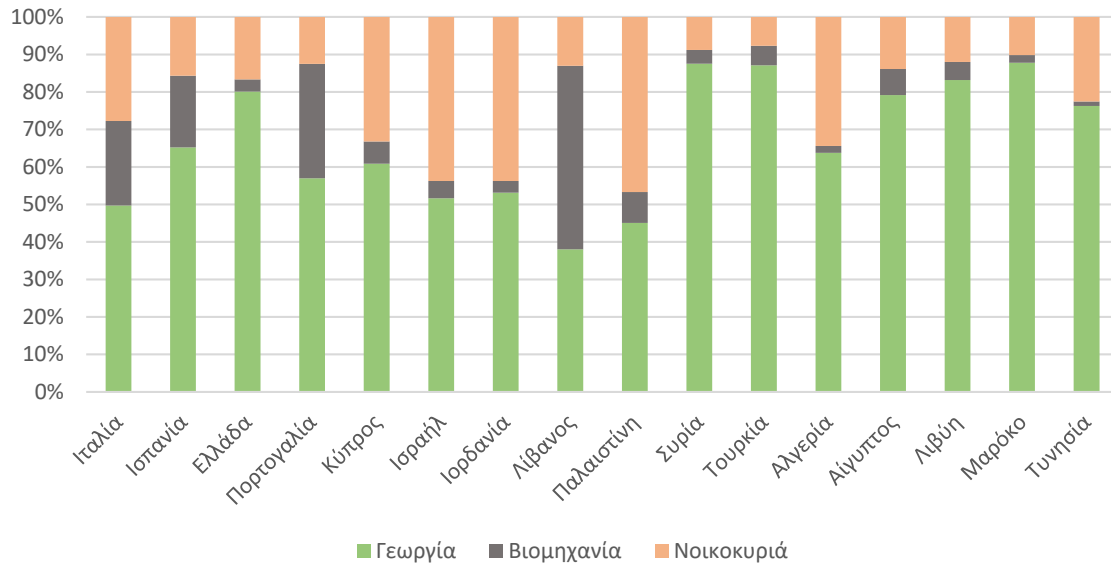
Διάγραμμα 1.6 Ο λόγος της ποσότητας αρδευτικού νερού προς την καλλιεργούμενη έκταση στις χώρες της Μεσογειακής Ευρώπης

Στην ευρύτερη λεκάνη της Μεσογείου οι χώρες της βόρειας Αφρικής και της Μέσης Ανατολής αντιμετωπίζουν σημαντική πίεση στα υδατικά τους αποθέματα ξεπερνώντας σε κάποιες περιπτώσεις η ζήτηση νερού τις δυνατότητες ανανέωσής του. Χαρακτηριστικά παραδείγματα η Αίγυπτος και η Λιβύη όπου το ποσοστό της άντλησης γλυκού νερού προς τις συνολικές ανανεώσιμες πηγές νερού είναι αντίστοιχα 134,8% και 817,1% (Διάγραμμα 1.7).



Διάγραμμα 1.7 Χρήση νερού και ανανεώσιμες πηγές νερού στη λεκάνη της Μεσογείου (από επεξεργασία δεδομένων της AQUASTAT για το 2018 (FAO, 2022a))

Και στην περίπτωση των χωρών της λεκάνης της Μεσογείου, στις περισσότερες από αυτές η γεωργία είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής νερού (Διάγραμμα 1.8).



Διάγραμμα 1.8 Συμμετοχή της γεωργίας, της βιομηχανίας και των νοικοκυριών στη συνολική χρήση νερού στη Μεσόγειο (από επεξεργασία δεδομένων AQUASTAT για το 2018 (FAO, 2022a)).

1.2 Υφιστάμενη και μελλοντική πίεση στα υδατικά αποθέματα σε παγκόσμιο επίπεδο (ως συνέπεια της κλιματικής αλλαγής)

Είναι πλέον αποδεκτή από την επιστημονική κοινότητα η άνοδος της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης και η συμμετοχή των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων στην εξέλιξη του φαινομένου. Οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου έχουν αυξήσει τη θερμοκρασία κατά 0,9°C από το 19^ο αιώνα με τη μεγαλύτερη αύξηση να έχει συντελεστεί τα τελευταία 35 χρόνια (UNESCO UN-Water, 2020).

Ενώ η τάση της θερμοκρασίας είναι πιο ξεκάθαρη, οι τάσεις των βροχοπτώσεων (και των κατακρημνίσεων γενικότερα) επιδεικνύουν μεγαλύτερη αβεβαιότητα σε πολλές περιοχές. Οι κλιματικές προβολές αναφέρουν ότι τα ακραία φαινόμενα βροχοπτώσεων θα ενταθούν και θα γίνουν πιο συχνά σε πολλές περιοχές αυξάνοντας τον κίνδυνο πλημμυρών (Hirabayashi et al., 2013), ενώ σε άλλες περιοχές τα κατακρημνίσματα θα λείψουν σημαντικά (UNESCO UN-Water, 2020). Σε επίπεδο Ευρώπης, στις βόρειες χώρες της ηπείρου οι βροχοπτώσεις θα αυξηθούν, ενώ στη Νότια Ευρώπη θα γίνουν πιο αραιές (Lee et al., 2021). Επιπρόσθετα θα αυξηθεί η συχνότητα αλλά και η διάρκεια των κυμάτων καύσωνα εντείνοντας τις ξηρασίες (Trenberth et al., 2014) (Gomez-Gomez et al., 2022).

Το κλίμα της γης και ο κύκλος του νερού έχουν πολύ στενή σχέση και οι αλλαγές στο κλίμα θα επηρεάσουν ανάλογα και τους υδάτινους πόρους. Η μείωση για παράδειγμα των βροχοπτώσεων θα μειώσει την εδαφική υγρασία (το νερό που αποθηκεύεται στο έδαφος), τη ροή των ποταμών και τον εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων. Το μέγεθος όμως αυτών των αλλαγών θα εξαρτηθεί από τοπικές συνθήκες όπως ιδιότητες του εδάφους, γεωλογία, βλάστηση και χρήση νερού. Οι επιδράσεις αυτών των αλλαγών στη γεωργία θα είναι τεράστιες και ποικίλες.

Η αύξηση στην κατανάλωση του νερού έχει εξαπλασιαστεί τα τελευταία 100 χρόνια και συνεχίζει να αυξάνεται σταθερά περίπου 1% κάθε χρόνο ως αποτέλεσμα της αύξησης του πληθυσμού, της οικονομικής ανάπτυξης και της αλλαγής στα καταναλωτικά μοτίβα (UNESCO UN-Water, 2020). Οι Mekonnen and Hoekstra (2016) υπολόγισαν ότι 4 δισεκατομμύρια ανθρώπων στον πλανήτη αντιμετωπίζουν έντονη λειψυδρία για τουλάχιστον ένα μήνα το χρόνο, ενώ 1,8 δισεκατομμύρια ανθρώπων για τουλάχιστον το μισό χρόνο. Με αυτό το ρυθμό και στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής είναι προφανής η αναγκαιότητα για άμεση δράση σε παγκόσμιο επίπεδο.

1.2.1 Παγκόσμιες δράσεις για την προστασία των υδατικών αποθεμάτων

Το Σεπτέμβριο του 2015, τα κράτη μέλη του ΟΗΕ υιοθέτησαν την Ατζέντα 2030 για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη (2030 Agenda for Sustainable Development) η οποία περιλαμβάνει 17 Στόχους για Βιώσιμη Ανάπτυξη και 169 ειδικότερους στόχους. Ένας από τους στόχους της ατζέντας, ο 6^{ος}, είναι αφιερωμένος στο νερό και την υγιεινή (Στόχος 6: Καθαρό νερό και αποχέτευση) με ειδικότερο στόχο 6.4 : «Έως το 2030, ουσιαστική αύξηση της αποδοτικότητας της χρήσης του ύδατος σε όλους τους τομείς και διασφάλιση της βιώσιμης άντλησης και προμήθειας πόσιμου νερού, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η λειψυδρία και να μειωθεί σημαντικά ο αριθμός των ανθρώπων που πλήττονται από την έλλειψη νερού.» Για την επίτευξη του στόχου χρησιμοποιούνται δυο δείκτες, ο δείκτης 6.4.1 που αναφέρεται στην αλλαγή της αποτελεσματικότητας της χρήσης νερού (Change in water-use efficiency over time) και ο δείκτης 6.4.2 που αναφέρεται στο επίπεδο της πίεσης των υδατικών αποθεμάτων (Level of water stress).

Πίεση στα υδατικά αποθέματα (ή λειψυδρία) συμβαίνει όταν δεν υπάρχει αρκετό νερό για να ικανοποιήσει τις ανάγκες όλων συμπεριλαμβανομένου και του περιβάλλοντος. Ήδη κάθε ήπειρος περιλαμβάνει περιοχές που υφίστανται τέτοια πίεση. Η φυσική λειψυδρία είναι συχνά εποχιακό φαινόμενο παρά χρόνιο και η κλιματική αλλαγή αναμένεται να την εντείνει προκαλώντας αλλαγές στην εποχιακή διαθεσιμότητα του νερού μέσα στο χρόνο σε πολλές περιοχές (IPCC, 2014).

Ο δείκτης όπως διατυπώνεται στο πλαίσιο του 6^{ου} στόχου υπολογίζει το επίπεδο της πίεσης στα υδατικά αποθέματα (water stress – WS) ως το πηλίκο της συνολικής άντλησης νερού (Total Water Withdrawal – WW) προς τη διαφορά της συνολικής ποσότητας των ανανεώσιμων υδατικών πόρων (Total Renewable Water Resources –TRWR) μείον τις απαιτήσεις της περιβαλλοντικής ροής (Environmental Flow Requirements –EFR) (Εξίσωση 1.1):

1.1

$$Water\ Stress = \frac{\text{Συνολική άντληση νερού}}{\text{Συνολικές ανανεώσιμες πηγές νερού} - \text{Απαιτήσεις περιβαλλοντικής ροής}}$$

Η πίεση στα υδατικά αποθέματα (Water Stress - WS), έχει υπάρξει αντικείμενο μελέτης από πολλούς ερευνητές τα τελευταία χρόνια και έχουν αναπτυχθεί πολλοί σχετικοί δείκτες (Vanharn et al., 2018). Οι περισσότεροι υπάρχοντες δείκτες πίεσης στα αποθέματα νερού συγκρίνουν τη χρήση υδατικών πόρων (Water Use –WU) με τη διαθεσιμότητά τους (Water Availability –WA) (Εξίσωση 1.2):

$$\text{Water Stress} = \frac{\text{χρήση νερού (WU)}}{\text{διαθεσιμότητα νερού (WA)}}$$

Ο προσδιορισμός όμως της έννοιας «χρήση» και της έννοιας «διαθεσιμότητα» προσεγγίζεται συχνά με διαφοροποιήσεις σε πολλά σημεία κυρίως στον υπολογισμό της αντλούμενης ή της καταναλισκόμενης ποσότητας του νερού, στον προσδιορισμό του είδους του νερού που μελετάται εννοώντας τη φυσική προέλευση (μόνο επιφανειακά υδάτινα συστήματα - μπλε νερό- ή και το νερό της βροχής - πράσινο νερό), στη συμμετοχή ή μη της περιβαλλοντικής ροής, στο επίπεδο χρονικής αναφοράς (ετήσια ή μηνιαία), στο επίπεδο γεωχωρικής αναφοράς (κράτος, υδρολογική λεκάνη ή σημείο καννάβου), στη συμμετοχή των υπογείων υδάτων η μη και στην αναφορά στις εναλλακτικές πηγές νερού (Vanharm et al., 2018). Έτσι η αποτύπωση της πίεσης στα υδατικά αποθέματα συναντάται μέσα στα χρόνια με τη μορφή διαφορετικών δεικτών όπως: «βαθμός άντλησης / διαθεσιμότητα», «βαθμός κατανάλωσης / διαθεσιμότητα», «βαθμός απαίτησης / διαθεσιμότητα» και «διαθεσιμότητα μείον ζήτηση».

Η ανάπτυξη δεικτών εκτίμησης της πίεσης στα υδατικά αποθέματα και η συμμετοχή τους στις μεθοδολογίες ανάλυσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων έχει δώσει τη δυνατότητα παραγωγής μετρήσιμης πληροφορίας και έχει αποτελέσει σημαντικό εργαλείο στη χάραξη πολιτικών σε παγκόσμιο επίπεδο προς τη βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων, όπως φαίνεται και στην Ατζέντα 2030.

Μεθοδολογίες όπως η Εκτίμηση Υδατικού Αποτυπώματος –EYA (Water Footprint Assessment - WFA) ή η Ανάλυση Κύκλου Ζωής –AKZ (Life Cycle Analysis - LCA) αποτελούν δυναμικό πεδίο έρευνας τις τελευταίες δύο δεκαετίες στην προσπάθεια αποτύπωσης και ποσοτικοποίησης της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Η αποτύπωση αυτή είναι μια διαδικασία επίπονη δεδομένης της έλλειψης μετρήσιμων μεταβλητών. Οι προσπάθειες των ερευνητών προσανατολίζονται στη μείωση της αβεβαιότητας των συμπερασμάτων με την ανάπτυξη όσο το δυνατόν ακριβέστερων δεικτών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δυο μεθοδολογίες που αναφέρθηκαν και οι οποίες αποτελούν διαφορετικούς τρόπους προσέγγισης της αποτύπωσης της επίδρασης των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στους φυσικούς πόρους και το περιβάλλον.

1.3 Εκτίμηση Υδατικού Αποτυπώματος

Η Εκτίμηση Υδατικού Αποτυπώματος αποτελεί μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία εκτίμησης της ανθρώπινης ιδιοποίησης των υδάτινων πόρων και αποτύπωσης των περιβαλλοντικών της επιπτώσεων. Σκοπός της είναι η ανάλυση της συσχέτισης των ανθρώπινων προϊόντων ή δραστηριοτήτων με την ποσοτική και ποιοτική πίεση στα υδατικά αποθέματα έτσι ώστε να επιτευχθεί έπειτα από τις ανάλογες δράσεις η βιωσιμότητά τους ενώ βασικό συστατικό της μεθοδολογίας αποτελεί το Υδατικό Αποτύπωμα.

Υδατικό Αποτύπωμα (Water Footprint – WF) είναι ο όγκος νερού που καταναλώνεται και ρυπαίνεται κατά την παραγωγή ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας κατά μήκος ολόκληρης της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Η έννοια του υδατικού αποτυπώματος προέκυψε σχετικά πρόσφατα από τους Hoekstra και Hung (2002) και βασίστηκε στον όρο «εικονικό νερό» (“virtual water”) που επινόησε πρώτος ο Allan

(1993). Με τον όρο αυτό ο J.A. Allan, καθηγητής στο King's College του Λονδίνου, αναφέρθηκε στο νερό που «ενσωματώνεται» στα προϊόντα όχι μόνο ως πραγματικά περιεχόμενο νερό αλλά και ως νερό που καταναλώνεται σε κάθε στάδιο της διαδικασίας παραγωγής τους. Πολλά προϊόντα και κυρίως τα αγροτικά, σημείωσε, απαιτούν μεγάλες ποσότητες για την παραγωγή τους. Για παράδειγμα ένα κιλό σιτάρι απαιτεί έναν τόνο νερού για να παραχθεί. Έτσι, υποστήριξε, οι χώρες που υφίστανται σημαντική πίεση στα υδατικά τους αποθέματα θα μπορούσαν να εισάγουν νερό από άλλες χώρες μέσω της εισαγωγής προϊόντων (Allan, 1997, Allan, 2002). Ήταν αυτή η λογική που επέτρεψε στον Allan να αμφισβητήσει την επικρατούσα τότε άποψη ότι οι επόμενοι πόλεμοι στον πλανήτη θα γινόντουσαν για το νερό (Allan, 2002). Με την επαναστατική αυτή σύλληψη ο Allan άνοιξε νέους ερευνητικούς δρόμους και για τη συνεισφορά του στο πεδίο βραβεύτηκε το Μάρτιο του 2008 από το Παγκόσμιο Ινστιτούτο Νερού της Στοκχόλμης (Stockholm International Water Institute – SIWI).

Στις αρχές της πρώτης δεκαετίας του 21^{ου} αιώνα, η έννοια του εικονικού νερού επεκτάθηκε στην ιδέα του «Υδατικού Αποτυπώματος» από τον Hoekstra (Hoekstra & Hung, 2002). Η ιδέα αυτή περιλαμβάνει δυο σημαντικές προσθήκες στην αρχική προσέγγιση του Allan. Πρώτον, το αποτύπωμα ενός προϊόντος περιέχει το νερό που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή της πρώτης ύλης, συν το νερό που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των πρόσθετων υλών, της συσκευασίας του, της ενέργειας που καταναλώθηκε κατά τη διαδικασία παραγωγής και το νερό που χρησιμοποιήθηκε στην υπόλοιπη εφοδιαστική αλυσίδα. Δεύτερον, η ανάλυση του υδατικού αποτυπώματος λαμβάνει υπόψη και τις δυο άκρες της διακίνησης του εικονικού νερού, δηλαδή και το από που προέρχεται αλλά και το που καταλήγει (Hoekstra & Mekonnen, 2012b).

Το «Δίκτυο Υδατικού Αποτυπώματος» (Water Footprint Network-WFN), μια μη κυβερνητική οργάνωση (NGO) που συστάθηκε στην Ολλανδία, υιοθέτησε τον όρο του Υδατικού Αποτυπώματος και τον ανέπτυξε περαιτέρω σε ένα μεθοδολογικό οδηγό (Hoekstra et al., 2011). Σύμφωνα με αυτόν *«το υδατικό αποτύπωμα ενός ατόμου, μιας κοινότητας ή μιας εταιρείας ορίζεται ως ο συνολικός όγκος φρέσκου νερού που χρησιμοποιείται και ρυπαίνεται για την παραγωγή αγαθών και υπηρεσιών από το άτομο, την κοινότητα ή παράγεται από την εταιρεία»*.

Το υδατικό αποτύπωμα οποιουδήποτε προϊόντος ή υπηρεσίας διακρίνεται σε τρία συστατικά, το πράσινο υδατικό αποτύπωμα, το μπλε υδατικό αποτύπωμα και το γκρι υδατικό αποτύπωμα.

Το πράσινο Υδατικό Αποτύπωμα (green Water Footprint – WF_{green}) αναφέρεται στην κατανάλωση κατά μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας του πράσινου νερού δηλαδή της ενεργής βροχόπτωσης. Το πράσινο νερό αναφέρεται στη βροχόπτωση η οποία δεν απορρέει ούτε αποθηκεύεται στον υπόγειο υδροφόρα. Είναι η βροχόπτωση η οποία αποθηκεύεται στο έδαφος ή παροδικά παραμένει στην επιφάνεια του εδάφους ή της βλάστησης.

Το μπλε Υδατικό Αποτύπωμα (blue Water Footprint – WF_{blue}) αναφέρεται στην κατανάλωση κατά μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας του προϊόντος του μπλε νερού δηλαδή των επιφανειακών ή υπόγειων υδάτων.

Ο όρος «κατανάλωση» αναφέρεται στην απώλεια του νερού από μια υδρολογική λεκάνη είτε λόγω της εξάτμισής του, είτε λόγω της μεταφοράς του σε άλλη υδρολογική λεκάνη ή τη θάλασσα είτε λόγω της ενσωμάτωσής του στο προϊόν.

Το γκρι Υδατικό Αποτύπωμα (grey Water Footprint – WF_{grey}) αναφέρεται στη ρύπανση των υδάτινων πόρων που προκαλεί μια παραγωγική διαδικασία και ορίζεται ως ο όγκος νερού που απαιτείται για να αφομοιωθεί το φορτίο των ρυπαντών, με δεδομένες τις φυσικές τους συγκεντρώσεις και τα υφιστάμενα περιβαλλοντικά πρότυπα ποιότητας υδάτων της περιοχής. Πρακτικά το γκρι νερό δεν είναι πραγματικό νερό, είναι η ποσοτικοποίηση της ρύπανσης του νερού εκφρασμένη σε μονάδες όγκου νερού.

Το Υδατικό Αποτύπωμα διαφέρει από τους υπόλοιπους δείκτες χρήσης νερού στα ακόλουθα σημεία:

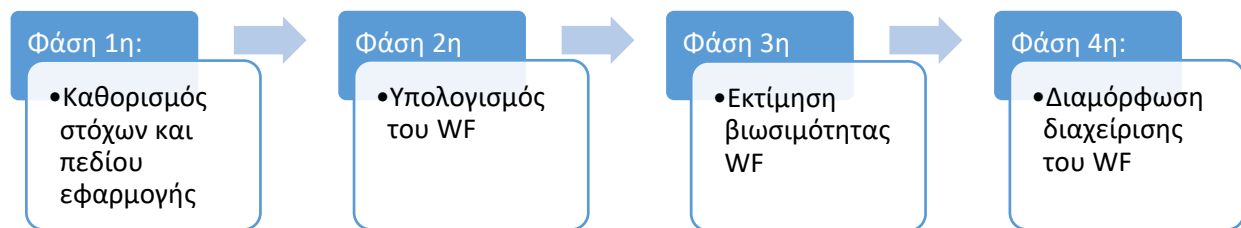
1. Δεν περιλαμβάνει όλη την ποσότητα του νερού που αντλήθηκε όπως συμβαίνει με τους υπόλοιπους δείκτες χρήσης νερού, αλλά μόνο την ποσότητα αυτή που πραγματικά χρησιμοποιήθηκε εφόσον η περίσσεια νερού επιστρέφει στην ίδια υδρολογική λεκάνη.
2. Δεν περιορίζεται στο μπλε νερό (επιφανειακά και υπόγεια ύδατα) αλλά περιλαμβάνει επιπλέον το πράσινο νερό (βροχόπτωση) και το γκρι νερό (ρύπανση).
3. Δεν περιορίζεται στην άμεση υδατική κατανάλωση αλλά περιλαμβάνει και την έμμεση χρήση νερού στα διάφορα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας.

Ένα άλλο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του WF είναι η χωροχρονική διάσταση που έχει. Το WF υπολογίζεται στο σημείο που γίνεται η κατανάλωση και η ρύπανση νερού αλλά και το χρόνο που γίνεται η διεργασία που επιδρά στα τοπικά υδατικά αποθέματα (όπου και όποτε καταναλώνεται και ρυπαίνεται το νερό). Αυτή είναι πολύ σημαντική διάσταση, καθώς η διαθεσιμότητα και η πίεση στα υδατικά αποθέματα διαφοροποιείται μέσα στο χρόνο. Έτσι σε μια περιοχή μπορεί η μέση ετήσια διαθεσιμότητα υδατικών πόρων να φαίνεται επαρκής όμως συγκεκριμένους μήνες του χρόνου αυτή η διαθεσιμότητα να μην είναι η ίδια και να υπάρχει πίεση στα αποθέματα (πχ βροχοπτώσεις το χειμώνα και ξηρασία το καλοκαίρι).

Το υδατικό αποτύπωμα αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τα όργανα λήψεων αποφάσεων στην προσπάθεια να βελτιωθεί η διαχείριση των υδάτινων πόρων και να διασφαλιστεί η αιθροική χρήση του νερού.

1.3.1 Μεθοδολογία Εκτίμησης του Υδατικού Αποτυπώματος ΕΥΑ (Water Footprint Assessment – WFA)

Το Υδατικό Αποτύπωμα και πιο συγκεκριμένα ο υπολογισμός του, αποτελεί μέρος της ολοκληρωμένης διαδικασίας εκτίμησής του η οποία περιλαμβάνει τέσσερις διακριτές φάσεις (Εικόνα 1.2):



Εικόνα 1.2 Φάσεις ανάλυσης του WF

1.3.1.1 Φάση 1: Καθορισμός στόχων και πεδίου εφαρμογής (Setting goals and scope)

Κατά τη φάση αυτή γίνεται ο προσδιορισμός του επιπέδου ανάλυσης. Το WF μπορεί να υπολογιστεί σε διάφορα επίπεδα και σε διαφορετική έκταση σε κάθε επίπεδο. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε το WF μιας υδρολογικής λεκάνης, μιας διοικητικής περιοχής, μιας χώρας, ή και σύνολα αυτών ή ακόμα και σε επίπεδο πλανήτη. Μπορεί να υπολογιστεί σε επίπεδο έτους, ή περιόδου του έτους ή σε βάθος δεκαετίας κ.τ.λ. Μπορεί να υπολογιστεί σε επίπεδο καλλιέργειας, προϊόντος, εταιρείας, διαδικασίας ή και μέρους της διαδικασίας. Υπολογίζεται σε επίπεδο καταναλωτή, ομάδας καταναλωτών ή πληθυσμού μιας χώρας ή μιας ομάδας χωρών ή και του πλανήτη.

Σε ό,τι έχει να κάνει με το σκοπό υπολογισμού του WF κάποιος μπορεί να ενδιαφέρεται να υπολογίσει το WF για να ευαισθητοποιήσει ένα κοινωνικό σύνολο, για να αναγνωρίσει το επίκεντρο μιας επίδρασης, για να χαράξει μια πολιτική ή για να θέσει ένα συγκεκριμένο στόχο. Ο σκοπός υπολογισμού του WF συνδέεται και με την επιλογή του επιπέδου υπολογισμού του. Έτσι, αν για παράδειγμα το ενδιαφέρον εστιάζει στην ευαισθητοποίηση ή στη χάραξη πολιτικών, τότε γενικά δεδομένα από ευρύτερα σύνολα (εθνικές ή παγκόσμιες μέσες εκτιμήσεις δεδομένων) είναι αρκετά. Αν όμως το ενδιαφέρον εστιάζει στην αναγνώριση του επίκεντρου μιας επίδρασης (hotspot), τότε απαιτείται λεπτομερέστερη προσέγγιση και πιο εξειδικευμένα δεδομένα.

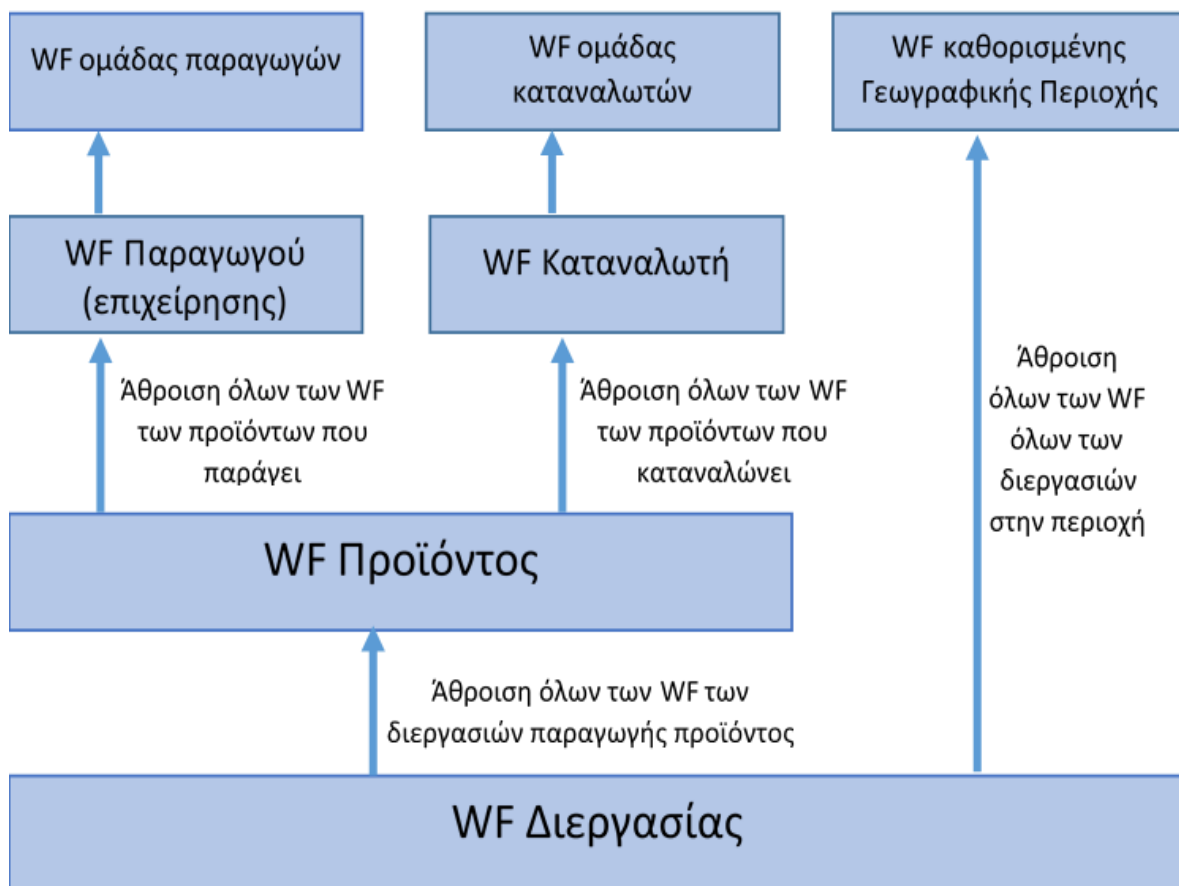
Το πεδίο εφαρμογής καθορίζει πρακτικά τα απογραφικά όρια της ανάλυσης, δηλαδή ποια από τα δεδομένα θα συμπεριλάβει και ποια θα αποκλείσει ο μελετητής κατά τη διεξαγωγή της ανάλυσης. Η διαδικασία αυτή συνδέεται με το σκοπό υπολογισμού του WF. Έτσι στο στάδιο αυτό ο μελετητής μπορεί να αποφασίσει εάν θα υπολογίσει όλα τα συστατικά του WF ή μόνο κάποια από αυτά. Για παράδειγμα εάν κάποιος θέλει να υπολογίσει το WF μιας εταιρείας, μπορεί να αγνοήσει το πράσινο WF. Από την άλλη, αν κάποιος θέλει να υπολογίσει το WF ενός γεωργικού προϊόντος μιας αρδευόμενης καλλιέργειας εστιάζοντας στο μπλε νερό που βρίσκεται σε έλλειψη, μπορεί τελικά να αποφασίσει να μην αποκλείσει το πράσινο WF από τον υπολογισμό, καθώς έτσι μπορεί να αξιολογήσει και τη δυνατότητα αντικατάστασης του μπλε νερού (και vice versa). Αντίστοιχοι στοχασμοί μπορούν να γίνουν και για την έκταση της εφοδιαστικής αλυσίδας που θα λάβει υπόψη (δηλαδή σε ποιο σημείο της εφοδιαστικής αλυσίδας θα σταματήσει την ανάλυση), και για τη χρονική περίοδο για την οποία θα συλλέξει ή θα αξιοποιήσει δεδομένα. Στην περίπτωση των εταιρειών ή των καταναλωτών θα αποφασίσει για το εάν θα υπολογίσει το άμεσο (νερό που καταναλώνεται απευθείας για πόση) ή/και το έμμεσο WF (νερό που υπάρχει στα καθημερινά προϊόντα που χρησιμοποιούνται ή καταναλώνονται από τους εργαζόμενους στην εταιρεία ή τους καταναλωτές), ενώ στην περίπτωση υπολογισμού του WF σε κρατικό επίπεδο θα πρέπει ο μελετητής να αποφασίσει εάν θα υπολογίσει το υδατικό αποτύπωμα της χώρας δηλαδή το νερό που καταναλώνεται μέσα στα γεωγραφικά όρια του κράτους και το οποίο περιλαμβάνει το νερό για την παραγωγή των προϊόντων που καταναλώνονται εντός των ορίων της χώρας αλλά και των προϊόντων που εξάγονται ή το υδατικό αποτύπωμα των κατοίκων της χώρας το οποίο περιλαμβάνει και το νερό που καταναλώνεται για την παραγωγή προϊόντων που εισάγονται.

1.3.1.2 Φάση 2: Υπολογισμός Υδατικού Αποτυπώματος (Water Footprint Accounting)

Στη φάση αυτή συλλέγονται τα δεδομένα και πραγματοποιούνται οι σχετικοί υπολογισμοί. Το επίπεδο λεπτομέρειας στον υπολογισμό εξαρτάται από τις αποφάσεις που έχει λάβει ο

μελετητής στην προηγούμενη φάση. Το WF ενός προϊόντος υπολογίζεται ως το άθροισμα των WF της κάθε επιμέρους διαδικασίας παραγωγής του προϊόντος αυτού.

Το WF ενός παραγωγού (ή μιας εταιρείας ή μιας ομάδας παραγωγών) υπολογίζεται ως το άθροισμα των WF των προϊόντων που παράγει. Το WF ενός καταναλωτή (ή μιας ομάδας καταναλωτών) ισούται με το WF των προϊόντων που καταναλώνει. Το WF μιας καθορισμένης γεωγραφικής περιοχής ισούται με το άθροισμα των WF όλων των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή αυτή. Τέλος, το WF της ανθρωπότητας υπολογίζεται ως το άθροισμα των WF όλων των καταναλωτών του πλανήτη, το οποίο ισούται με το άθροισμα όλων των προϊόντων και υπηρεσιών που καταναλώνονται σε ετήσια βάση και το οποίο με τη σειρά του ισούται με το άθροισμα όλων των διεργασιών παραγωγής προϊόντων ή υπηρεσιών στον πλανήτη. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι το WF μιας διεργασίας αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό των υπολοίπων WF (Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3 Ο υπολογισμός του WF μιας διεργασίας αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό όλων των υπολοίπων επιπέδων WF

Το συνολικό Υδατικό Αποτύπωμα μιας διεργασίας ($WF_{proc,total}$) γενικά υπολογίζεται ως το άθροισμα των συστατικών του: Πράσινο Υδατικό Αποτύπωμα ($WF_{proc,green}$), Μπλε Υδατικό Αποτύπωμα ($WF_{proc,blue}$), Γκρι Υδατικό Αποτύπωμα ($WF_{proc,grey}$) (Εξίσωση 1.3):

$$WF_{proc,total} = WF_{proc,green} + WF_{proc,blue} + WF_{proc,grey}$$

Το WF είναι δείκτης κατανάλωσης νερού. Ο όρος «κατανάλωση» αναφέρεται σε μία από τις παρακάτω τέσσερις περιπτώσεις:

1. Το νερό εξατμίζεται, η πιο σημαντική περίπτωση «κατανάλωσης»
2. Το νερό ενσωματώνεται στο προϊόν
3. Το νερό δεν επιστρέφει στην ίδια υδρολογική λεκάνη (π.χ. επιστρέφει σε άλλη υδρολογική λεκάνη ή στη θάλασσα)
4. Το νερό δεν επιστρέφει την ίδια περίοδο (πχ αντλείται το καλοκαίρι και επιστρέφει το χειμώνα)

Με βάση τα παραπάνω το πράσινο WF ισούται με (Εξίσωση 1.4):

$$WF_{\delta\iota\alpha\delta,\pi\rho\alpha\sigma} = \text{Εξάτμιση Πράσινου νερού} + \text{Ενσωμάτωση Πράσινου νερού στο προϊόν}$$

$$(WF_{proc,green} = \text{Green Water Evaporation} + \text{Green Water Incorporation})$$

Το πράσινο νερό αναφέρεται στη βροχόπτωση η οποία δεν απορρέει ούτε αποθηκεύεται στον υπόγειο υδροφόρο. Είναι η βροχόπτωση η οποία αποθηκεύεται στο έδαφος ή παροδικά παραμένει στην επιφάνεια του εδάφους ή της βλάστησης. Το πράσινο WF υπολογίζει ως κατανάλωση πράσινου νερού το τμήμα εκείνο της βροχής που χρησιμοποιήθηκε σε μια διεργασία π.χ. καλλιέργεια.

Το μπλε WF μιας διαδικασίας υπολογίζεται ως (Εξίσωση 1.5):

$$WF_{\delta\iota\alpha\delta,\mu\pi\lambda\epsilon} = \text{Εξάτμιση Μπλε νερού} + \text{Ενσωμάτωση Μπλε νερού στο προϊόν} \\ + \text{Απώλειες στη ροή επιστροφής}$$

$$(WF_{proc,blue} = \text{Blue Water Evaporation} + \text{Blue Water Incorporation} + \text{Lost Return Flow})$$

Το μπλε νερό αναφέρεται στο νερό της φυσικής απορροής το οποίο δεν επιστρέφει στην υδρολογική λεκάνη. Επομένως, η κατανάλωση μπλε νερού αναφέρεται στην άντληση μέρους του νερού της φυσικής απορροής για τη χρήση του σε μια διεργασία. Οι απώλειες στη ροή επιστροφής (Lost Return Flow) αναφέρονται στο μέρος της ροής επιστροφής που δεν είναι διαθέσιμο για χρήση στην ίδια λεκάνη είτε γιατί επιστρέφεται σε άλλη λεκάνη είτε γιατί επιστρέφεται σε άλλη περίοδο του χρόνου.

Είναι σημαντικό εδώ να γίνει κατανοητό ότι η κατανάλωση μπλε νερού αναφέρεται στην απομάκρυνση μέρους της φυσικής απορροής του νερού σε μια υδρολογική λεκάνη. Έτσι, όταν μιλάμε για κατανάλωση μπλε νερού, αναφερόμαστε στο μέρος της φυσικής απορροής της λεκάνης (είτε από επιφανειακά ύδατα είτε από υπόγεια) που χρησιμοποιούμε για μια διεργασία. Έτσι, εάν συλλέξουμε και αποθηκεύσουμε νερό της βροχής για να το χρησιμοποιήσουμε σε μια διεργασία, τότε δε θεωρείται αυτό το νερό πράσινο αλλά μπλε, γιατί εκείνο το μέρος της βροχής

που συλλέξαμε θα εμπλούτιζε τους επιφανειακούς ή υπόγειους αποδέκτες (δεξαμενές) που αποτελούν τις πηγές μπλε νερού και άρα μέρος της φυσικής απορροής.

Το γκρι WF μιας διαδικασίας υπολογίζεται ως (Εξίσωση 1.6):

1.6

$$WF_{\text{διαδ,γκρι}} = \frac{\text{Ρυπαντικό φορτίο}}{\text{περιβαλλοντικά όρια για το ρυπαντή} - \text{φυσική συγκεντρωση ρυπαντή}}$$

$$(WF_{\text{proc, grey}} = \frac{L}{c_{\text{max}} - c_{\text{nat}}})$$

Η φυσική συκέντρωση του ρυπαντή σε έναν υδάτινο αποδέκτη (c_{nat}) είναι η συκέντρωση του ρυπαντή που θα υπήρχε στον αποδέκτη, εάν δεν υπήρχε καμία ανθρώπινη παρέμβαση στη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής. Όταν δεν είναι γνωστή αυτή η συκέντρωση, θεωρούμε ότι ισούται με μηδέν. Τα περιβαλλοντικά όρια για το ρυπαντή (c_{max}) αναφέρονται στη μέγιστη συκέντρωση που επιτρέπουν τα τοπικά περιβαλλοντικά πρότυπα για το συγκεκριμένο ρυπαντή. Το ρυπαντικό φορτίο (L) συνδέεται με τις εκροές της διεργασίας.

Ο υπολογισμός του WF μιας καλλιεργητικής διαδικασίας περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 1.3.2.

1.3.1.3 Φάση 3: Εκτίμηση βιωσιμότητας Υδατικού Αποτυπώματος (Water Footprint sustainability assessment)

Στη φάση της εκτίμησης της βιωσιμότητας του WF, αξιολογείται το WF από περιβαλλοντική, κοινωνική και οικονομική άποψη. Ο ερευνητής στο στάδιο αυτό αξιολογεί εάν το WF που υπολόγισε είναι περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά βιώσιμο. Για να καταλάβουμε αν ένα WF είναι περιβαλλοντικά βιώσιμο θα πρέπει να το συγκρίνουμε με τους διαθέσιμους υδατικούς πόρους κάνοντας πρακτικά μια σύγκριση του ανθρώπινου WF με το τι μπορεί η Γη να υποστηρίξει.

Η βιωσιμότητα του WF αναλύεται σε διάφορα επίπεδα: γεωγραφική περιοχή, παραγωγική διαδικασία, προϊόν, καταναλωτής, παραγωγός, κ.τ.λ.) λαμβάνοντας υπόψη και τα αντίστοιχα δεδομένα. Εάν θέλουμε να διερευνήσουμε τη βιωσιμότητα του WF μιας συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής, τότε θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τις απαιτήσεις της περιβαλλοντικής ροής ή τα τοπικά περιβαλλοντικά πρότυπα ποιότητας του νερού ή τη δικαιοσύνη στην κατανομή του νερού στη συγκεκριμένη υδρολογική λεκάνη. Εάν θέλουμε να διερευνήσουμε τη βιωσιμότητα του WF μιας διαδικασίας, τότε έχουμε δυο κριτήρια: α) το χρόνο (περίοδο του έτους) και τη γεωγραφική περιοχή (υδρολογική λεκάνη) στην οποία λαμβάνει χώρα η διαδικασία, και β) τη δυνατότητα μείωσης κάποιου ή όλων των συστατικών του WF. Δηλαδή, εάν η διαδικασία πραγματοποιείται σε μια εποχή σε μια συγκεκριμένη υδρολογική λεκάνη που το WF της είναι μη βιώσιμο, τότε και το WF της διαδικασίας είναι μη βιώσιμο ή εάν κάποιος ή όλα από τα συστατικά (πράσινο, μπλε γκρι) μπορεί να μειωθεί τότε και πάλι είναι μη βιώσιμο ανεξάρτητα από τη βιωσιμότητα η όχι του WF της γεωγραφικής περιοχής. Στην περίπτωση της ανάλυσης της βιωσιμότητας του WF ενός προϊόντος τότε αυτή εξαρτάται από τη βιωσιμότητα των επί μέρους διαδικασιών παραγωγής του προϊόντος. Στην περίπτωση του καταναλωτή τότε διερευνούμε τη βιωσιμότητα των προϊόντων που χρησιμοποιεί κ.ο.κ. Αντιλαμβανόμαστε δηλαδή

ότι σε όποιο επίπεδο και αν επιθυμούμε να αναλύσουμε τη βιωσιμότητα ενός WF (προϊόν, διεργασία, καταναλωτή, κ.τ.λ.), εμείς επιστρέφουμε στα προηγούμενα επίπεδα και πάντα η βιωσιμότητα συνδέεται με το γεωγραφικό πλαίσιο.

1.3.1.4 Κριτήρια βιωσιμότητας WF σε μια γεωγραφική περιοχή

Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα η κοινωνική βιωσιμότητα και η οικονομική βιωσιμότητα αποτελούν τα κριτήρια βιωσιμότητας ενός WF.

Περιβαλλοντική βιωσιμότητα: Η ποιότητα του νερού θα πρέπει να διατηρείται μέσα σε συγκεκριμένα όρια που συνήθως είναι τα «περιβαλλοντικά πρότυπα ποιότητας νερού» που έχουν συμφωνήσει οι άνθρωποι. Επιπλέον, οι ροές των ποταμών και των υπόγειων υδάτων θα πρέπει να παραμένουν μέσα σε συγκεκριμένα όρια που ορίζονται από τη φυσική απορροή που απαιτείται για τη διατήρηση των οικοσυστημάτων των ποταμών και των υπόγειων υδάτων και των ανθρώπων που εξαρτώνται από αυτά τα οικοσυστήματα.

Στο πλαίσιο του ελέγχου της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας για τα τρία αποτυπώματα (πράσινο, μπλε, γκρι) ο έλεγχος της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας γίνεται σε επίπεδο λεκάνης απορροής για ένα προσδιορισμένο χρονικό διάστημα. Πρακτικά γίνεται σύγκριση του κάθε τύπου αποτυπώματος με την αντίστοιχη διαθεσιμότητα στη λεκάνη απορροής.

Έτσι ένα πράσινο WF σε μία λεκάνη απορροής μια συγκεκριμένη περίοδο θεωρείται μη βιώσιμο, όταν η τιμή του ξεπερνά την διαθεσιμότητα πράσινου νερού ($green\ water\ availability - WA_{green}[x,t]$) στη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής x τη συγκεκριμένη περίοδο t . Υπολογίζεται επομένως ο δείκτης έλλειψης πράσινου νερού ($green\ water\ scarcity - WS_{green}$) (Εξίσωση 1.7):

1.7

$$WS_{green}[x,t] = \frac{\sum WF_{green}[x,t]}{WA_{green}[x,t]}$$

Η διαθεσιμότητα πράσινου νερού στη λεκάνη απορροής x την περίοδο t ορίζεται ως η συνολική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας που καλύπτεται από τη βροχή (ET_{green}) μείον την εξατμισοδιαπνοή που διατηρείται για φυσική βλάστηση ET_{env} (περιβαλλοντική απαίτηση νερού) και μείον την εξατμισοδιαπνοή από τις μη παραγωγικές εκτάσεις (δηλαδή σε περιοχές και περιόδους του χρόνου που δεν είναι κατάλληλες για καλλιέργεια) (Εξίσωση 1.8):

1.8

$$WA_{green}[x,t] = ET_{green}[x,t] - ET_{env}[x,t] - ET_{unprod}[x,t]$$

Αντίστοιχα για το μπλε WF, ο δείκτης έλλειψης μπλε νερού (WS) υπολογίζεται ως (Εξίσωση 1.9):

1.9

$$WS_{blue}[x,t] = \frac{\sum WF_{blue}[x,t]}{WA_{blue}[x,t]}$$

Η διαθεσιμότητα μπλε νερού στη λεκάνη απορροής x την περίοδο t ορίζεται ως η φυσική απορροή στη λεκάνη απορροής ($natural\ run-off - R_{nat}$) μείον την απαίτηση περιβαλλοντικής ροής (Environmental Flow Requirement – EFR) (Εξίσωση 1.10):

$$WA_{blue}[x, t] = R_{nat}[x, t] - EFR[x, t]$$

Για να υπολογίσουμε τη φυσική απορροή της λεκάνης απορροής προσθέτουμε την πραγματική απορροή της λεκάνης απορροής συν το μπλε WF της λεκάνης αυτής.

Η βιωσιμότητα του γκρι WF γίνεται με τον υπολογισμό του δείκτη «επίπεδο ρύπανσης νερού» (Water Pollution Level –WPL) στη λεκάνη απορροής ο οποίος μετράει το βαθμό ρύπανσης. Μια τιμή του δείκτη που ξεπερνάει το 100% σημαίνει ότι η ικανότητα αφομοίωσης των ρύπων έχει πλήρως ξεπεραστεί. Ο δείκτης υπολογίζεται για μια λεκάνη απορροής x την περίοδο t ως το πηλίκο των συνολικών γκρι αποτυπωμάτων στη λεκάνη προς την πραγματική απορροή (R_{act}) σύμφωνα με την εξίσωση 1.11:

$$WPL[x, t] = \frac{\sum WF_{grey}[x, t]}{R_{act}[x, t]}$$

Η τιμή της πραγματικής ροής σε μια λεκάνη απορροής δίνεται από τα υδρολογικά δεδομένα της λεκάνης απορροής.

Κοινωνική βιωσιμότητα: Μια ελάχιστη ποσότητα από το διαθέσιμο νερό στη Γη πρέπει να κατανέμεται/παρέχεται για την κάλυψη των βασικών ανθρώπινων αναγκών (πόση, πλούσιμο και μαγείρεμα) και την παραγωγή τροφής για την εξασφάλιση ενός επαρκούς επιπέδου κάλυψης διατροφικών αναγκών για όλους. Αυτό σημαίνει ότι μόνο το τμήμα του διαθέσιμου φρέσκου νερού που μένει, αφού αφαιρέσουμε τις περιβαλλοντικές ανάγκες και τις υδατικές απαιτήσεις για τη διατήρηση των βασικών αναγκών των ανθρώπων, μπορεί να διατεθεί για αγαθά «πολυτελείας».

Οικονομική βιωσιμότητα: Οι υδάτινοι πόροι θα πρέπει να κατανέμονται και να χρησιμοποιούνται με οικονομικά αποτελεσματικό τρόπο. Το κέρδος από ένα WF που προκύπτει από τη χρήση νερού για κάποιο συγκεκριμένο σκοπό θα έπρεπε να ξεπερνά το κόστος που σχετίζεται με αυτό το WF συμπεριλαμβάνοντας τις εξωτερικότητες¹, τα κόστη ευκαιρίας² και ένα ενοίκιο σπανιότητας³. Σε αντίθετη περίπτωση το WF δεν είναι βιώσιμο.

Εάν έστω και ένα από τα παραπάνω κριτήρια δεν ικανοποιείται, τότε το WF σε μια υδρολογική λεκάνη θεωρείται μη βιώσιμο.

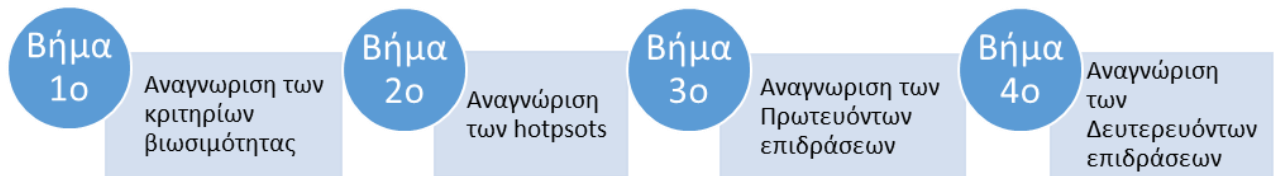
¹ Εξωτερικότητες (externalities): οι παρενέργειες που δημιουργούνται όταν η λειτουργία μιας αγοράς επηρεάζει άτομα έξω από την αγορά. Αρνητική εξωτερικότητα: η μη αποζημιωμένη ζημιά που επιβάλλεται από τη δραστηριότητα σε μια αγορά, σε άτομα που δε μετέχουν στην κατανάλωση/παραγωγή του συγκεκριμένου αγαθού (π.χ. εκπομπές καυσαερίων από αυτοκίνητα, εργοστασιακά απόβλητα σε φυσικούς αποδέκτες). Θετική εξωτερικότητα: το μη αντισταθμισμένο όφελος που δέχονται άτομα από τη λειτουργία μιας αγοράς και τα οποία άτομα δε συμμετέχουν στην αγορά αυτή (π.χ. όφελος μελισσοκόμου από δασοκομία).

² Κόστος ευκαιρίας (opportunity cost): είναι το κόστος που προκύπτει από τη θυσία ενός αγαθού για την παραγωγή κάποιου άλλου.

³ Ενοίκιο σπανιότητας (scarcity rent): το οριακό κόστος ευκαιρίας που επιβάλλεται στις επόμενες γενιές με την εξαγωγή μιας μονάδας από έναν πόρο σήμερα. Το ενοίκιο σπανιότητας είναι ένα από τα δυο κόστη που επιβάλλει στην κοινωνία η χρήση ενός πεπερασμένου πόρου, το άλλο είναι το οριακό κόστος εξαγωγής.

Η εκτίμηση της βιωσιμότητας του WF μέσω της αναγνώρισης και ποσοτικοποίησης των κριτηρίων βιωσιμότητας οδηγεί στον καθορισμό των hotspots δηλαδή περιοχών ή περιόδων του έτους όπου το WF δεν είναι βιώσιμο και άρα πρέπει να μειωθεί.

Επόμενο βήμα στη διαδικασία της ανάλυσης βιωσιμότητας του WF είναι ο προσδιορισμός των Πρωτευόντων και Δευτερευόντων Επιδράσεων. Πρωτεύουσες ορίζονται οι επιδράσεις οι οποίες σχετίζονται με την αλλαγή στη ροή ή και την ποιότητα των υδάτων ενώ οι δευτερεύουσες με την υποβάθμιση οικολογικών, κοινωνικών και οικονομικών αγαθών ή υπηρεσιών σε μια υδρολογική λεκάνη ως συνέπεια των πρωτευόντων επιδράσεων (Εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.4 Βήματα εκτίμησης της βιωσιμότητας του WF σε μια γεωγραφική περιοχή

Κατά τη διαδικασία ανάλυσης της βιωσιμότητας ενός WF στα επόμενα επίπεδα (διαδικασία, προϊόν, παραγωγός, καταναλωτής) τα κριτήρια αξιολόγησης έχουν δυο κατευθύνσεις: α) το γεωγραφικό πλαίσιο, και β) τη δυνατότητα μείωσης κάποιων ή όλων των συστατικών του WF.

1.3.1.5 Φάση 4: Διαμόρφωση διαχείρισης του Υδατικού Αποτυπώματος (Water Footprint response formulation)

Στη φάση αυτή διαμορφώνονται οι δράσεις, οι στρατηγικές ή οι πολιτικές με κατεύθυνση τη μείωση του WF. Σε αυτό το στάδιο έχει μεγάλη σημασία η κατανόηση από όλα τα μέρη της αλυσίδας της κοινής ευθύνης. Είναι ευθύνη του καταναλωτή να έχει χαμηλό WF όπως και του παραγωγού να διαθέτει προϊόντα με χαμηλό αποτύπωμα όπως και των κυβερνόντων να διασφαλίζουν τη βιώσιμη παραγωγή και κατανάλωση των αγαθών. Και αυτή η ευθύνη δεν είναι μεμονωμένη και διακριτή σε κάθε μέρος της αλυσίδας, αλλά διαπλέκεται ανάμεσα σε και αλληλοεπιδρά με όλα τα μέρη της αλυσίδας.

Η μείωση του WF μπορεί να επιτευχθεί με δυο διαφορετικούς τρόπους: α) την αντικατάσταση μιας τεχνικής παραγωγής με μιας άλλη, ώστε να βελτιωθεί η παραγωγική διαδικασία, ή β) την αποφυγή της χρήσης ενός συστατικού ή προϊόντος. Παράδειγμα βελτίωσης της παραγωγικής διαδικασίας είναι στη γεωργία η αντικατάσταση της άρδευσης με εκτοξευτήρες με τη στάγδην άρδευση, η αντικατάσταση της συμβατικής με τη βιολογική καλλιέργεια, ή στη βιομηχανία η αντικατάσταση του ανοικτού συστήματος ψύξης με κλειστό σύστημα ψύξης. Παραδείγματα αποφυγής είναι η αλλαγή σε χορτοφαγική διαίτα (αποφυγή κατανάλωσης κρέατος), αποφυγή χρήσης χημικών, κ.τ.λ.

Γενικά το μπλε και το γκρι WF μπορεί να μηδενιστεί στα νοικοκυριά και τη βιομηχανία μέσω της ανακύκλωσης του νερού. Στη γεωργία το γκρι WF μπορεί να μηδενιστεί με την αποφυγή χρήσης χημικών στον αγρό (βιολογική γεωργία). Το πράσινο και μπλε WF μπορούν να μειωθούν σημαντικά αυξάνοντας την παραγωγικότητα του νερού είτε μέσω της αύξησης των ξηρικών καλλιεργειών στον πλανήτη (αύξηση παραγωγικότητας πράσινου νερού) είτε μέσω της

εφαρμογής άρδευσης ακριβείας ή ελλειμματικής άρδευσης (αύξηση παραγωγικότητας μπλε νερού).

1.3.2 Μεθοδολογία υπολογισμού του Υδατικού Αποτυπώματος καλλιεργειών

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία υπολογισμού του WF στις καλλιέργειες.

Σε μια καλλιεργητική διαδικασία το συνολικό WF (WF_{total}) ισούται με το άθροισμα των επιμέρους συστατικών του σύμφωνα με την εξίσωση 1.12:

1.12

$$WF_{proc} = WF_{proc,green} + WF_{proc,blue} + WF_{proc,grey}$$

Το WF εκφράζεται σε μονάδες όγκου προς βάρος δηλαδή $m^3 Mg^{-1}$.

Το πράσινο WF υπολογίζεται ως το πράσινο συστατικό της Υδατοκατανάλωσης (Crop Water Use –CWU) και διαιρείται με την παραγωγή (Yield – Y) (Εξίσωση 1.13)

1.13

$$WF_{proc,green} = \frac{CWU_{green}}{Y}$$

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το WF υπολογίζει ως κατανάλωση μόνο το μέρος εκείνο του νερού που πραγματικά χρησιμοποιήθηκε και όχι τη συνολική ποσότητα που εφαρμόστηκε. Επομένως, για την περίπτωση του πράσινου νερού ως «χρήση πράσινου νερού» δεν υπολογίζουμε όλη τη ποσότητα της βροχόπτωσης (ενεργού βροχόπτωσης) αλλά μόνο εκείνο το τμήμα της που χρησιμοποίησε το φυτό. Η ποσότητα που χρησιμοποίησε το φυτό ισούται με την πράσινη εξατμισοδιαπνοή (ET_{green}), δηλαδή το μέρος εκείνο της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας που καλύφθηκε από τη βροχόπτωση. Επομένως η «πράσινη υδατοκατανάλωση» όλης της καλλιεργητικής περιόδου ισούται με το άθροισμα των ημερήσιων πράσινων εξατμισοδιαπνοών (ET_{green}) σε χιλιοστά ανά ημέρα (mm/day) κατά τη διάρκεια όλης της καλλιεργητικής περιόδου (lgr- length of growing period) σε ημέρες (days –d) (Εξίσωση 1.14)

1.14

$$CWU_{green} = 10 \times \sum_{d=1}^{lgr} ET_{green} \quad [m^3 ha^{-1}]$$

Ο παράγοντας 10 χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του βάθους νερού σε mm σε όγκο νερού ανά επιφάνεια καλλιεργήσιμης γης $m^3 ha^{-1}$.

Επομένως, η εξίσωση 1.13 γίνεται:

1.15

$$WF_{green} = \frac{CWU_{green}}{Y} = \frac{10 \times \int_{d=1}^{lgr} ET_{green}}{Y} \quad [m^3 Mg^{-1}]$$

Αντίστοιχα, το μπλε WF υπολογίζεται ως το μπλε συστατικό της Υδατοκατανάλωσης (Crop Water Use –CWU) και διαιρείται με την παραγωγή (Yield – Y) (Εξίσωση 1.16):

1.16

$$WF_{proc,blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y}$$

Ως μπλε υδατοκατανάλωση θεωρούμε το τμήμα εκείνο της άρδευσης που πραγματικά χρησιμοποίησε η καλλιέργεια και ισούται με την μπλε εξατμισοδιαπνοή (το τμήμα της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας που καλύφθηκε από την άρδευση) και ισούται με το άθροισμα των ημερήσιων μπλε εξατμισοδιαπνοών (ET_{blue}) σε χιλιοστά ανά ημέρα (mm/day) κατά τη διάρκεια όλης της καλλιεργητικής περιόδου (lgr- length of growing period) σε ημέρες (days – d) (Εξίσωση 1.17)

1.17

$$CWU_{blue} = 10 \times \sum_{d=1}^{lgr} ET_{blue} \quad [m^3 \text{ ha}^{-1}]$$

Επομένως, η εξίσωση 1.16 γίνεται:

1.18

$$WF_{blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} = \frac{10 \times \int_{d=1}^{lgr} ET_{blue}}{Y} \quad [m^3 \text{ Mg}^{-1}]$$

Το γκριζο WF όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.3.1.2 υπολογίζεται ως το πηλίκο του ρυπαντικού φορτίου (L) δια της διαφοράς μεταξύ των περιβαλλοντικών υδατικών προτύπων για το συγκεκριμένο ρυπαντή (μέγιστη αποδεκτή συγκέντρωση - maximum acceptable concentration c_{max}) και της φυσικής του συγκέντρωσης (natural concentration) στον υδάτινο αποδέκτη (c_{nat}) (Εξίσωση 1.19).

1.19

$$WF_{proc,gray} = \frac{L}{c_{max} - c_{nat}}$$

Σε μια καλλιεργητική διεργασία το γκρι WF υπολογίζεται ως το πηλίκο της έκπλυσης της εφαρμοζόμενης ποσότητας του χημικού στον αγρό ανά εκτάριο δια της διαφοράς της μέγιστης επιτρεπόμενης συγκέντρωσης (c_{max} , kg m⁻³) μείον τη φυσική συγκέντρωση του ρυπαντή (c_{nat} , kg m⁻³) προς την τελική παραγωγή (Y, Mg ha⁻¹). Η έκπλυση της εφαρμοζόμενης ποσότητας ρυπαντή ισούται με την εφαρμοζόμενη ποσότητα ρυπαντή (AR- application rate, kg ha⁻¹) επί το βαθμό έκπλυσης (a) (Εξίσωση 1.20).

1.20

$$WF_{proc,gray} = \frac{(a \times AR)/c_{max} - c_{nat}}{Y} \quad [m^3 \text{ Mg}^{-1}]$$

1.3.2.1 Εκτίμηση πράσινης και μπλε εξατμισοδιαπνοής (ET_{green} , ET_{blue})

Είδαμε ότι για τον υπολογισμό του μπλε και πράσινου WF μιας καλλιεργητικής διαδικασίας είναι απαραίτητο να υπολογίσουμε την πράσινη και μπλε εξατμισοδιαπνοή (Εξισώσεις 1.15 και 1.18). Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής είναι μια πολύ επίπονη διαδικασία και στην πράξη γίνεται η εκτίμησή της μέσω μοντέλων. Ευρεία εφαρμογή έχει η προσέγγιση των Penman-Montieth όπως περιγράφεται στην αναφορά 56 του FAO (Allen et al., 1998). Οι Hoekstra et al. (2011) στο Εγχειρίδιο Ανάλυσης του WF προτείνουν για την εκτίμηση της Εξατμισοδιαπνοής στον αγρό τη χρήση του εργαλείου CROPWAT που έχει αναπτύξει ο FAO βασιζόμενος στη μεθοδολογία εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής των Allen et al. (1998).

Με βάση το Εγχειρίδιο Ανάλυσης του WF προτείνονται δυο τρόποι εκτίμησης της πράσινης και μπλε εξατμισοδιαπνοής με τη χρήση του CROPWAT: α) η επιλογή «Υδατικές ανάγκες καλλιέργειας» και β) η επιλογή «Πρόγραμμα Άρδευσης».

1.3.2.1.1 Επιλογή «Υδατικές ανάγκες καλλιέργειας» (Crop Water Requirements - CWR) στο CROPWAT

Η επιλογή αυτή δεν είναι η πιο ακριβής αλλά είναι η πιο απλή και απαιτεί λιγότερα δεδομένα. Η συγκεκριμένη επιλογή υποθέτει ότι δεν υπάρχουν περιορισμοί στην ανάπτυξη της καλλιέργειας και υπολογίζει έπειτα από την εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων για την περιοχή ενδιαφέροντος: i) τις υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας σε όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου υπό συγκεκριμένες μετεωρολογικές συνθήκες, ii) αποτελεσματική βροχόπτωση για την ίδια περίοδο, και iii) απαιτήσεις άρδευσης. Οι απαιτήσεις σε νερό της καλλιέργειας είναι το νερό που απαιτείται για εξατμισοδιαπνοή υπό ιδανικές συνθήκες (η εδαφική υγρασία διατηρείται σε επαρκές επίπεδο σε όλη την καλλιεργητική περίοδο) και υπολογίζεται ως (Εξίσωση 1.21):

1.21

$$CWR = K_c \times ET_0$$

Όπου K_c = ο συντελεστής καλλιέργειας και ET_0 = η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς.

Η αποτελεσματική βροχόπτωση (Effective Precipitation – P_{eff}) είναι το μέρος εκείνο της βροχόπτωσης που συγκρατείται από το έδαφος και είναι δυνητικά διαθέσιμο για να καλύψει τις υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας. Το CROPWAT έχει τέσσερις εναλλακτικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό της.

Οι απαιτήσεις για άρδευση (Irrigation Requirements – IR) υπολογίζονται ως η διαφορά ανάμεσα στις υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας (δηλαδή την ET_c) μείον την αποτελεσματική βροχόπτωση (P_{eff}) σύμφωνα με την εξίσωση 1.22:

1.22

$$IR = CWR - P_{eff} = ET_c - P_{eff}$$

Η πράσινη εξατμισοδιαπνοή (ET_{green}) ισούται με το ελάχιστο μεταξύ της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας (ET_c) και της αποτελεσματικής βροχόπτωσης (P_{eff}) (Εξίσωση 1.23):

1.23

$$ET_{green} = \min(ET_c, P_{eff})$$

Η μπλε εξατμισοδιαπνοή (ET_{blue}) ισούται με τις ανάγκες άρδευσης (IR) (Εξίσωση 1.22), αλλά όταν η αποτελεσματική βροχόπτωση (P_{eff}) ξεπερνάει τις ανάγκες άρδευσης (IR), ισούται με μηδέν (Εξίσωση 1.24).

1.24

$$ET_{blue} = \max (0, ET_c - P_{eff})$$

1.3.2.1.2 Επιλογή «Πρόγραμμα Άρδευσης» του CROPWAT

Η επιλογή αυτή επιδεικνύει μεγαλύτερη ακρίβεια επιτρέποντας τον προσδιορισμό της πραγματικής άρδευσης σε όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Το μοντέλο περιλαμβάνει ένα ισοζύγιο εδαφικής υγρασίας το οποίο υπολογίζει την εδαφική υγρασία σε ημερήσιο βήμα. Το μοντέλο γι' αυτό το λόγο απαιτεί εισαγωγή δεδομένων που αφορούν το έδαφος. Αφού τρέξει το μοντέλο παράγεται η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (Actual Evapotranspiration - ET_a) που είναι μικρότερη από την ET_c που αντανακλά τις βέλτιστες συνθήκες, καθώς λαμβάνει υπόψη και το συντελεστή καταπόνησης της καλλιέργειας (K_s).

Όταν η καλλιέργεια είναι ξηρική επιλέγουμε «όχι άρδευση – no irrigation) και η πράσινη εξατμισοδιαπνοή ET_{green} ισούται με την ET_a που παράγει το μοντέλο.

Όταν η καλλιέργεια είναι αρδευόμενη καταχωρούμε τις αρδεύσεις και η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (ET_c) ισούται με την πραγματική εξατμισοδιαπνοή (ET_a).

Η μπλε εξατμισοδιαπνοή ET_{blue} ισούται με το ελάχιστο μεταξύ της «συνολικής καθαρής άρδευσης» («total net irrigation») και της ET_a (Εξίσωση 1.25).

1.25

$$ET_{blue} = \min(\text{"total net irrigation"}, ET_a)$$

Η πράσινη εξατμισοδιαπνοή ισούται με την πραγματική εξατμισοδιαπνοή μείον τη μπλε εξατμισοδιαπνοή (Εξίσωση 1.26)

1.26

$$ET_{green} = ET_a - ET_{blue}$$

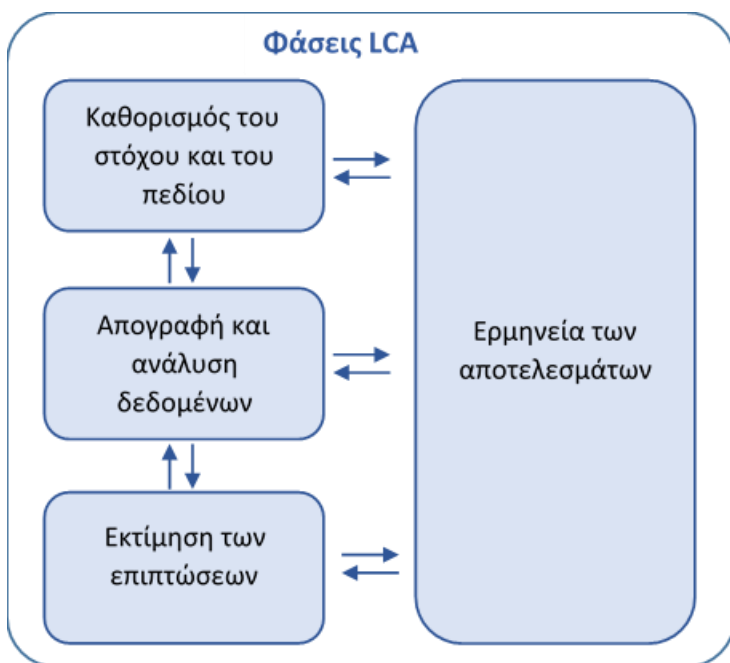
1.4 Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) –Life Cycle Assessment (LCA)

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040:2006 (ISO, 2006) η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) - Life Cycle Assessment (LCA) ορίζεται ως «η συλλογή και η αξιολόγηση δεδομένων που αφορούν τις εισροές, τις εκροές και τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός συστήματος προϊόντος σε όλο τον κύκλο ζωής του». Ο όρος «σύστημα προϊόντος» αναφέρεται σε όλες εκείνες τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα για την παραγωγή του προϊόντος. Επομένως, η LCA είναι ένα εργαλείο ανάλυσης της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης των προϊόντων σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους: από την εξαγωγή των πόρων, την παραγωγή του προϊόντος, τη χρήση του προϊόντος μέχρι και τη διαχείρισή του μετά την απόρριψή του, δηλ. «από τη γέννηση μέχρι το θάνατο» (“from the cradle to the grave”) (Guinée et al., 2001).

1.4.1 Μεθοδολογία διεξαγωγής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA)

Η ανάλυση Κύκλου Ζωής περιλαμβάνει τέσσερις φάσεις:

- Καθορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής (Goal and scope definition)
- Απογραφή και ανάλυση δεδομένων (Life Cycle Inventory -LCI)
- Εκτίμηση των επιπτώσεων –ΕΕΚΖ (Life Cycle Impact Assessment -LCIA)
- Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Life Cycle Interpretation)



Εικόνα 1.5 Φάσεις LCA

1.4.1.1 Καθορισμός του στόχου και πεδίου εφαρμογής (Goal and scope definition)

Το πρώτο στάδιο της LCA αφορά τον καθορισμό του στόχου της LCA και των ορίων εφαρμογής του. Ο προσδιορισμός του στόχου διεξαγωγής της LCA συνδέεται με το αντικείμενο μελέτης, τους λόγους για τους οποίους επιλέγεται να πραγματοποιηθεί η LCA, το κοινό στο οποίο απευθύνεται, και το επίπεδο επικοινωνίας των αποτελεσμάτων.

Το πεδίο εφαρμογής της LCA συνδέεται με πολλές παραμέτρους. Πρώτα προσδιορίζεται το σύστημα προϊόντος ή τα συστήματα προϊόντων που θα μελετηθούν, καθώς και οι λειτουργίες που παρέχει το σύστημα προϊόντος. Έπειτα ορίζεται η λειτουργική μονάδα (functional unit, FU) η οποία αποτελεί πρακτικά τη βάση ποσοτικοποίησης των λειτουργιών του συστήματος προϊόντος και το σημείο αναφοράς των εισροών και εκροών του συστήματος επιτρέποντας επιπλέον και τη σύγκριση με άλλα συστήματα. Στη συνέχεια καθορίζονται τα όρια του συστήματος που θα μελετηθεί. Υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις σε ό,τι αφορά την οριοθέτηση του υπό μελέτη συστήματος. Η ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε όλο τον κύκλο ζωής του προϊόντος (από τη γέννηση μέχρι το θάνατο –cradle-to-grave) ή σε τμήματα αυτού όπως από τη γέννηση μέχρι την πύλη (cradle-to-gate) όπως την ορίζει ο μελετητής. Για παράδειγμα μπορεί να εστιάσει η LCA στο σημείο εκείνο μέχρι την παραγωγή του προϊόντος και να αγνοήσει τη χρήση του ή την απόρριψή του.

1.4.1.2 Απογραφή και ανάλυση δεδομένων (Life Cycle Inventory -LCI)

Το στάδιο αυτό ορίζεται ως η φάση στην LCA όπου πραγματοποιείται η συλλογή και ποσοτικοποίηση των εισροών και των εκροών στο σύστημα προϊόντος. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται είτε από επιτόπιες μετρήσεις και υπολογισμούς είτε από τη βιβλιογραφία (υπάρχουσες βάσεις δεδομένων). Οι εισροές αφορούν τις πρώτες ύλες, την ενέργεια, άλλα προϊόντα που χρησιμοποιούνται στη γραμμή παραγωγής ή και οι υπηρεσίες. Στο στάδιο αυτό αρχικά αποτυπώνεται με σαφήνεια η ροή (ή οι ροές) της διεργασίας και γίνεται η συλλογή των δεδομένων σε κάθε στάδιο (σημείο) της διεργασίας. Η LCA είναι κυρίως ένα μοντέλο ποσοτικοποίησης και επομένως στο στάδιο αυτό όλες οι διεργασίες που συμπεριλαμβάνονται πρέπει να ποσοτικοποιούνται (Heijungs & Guinee, 2012). Για τη χρήση τους στην LCA, τα ανεπεξέργαστα (raw) δεδομένα μετατρέπονται (μοντελοποιούνται) σε μονάδες εισροών και εκροών με τη βοήθεια κατάλληλης τυπολογίας που έχει αναπτυχθεί και είναι διαθέσιμη στη βιβλιογραφία. Για παράδειγμα η ποσότητα αζωτούχου (N)-λιπάσματος που εφαρμόζεται κατά την παραγωγή ενός αγροτικού προϊόντος που εισάγεται στην LCA ως μονάδες N, μετατρέπονται για την εισαγωγή τους ως δεδομένο στις εκροές σε εκπομπές αμμωνίας, νιτρικών, εκπομπές οξειδίων του N στον αέρα, κ.ο.κ.

1.4.1.3 Εκτίμηση των επιπτώσεων –EEKZ (Life Cycle Impact Assessment -LCIA)

Το στάδιο της Εκτίμησης των Επιπτώσεων του Κύκλου Ζωής (EEKZ) – Life Cycle Impact Assessment (LCIA) είναι η φάση της LCA η οποία στοχεύει στην κατανόηση και εκτίμηση του μεγέθους και της σημασίας των δυνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός συστήματος προϊόντος σε όλο τον κύκλο ζωής του (Heijungs & Guinee, 2012). Στο στάδιο αυτό με βάση τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί στο προηγούμενο στάδιο ποσοτικοποιούνται οι δυνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αποτελείται από δυο υποχρεωτικές φάσεις (ταξινόμηση και χαρακτηρισμός) και δυο προαιρετικές (κανονικοποίηση και στάθμιση) (Εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.6 Φάσεις ΕΕΚΖ

Η πρώτη φάση της LCIA είναι η **Ταξινόμηση (Classification)**. Στο στάδιο αυτό κύριο συστατικό αποτελεί η Κατηγορία Επιπτώσεων (Impact Category) η οποία ορίζεται ως «η τάξη που αντιπροσωπεύει περιβαλλοντικά ζητήματα στα οποία μπορούν να αποδοθούν τα αποτελέσματα της Απογραφικής LCA» (Heijungs & Guinee, 2012). Η μελέτη των κατηγοριών επιπτώσεων συνδέεται με την επιλογή του σημείου στην αλληλουχία του μηχανισμού πρόκλησης επιπτώσεων που επιθυμούμε να εστιάσουμε. Για να γίνει κατανοητό το «σημείο» επιπτώσεων αυτό ας πάρουμε το παράδειγμα της κατηγορίας επιπτώσεων «Κλιματική Αλλαγή». Η Κλιματική αλλαγή περιλαμβάνει μια αλληλουχία μηχανισμών επιπτώσεων: οι εκπομπές των αερίων θερμοκηπίου οδηγεί σε αλλαγές στην ισορροπία της ακτινοβολίας η οποία οδηγεί σε αλλαγές στην κατανομή της θερμοκρασίας, οι οποίες προκαλούν αλλαγές στο κλίμα οι οποίες προκαλούν αλλαγές στη δραστηριότητα των οικοσυστημάτων, κ.ο.κ. Για να μπορέσουμε να ποσοτικοποιήσουμε τις εκπομπές των διαφόρων αερίων θερμοκηπίου σε έναν δείκτη για την κλιματική αλλαγή θα πρέπει να επιλέξουμε ένα σημείο στην αλληλουχία των επιπτώσεων. Αυτό μπορεί να είναι στην αρχή της αλληλουχίας (π.χ. αλλαγή στην ισορροπία της ακτινοβολίας) ή στο τέλος της αλληλουχίας (π.χ. αλλαγές στη βιοποικιλότητα) ή κάπου στη μέση (π.χ. αλλαγές θερμοκρασίας). Στην LCA έχουν προκύψει δυο κύριες σχολές: α) αυτή που εστιάζει στην αρχή και είναι γνωστή ως προσέγγιση ενδιάμεσου σημείου (midpoint approach), και β) αυτή που εστιάζει στο τέλος και είναι γνωστή ως προσέγγιση τελικού σημείου (endpoint approach). Οι επιπτώσεις μέσου σημείου έχουν το πλεονέκτημα ότι έχουν λιγότερες αμφισβητούμενες παραδοχές (περισσότερο μετρήσιμα αποτελέσματα), ενώ οι επιπτώσεις τελικού σημείου περιλαμβάνουν πιο κατανοητούς δείκτες (π.χ. απώλεια χρόνων ζωής αντί για ισοδύναμο CO₂- CO₂-equivalent). Οι δείκτες είτε στο ενδιάμεσο σημείο είτε στο τελικό σημείο ονομάζονται Δείκτες Κατηγορίας Επιπτώσεων.

Το επόμενο βήμα, αφού επιλέξουμε το σημείο επιπτώσεων, είναι ο **Χαρακτηρισμός (Characterisation)**, η μετατροπή δηλαδή των δεδομένων στο δείκτη που επιλέξαμε (δηλαδή να μετατρέψουμε π.χ. τα δεδομένα αερίων θερμοκηπίου σε αλλαγή στην ισορροπία της ακτινοβολίας). Για τη μετατροπή αυτή χρησιμοποιούμε την τυπολογία που έχει αναπτυχθεί από σχετικούς επιστήμονες και υπάρχει στη βιβλιογραφία. Για τις μετατροπές αυτές χρησιμοποιούνται οι συντελεστές χαρακτηρισμού (characterisation factors), ενώ υπάρχουν αρκετά μοντέλα χαρακτηρισμού (characterisation models). Υπάρχουν πολλές μεθοδολογίες εκτίμησης επιπτώσεων όπου περιλαμβάνονται οι κατηγορίες επιπτώσεων, οι δείκτες κατηγορίας επιπτώσεων και οι παράγοντες χαρακτηρισμού. Στην επόμενη παράγραφο αναλύονται οι

κατηγορίες επιπτώσεων με βάση την IMPACT World+ (Bulle et al., 2019) μεθοδολογία που εφαρμόζεται στην LCA της παρούσας εργασίας (Κεφάλαιο 3).

Επόμενο βήμα στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι η **Κανονικοποίηση (Normalisation)**. Το στάδιο αυτό, που θεωρείται προαιρετικό, αναφέρεται στον υπολογισμό του μεγέθους των αποτελεσμάτων των επιπτώσεων σε σχέση με μια βάση αναφοράς (Heijungs & Guinee, 2012). Πρακτικά το αποτέλεσμα ενός δείκτη επιπτώσεων διαιρείται με μια τιμή αναφοράς. Με αυτό τον τρόπο μας βοηθάει να καταλάβουμε το σχετικό μέγεθος κάθε δείκτη επιπτώσεων εκφράζοντας τον ως μερίδιο στη συνολική περιβαλλοντική επίπτωση σε μια περιοχή. Φαίνεται δηλαδή σε ποια κατηγορία επιπτώσεων ένα προϊόν συνεισφέρει σχετικά περισσότερο (Heijungs & Guinee, 2012).

Επόμενο επίσης προαιρετικό βήμα της LCIA είναι η **Στάθμιση (Weighting)**, κατά την οποία πολλαπλασιάζονται τα αποτελέσματα του χαρακτηρισμού ή της κανονικοποίησης με ένα παράγοντα στάθμισης και το άθροισμα των γινομένων αυτών μας δίνει μια τιμή συνολική για μια κατηγορία επίπτωσης (Εξίσωση 1.27) (Heijungs & Guinee, 2012).

1.27

$$W = \sum_c W F_c \times I_c$$

όπου $W F_c$ ο συντελεστής στάθμισης (Weighting Factor) της κατηγορίας επιπτώσεων c και I_c η τιμή των επιπτώσεων (Impact score) της κατηγορίας επιπτώσεων c . Με αυτό τον τρόπο καθίσταται δυνατή η σύγκριση διαφορετικών κατηγοριών επιπτώσεων (Bulle et al., 2019).

1.4.1.3.1 Κατηγορίες επιπτώσεων

Κλιματική αλλαγή: Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου οδηγούν αρχικά σε αύξηση της συγκέντρωσης τους στην ατμόσφαιρα η οποία επιδρά στο ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος γης - ατμόσφαιρας με την κατακράτηση της ακτινοβολίας (positive radiative forcing) και αυτό μπορεί να έχει διάφορες επιπτώσεις όπως αύξηση της θερμοκρασίας ή αλλαγές στις κατακρημνίσεις. Το IMPACT World+ εστιάζει στην αύξηση της θερμοκρασίας λόγω έλλειψης δεδομένων για τις άλλους τύπους των επιδράσεων. Η αύξηση στη μέση θερμοκρασία της Γης με τη σειρά της οδηγεί σε δυνητικές επιπτώσεις στους ανθρώπους και στο οικοσύστημα.

Ως δείκτες ενδιαμέσου σημείου για τη συγκεκριμένη κατηγορία επιπτώσεων εφαρμόζονται:

- Η *βραχυπρόθεσμη κλιματική αλλαγή (Climate change, short term)* (Myhre et al., 2013) με δείκτη το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη σε ορίζοντα 100 χρόνων (Global Warming Potential for a 100-year time horizon -GWP100) που χαρακτηρίζει την αθροιστική επιβολή ακτινοβολίας ανά κιλό εκπεμπόμενου αερίου του θερμοκηπίου και εκφράζει τις επιπτώσεις που σχετίζονται με μια ταχεία αύξηση της θερμοκρασίας στην οποία ο άνθρωπος και τα διάφορα είδη θα πρέπει να προσαρμοστούν γρήγορα.
- Η *μακροπρόθεσμη κλιματική αλλαγή (Climate change, long term)* (Myhre et al., 2013) με δείκτη το Δυναμικό της Θερμοκρασίας του Πλανήτη σε ορίζοντα 100 χρόνων (Global Temperature Potential for a 100-year time horizon -GTP100) που αντιπροσωπεύει την αλλαγή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πλανήτη σε ένα επιλεγμένο σημείο στο

χρόνο και εκφράζει τις επιπτώσεις που σχετίζονται με τη μακροπρόθεσμη σωρευτική υπερθέρμανση (π.χ. άνοδος της στάθμης της θάλασσας).

Η μονάδα μέτρησης των παραπάνω είναι τα κιλά ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (kg CO₂ equivalent). Αυτό σημαίνει ότι τα αέρια του θερμοκηπίου εκφράζονται σε σύγκριση με το δυναμικό που έχει το CO₂.

Χρήση Ορυκτών πόρων και καυσίμων: η χρήση τους συνδέεται με την εξάντληση των φυσικών πόρων οι οποίοι δεν είναι ανανεώσιμοι, καθώς απαιτούνται χρόνια για να δημιουργηθούν ξανά.

- *Χρήση ορυκτών πόρων (Mineral resources use)* (de Bruille, 2014) Ο δείκτης αυτός αναφέρεται στην ποσότητα των ορυκτών που εξαντλούνται και η μονάδα εκφράζεται σε κιλά του πόρου που αφαιρέθηκε ανά κιλό πόρου που εξαντλήθηκε (kg deprived/kg dissipated)
- *Χρήση ορυκτών καυσίμων (Fossil and nuclear energy use)* (Frischknecht et al., 2000) που αναφέρεται στα ορυκτά καύσιμα που εξαντλήθηκαν και η μονάδα του δείκτη είναι η παραγόμενη ενέργεια από τον εξαγόμενο πόρο ανά κιλό πόρου που εξαντλήθηκε δηλ. MJ που εξαντλήθηκαν ανά κιλό πόρου που εξαντλήθηκε (MJ deprived/kg dissipated).

Οξίνιση: όταν εκλύονται στην ατμόσφαιρα οξέα, τότε αυτά αντιδρούν με άλλες ουσίες και εναποτίθενται, μετά από μεταφορά τους πιθανώς και σε μεγάλες αποστάσεις, στο έδαφος ή/και στο νερό μεταβάλλοντας τα επίπεδα οξύτητας τους. Οι δείκτες που μελετώνται (Roy et al., 2014) για τη συγκεκριμένη κατηγορία είναι:

- *Οξίνιση Υδάτων (Freshwater acidification)* και
- *Εδαφική οξίνιση (Terrestrial acidification)*

που εκφράζουν την άνοδο του pH στους αποδέκτες (υδάτινα και εδαφικά συστήματα) λόγω της έκλυσης οξειδίων του αζώτου (NO_x), αμμωνίας (NH₃) και διοξειδίου του θείου (SO₂). Η μονάδα μέτρησης είναι τα κιλά του ισοδύναμου διοξειδίου του θείου (kg SO₂ eq).

Ευτροφισμός είναι το αποτέλεσμα του αυξημένου φορτίου θρεπτικών σε ένα υδάτινο σύστημα που οδηγεί στη μείωση του διαλυμένου οξυγόνου σε αυτά. Στο IMPACT World+ με μια απλουστευμένη υπόθεση, ο φώσφορος θεωρείται ο κύριος παράγοντας στα επιφανειακά υδάτινα συστήματα και το άζωτο στα θαλάσσια υδάτινα συστήματα. Επομένως έχουν αναπτυχθεί δυο δείκτες:

- *Ευτροφισμός επιφανειακών υδάτων (Freshwater eutrophication)* (Helmes et al., 2012) που εκφράζει την αύξηση της συγκέντρωσης φωσφόρου για κάθε κιλό φωσφόρου που ελευθερώνεται στα επιφανειακά ύδατα με μονάδα τα kg PO₄ P-lim eq
- *Θαλάσσιος ευτροφισμός (Marine eutrophication)* (Goedkoop et al., 2009) που εκφράζει την αύξηση στη συγκέντρωση αζώτου για κάθε κιλό αζώτου που ελευθερώνεται στη θάλασσα με μονάδα kg N N-lim eq.

Τοξικότητα: Οι εκπομπές χημικών ουσιών προκαλούν τοξικές επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο οικοσύστημα. Το IMPACT World+ έχει αναπτύξει τρεις δείκτες κατηγορίας επιπτώσεων:

- *Ανθρώπινη τοξικότητα καρκινογόνος (Human toxicity cancer)* (Hauschild & Wenzel, 1998) (Rosenbaum et al., 2015) προσδιορίζει την αύξηση στη θνησιμότητα στον παγκόσμιο πληθυσμό από καρκινογόνες ασθένειες για κάθε μονάδα μάζας χημικού που εκλύεται στο συγκεκριμένο περιβάλλον (περιπτώσεις καρκινογόνου ασθένειας ανά kg χημικής ουσίας που εκλύεται) και η μονάδα είναι οι συγκριτικές μονάδες τοξικότητας (CTUh).

- *Ανθρώπινη τοξικότητα μη καρκινογόνος (Human toxicity non-cancer)* (Hauschild & Wenzel, 1998) (Rosenbaum et al., 2015) προσδιορίζει την αύξηση στη θνησιμότητα στον παγκόσμιο πληθυσμό από μη καρκινογόνες ασθένειες για κάθε μονάδα μάζας χημικού που εκλύεται στο συγκεκριμένο περιβάλλον (περιπτώσεις μη καρκινογόνου ασθένειας ανά kg χημικής ουσίας που εκλύεται) και η μονάδα είναι οι συγκριτικές μονάδες τοξικότητας (CTUh).
- *Οικοτοξικότητα υδάτων (Freshwater ecotoxicity)* (Jolliet et al., 2003) εκφράζεται ως συγκριτικές τοξικές μονάδες (comparative toxic units -CTUe) για κάθε μονάδα βάρους εκλυόμενου χημικού.

Ιονίζουσα Ακτινοβολία: Οι επιπτώσεις σχετίζονται με την έκλυση στην ατμόσφαιρα ραδιενεργών ενώσεων και την πρόσληψή τους από τον άνθρωπο. Ο δείκτης που έχει αναπτυχθεί είναι:

- *Ιονίζουσα ακτινοβολία (Ionizing radiation)* (European Commission, 2011) που σχετίζεται με την έκθεση σε ραδιενεργές ουσίες και με μονάδα τα Becquerel (Bq) ισοδύναμου C14 (Bq C-14 eq)

Χρήση γης: Οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν επιπτώσεις στη γη η οποία είτε μετατρέπεται η φυσική της κατάσταση (αλλαγή χρήσης γης) είτε καταλαμβάνεται δηλαδή διατηρείται σε μια άλλη, μη φυσική, κατάσταση. Οι επιπτώσεις στη γη σχετίζονται με τη βιοποικιλότητα καθώς και με βασικές λειτουργίες που σχετίζονται με την ανθρώπινη κοινωνία όπως η βιοτική παραγωγή (η παραγωγή χρήσιμης βιομάζας όπως τροφή, ξυλεία, φαρμακευτικά ή και καλλωπιστικά είδη φυτών, ενέργεια κ.α.), ο εμπλουτισμός των υδάτινων συστημάτων, το φιλτράρισμα νερού, η ρύθμιση του κλίματος και η προστασία από τη διάβρωση. Οι δείκτες που έχουν αναπτυχθεί είναι:

- *Χρήση γης, βιοποικιλότητα (Land occupation, biodiversity)* (De Baan et al., 2013) εκφράζει την απώλεια της βιοποικιλότητας από τη χρήση γης για κάποιο διάστημα και η μονάδα είναι m^2 ισοδύναμου καλλιεργήσιμης γης για κάθε έτος χρήσης ($m^2_{arable\ land\ eq} \cdot Yr$)
- *Αλλαγή χρήσης γης, βιοποικιλότητα (Land transformation, biodiversity)* (De Baan et al., 2013) εκφράζει την απώλεια της βιοποικιλότητας από την αλλαγή της χρήσης γης και η μονάδα είναι m^2 ισοδύναμου καλλιεργήσιμης γης ($m^2_{arable\ land\ eq}$).

Καταστροφή της στιβάδας του Όζοντος: Η καταστροφή της στιβάδας του όζοντος συμβαίνει λόγω ανθρωπογενών εκλύσεων ουσιών στην ατμόσφαιρα. Η καταστροφή του συνδέεται με συνέπειες για το οικοσύστημα αλλά και τον άνθρωπο (καρκίνος του δέρματος) λόγω της διείσδυσης της ακτινοβολίας UV-B στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και στην επιφάνεια της γης. Ο δείκτης που έχει αναπτυχθεί είναι:

- *Καταστροφή της στιβάδας του όζοντος (Ozone layer depletion)* (European Commission, 2011) που εκφράζει τη συγκέντρωση στην τροπόσφαιρα των αερίων που συνεισφέρουν στην καταστροφή της στιβάδας του όζοντος και μονάδα τα κιλά ισοδύναμου Χλωροφθοράνθρακα-11 (kg CFC-11 eq)

Αιωρούμενα σωματίδια: Η εισπνοή αιωρούμενων σωματιδίων διαμέτρου μικρότερης των 2,5 μm προκαλεί προβλήματα υγείας και μειώνει το προσδόκιμο ζωής. Ο δείκτης που έχει αναπτυχθεί για αυτή την επίπτωση είναι:

- *Σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων (Particulate matter formation)* (Humbert et al., 2011)(Gronlund et al., 2016) που αναφέρεται στο τμήμα σωματιδίων διαμέτρου $<2,5\ \mu m$

που εισπνέονται από το συνολικό πληθυσμό και η μονάδα είναι τα κιλά ισοδύναμων αιωρούμενων σωματίων διαμέτρου <2,5 μm (kg PM2.5 eq)

Φωτοχημική οξειδωση: Οι αρνητικές επιπτώσεις των φωτοχημικών ρύπων οφείλονται στην ενεργή φύση τους που τους επιτρέπει να οξειδώνουν οργανικά μόρια στις επιφάνειες που εκτίθενται. Ο δείκτης που χρησιμοποιείται στη μεθοδολογία IMPACT World+ είναι:

- Σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών παραγόντων (*Photochemical oxidant formation*) (European Commission, 2011) ο οποίος εκφράζει την οριακή αύξηση της παραγωγής όζοντος λόγω εκπομπών πτητικών οργανικών ενώσεων πλην μεθανίου (Non-Methane Volatile Organic Compounds -NMVOC) με μονάδα τα κιλά ισοδύναμου των πτητικών οργανικών ενώσεων πλην μεθανίου (kg NMVOC eq)

Υδατικά αποθέματα: Η έλλειψη νερού επηρεάζει τον άνθρωπο και το οικοσύστημα. Η μεθοδολογία IMPACT World+ εφαρμόζει το δείκτη AWARE (Available Water Remaining) (Boulay et al., 2015):

- Έλλειψη νερού (*Water scarcity*) που βασίζεται στο διαθέσιμο νερό που εναπομένει αφού καλυφθούν οι απαιτήσεις των ανθρώπων και του οικοσυστήματος και η μονάδα είναι τα κυβικά ισοδύναμου παγκοσμίου διαθέσιμου νερού (m³ world eq).

Ο δείκτης αυτός βασίζεται στην προσέγγιση «διαθεσιμότητα – ζήτηση» (Availability Minus Demand –AMD) και ο συντελεστής χαρακτηρισμού υπολογίζεται σε μια περιοχή i ως εξής (Εξίσωση 1.28):

1.28

$$CF_{AWARE} = \frac{AMD_{\mu.o.παγκόσμιος}}{AMD_i}$$

όπου

1.29

$$AMD_i = \frac{\Delta \text{διαθεσιμότητα} - (\text{Ανθρώπινη Κατανάλωση} + \text{Απαιτήσεις Περιβαλλοντικής ροής})}{\text{Έκταση}} \quad (m^3/m^2 \times \text{μηνά})$$

Η διαθεσιμότητα ισούται με την πραγματική απορροή και μαζί με την ανθρώπινη κατανάλωση και τις απαιτήσεις περιβαλλοντικής ροής μετρούνται σε m³/μήνα. Η έκταση μετράται σε m².

1.4.1.4 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (*Life Cycle Interpretation*)

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι η φάση στην LCA κατά την οποία τα αποτελέσματα (ευρήματα) είτε της απογραφικής ανάλυσης ή της ανάλυσης επιπτώσεων ή και των δυο, αξιολογούνται σε σχέση με τον καθορισμένο στόχο και το πεδίο εφαρμογής έτσι ώστε να καταλήξουμε σε συμπεράσματα και προτάσεις (Heijungs & Guinee, 2012). Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τα ακόλουθα σημεία:

- Αναγνώριση των σημαντικών ζητημάτων
- Αξιολόγηση της πληρότητας, της ευαισθησίας και της ευρωστίας των αποτελεσμάτων

- Συμπεράσματα, περιορισμοί και προτάσεις
- Καταλληλότητα των ορισμών των λειτουργιών του συστήματος, της λειτουργικής μονάδας και των ορίων του συστήματος
- Αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων και ανάλυση ευαισθησίας

1.4.1.5 LCA Water Footprint

Η μεθοδολογία υπολογισμού του WF βάση LCA, η οποία εντάσσεται στο πρότυπο ISO14041, διαφοροποιείται από αυτή που έχουν αναπτύξει οι Hoekstra et al. (2011). Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύξαν οι Bradley G. Ridoutt & Pfister (2013) το WF αρχικά υπολογίζεται σε σχέση με τα υδατικά αποθέματα της περιοχής. Έπειτα το συνολικό WF ενός προϊόντος (ή διεργασίας) αποτελεί άθροισμα δυο συνιστωσών: α) της συνιστώσας κατανάλωσης (Consumptive Water Use – CWU) και β) της συνιστώσας υποβάθμισης (Degradative Water Use – DWU).

Για τον υπολογισμό της συνιστώσας κατανάλωσης η υδατική κατανάλωση (WU) πολλαπλασιάζεται με το δείκτη πίεσης στα υδατικά αποθέματα (Water Stress Index – WSI) της υδρολογικής λεκάνης όπου λαμβάνει χώρα η παραγωγή του προϊόντος (ή η παραγωγική διεργασία) ως συντελεστής χαρακτηρισμού (CF). Οι Ridoutt and Pfister (2013) έχουν αναπτύξει μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό του δείκτη για κάθε περιοχή σε μια λεκάνη απορροής (i) η οποία δίνει το λόγο άντλησης/διαθεσιμότητα (Withdrawal to Availability – WTA) (Εξίσωση 1.30):

1.30

$$WTA_i = \frac{\sum_j WU_{ij}}{WA_i}$$

όπου η WU_{ij} είναι η χρήση νερού για την κατηγορία χρήσης j (όπου j: αγροτική, βιομηχανική ή οικιακή χρήση) σε μια λεκάνη απορροής i και WA_i οι διαθέσιμοι υδάτινοι πόροι στη λεκάνη απορροής i. Ακολουθεί διόρθωση με το συντελεστή διόρθωσης VF (Pfister et al., 2009). Συνήθως λόγω δυσκολίας συλλογής δεδομένων αξιοποιείται στο σημείο αυτό ο παγκόσμιος χάρτης πίεσης στα υδατικά αποθέματα (Pfister and Baumann, 2012, Pfister and Bayer, 2014) (<https://esdmaps.ethz.ch/>).

Έπειτα από την ανάπτυξη του αναβαθμισμένου δείκτη της μεθόδου AWARE (Boulay et al., 2015) ο οποίος δε βασίζεται στην προσέγγιση «άντληση / διαθεσιμότητα», αλλά στην προσέγγιση «διαθεσιμότητα μείον ζήτηση», θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο τελευταίος δείκτης ως συντελεστής χαρακτηρισμού.

Για τον υπολογισμό της υποβάθμισης των υδάτων πρακτικά υπολογίζεται σύμφωνα με τη μεθοδολογία LCA η επίδραση των ρυπαντών και η τιμή που προκύπτει ως μονάδα (point) διαιρείται με την επιβάρυνση που προκύπτει από τη χρήση 1 m³ νερού (point / m³) οπότε προκύπτει μια τιμή για το προϊόν με μονάδα m³ / kg προϊόντος ή ανά έκταση (ha).

Το συνολικό WF ισούται με το άθροισμα των επιμέρους συνιστωσών (Εξίσωση 1.31):

1.31

$$WF_{H2Oeq} = CWU + DWU \quad (m^3 / kg \text{ προϊόντος ή ha έκτασης})$$

Ένα σημείο που αξίζει να τονισθεί είναι ότι από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι η συνιστώσα κατανάλωσης (CWU) συνδέεται με το μπλε WF κατά WFN και η συνιστώσα υποβάθμισης συνδέεται με το γκρι WF κατά WFN. Στην LCA μεθοδολογία δε λαμβάνεται καθόλου υπόψη το βρόχινο νερό (το πράσινο WF κατά WFN). Αυτό συμβαίνει γιατί η επίδραση στη συνεισφορά της βροχής στα υδατικά αποθέματα υπολογίζεται στο δείκτη της χρήσης γης όπως αναφέρθηκε νωρίτερα (1.4.1.3.1).

1.5 Διαφορές στην υπολογιστική προσέγγιση των διαφορετικών WF

Το WF στη μεθοδολογία WFN είναι μέτρο ιδιοποίησης του νερού από τον άνθρωπο, ενώ στη μεθοδολογία LCA είναι μέτρο επίπτωσης της χρήσης του από τον άνθρωπο στο περιβάλλον. Ήδη από τη φάση χαρακτηρισμού η μεθοδολογία της LCA υπολογίζει το WF σε σχέση με τη δυνατότητα (διαθεσιμότητα νερού) της λεκάνης απορροής, ενώ στο WFN αυτή η συσχέτιση γίνεται μόνο στο στάδιο της ανάλυσης της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Σύμφωνα με τους Ridoutt and Huang (2012) η αδυναμία του υπολογισμού του WF με τη μέθοδο του WFN έγκειται στην αποσυνδεδεμένη φύση του από τη λεκάνη απορροής στην οποία λαμβάνει χώρα η διεργασία παραγωγής του προϊόντος. Το WF με τη WFN μεθοδολογία «κρύβει» την πίεση στη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής με αποτέλεσμα να μην είναι συγκρίσιμο. Για τη χρησιμοποίηση του WF ως εργαλείο λήψης αποφάσεων και διαμόρφωσης πολιτικής θα πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπόψη η περιβαλλοντική συσχέτιση (Ridoutt & Huang, 2012).

Από την άλλη, οι Hoekstra και Mekonnen (2012b) τοποθετούν σε εντελώς διαφορετική βάση τη χρήση του WF για το σχεδιασμό πολιτικών βιώσιμης χρήσης των υδατικών αποθεμάτων. Κατά τη θεώρησή τους, την πίεση στα υδατικά αποθέματα θα πρέπει να τη βλέπουμε σε επίπεδο πλανήτη και όχι υδρολογικής λεκάνης. Προφανώς και αν ο στόχος είναι η μείωση της πίεσης σε μια υδρολογική λεκάνη θα πρέπει να συσχετίζεται το WF με τη διαθεσιμότητα της συγκεκριμένης υδρολογικής λεκάνης. Όμως το θέμα της πίεσης στα υδατικά αποθέματα είναι παγκόσμιο. Οι παγκόσμιοι διαθέσιμοι υδατικοί πόροι είναι περιορισμένοι και αν θέλουμε να δούμε το WF της ανθρωπότητας είναι σημαντικό να μετρήσουμε πως οι διαθέσιμοι υδάτινοι πόροι ιδιοποιούνται για συγκεκριμένους ανθρώπους. Παρατηρώντας την πολύ μικρή παραγωγικότητα νερού σε περιοχές με μεγάλα υδατικά αποθέματα εγείρεται το θέμα της δίκαιης κατανομής σε επίπεδο πλανήτη με δεδομένη τη δυνατότητα «μεταφοράς» νερού μέσω της διακίνησης των προϊόντων. Και εδώ τοποθετείται και η διαφωνία της συμμετοχής ή όχι του βρόχινου νερού στον υπολογισμό του WF, καθώς κατά το WFN η αύξηση της παραγωγικότητας του πράσινου νερού αποτελεί σημαντική παράμετρο «ελάφρυνσης» του μπλε αποτυπώματος. Το WF κατά WFN δίνει το πόσο νερό καταναλώνει και ρυπαίνει ένα προϊόν ή μια διεργασία ανεξάρτητα από το που λαμβάνει χώρα. Αυτή είναι η πραγματική πληροφορία που χρειάζεται να έχει ένα κέντρο λήψης αποφάσεων σύμφωνα με τους Hoekstra και Mekonnen (2012b). Πόσο «κοστίζει» σε νερό και περιβαλλοντική επιβάρυνση μια διαδικασία ή ένα προϊόν. Με αυτή την πληροφορία θα μπορεί να αναγνωρίσει τα «ακριβά» αγαθά ή διεργασίες και να αυξήσει την παραγωγικότητα του νερού που συμμετέχει σε αυτά στις περιοχές που τα αποθέματα νερού είναι μεγάλα.

Το 2013 έγινε μια προσπάθεια συμπληρωματικής χρήσης των δυο δεικτών με την ενσωμάτωση δηλαδή του WF κατά WFN στη μεθοδολογία LCA (Boulay, Hoekstra, & Vionnet, 2013). Αυτό που πρακτικά ακολούθησε είναι ότι στις μελέτες LCA το μπλε WF όπως υπολογίζεται κατά WFN αποτέλεσε το απογραφικό δεδομένο της χρήσης νερού για το χαρακτηρισμό του (για τη

στάθμιση δηλαδή με το δείκτη πίεσης στα υδατικά αποθέματα WSI) και όντως πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν αυτή την προσέγγιση. Το 2016 όμως ο Hoekstra (2016) διαχώρισε τη θέση του θεωρώντας ότι αυτή η πρακτική είχε θεμελιώδη για τον όρο WF μειονεκτήματα που συνδέονταν με την σύνδεση της υδατοκατανάλωσης με την τοπική έλλειψη νερού και όχι με την παγκόσμια, με την αγνόηση της έλλειψης του πράσινου νερού και της δυνατότητας αξιοποίησής του για τη μείωση της χρήσης του μπλε νερού με την ανάπτυξη ενός δείκτη που δεν έχει φυσικές διαστάσεις και δε γίνεται κατανοητός. Επιμένοντας ότι με την LCA προσέγγιση απομακρυνόμαστε πολύ από την έννοια του WF ως ένα ποσοτικό μέτρο της ανθρώπινης ιδιοποίησης των υδατικών αποθεμάτων και την αξιοποίηση του ως ένα εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων και σχεδιασμού πολιτικών για την ανακούφιση της πίεσης στα παγκόσμια υδατικά αποθέματα.

Εξάλλου εάν επιστρέψουμε στην αρχή της ιστορίας του WF, το έναυσμα για τη σύλληψη της έννοιας του εικονικού νερού από τον Allan (1993), που αποτέλεσε τη βάση της εξέλιξης του WF ήταν η κριτική του καθηγητή Gideon Fishelson του Πανεπιστημίου του Τελ Αβίβ στην κυβέρνηση του Ισραήλ για την καλλιέργεια εσπεριδοειδών για εξαγωγή όταν η χώρα δεν έχει νερό (Fishelson, 1994).

1.6 Ελιά

1.6.1 Καλλιέργεια ελιάς στη μεσόγειο και στον κόσμο

Η ελιά (*Olea europaea* L.) αποτελεί τυπική καλλιέργεια της Μεσογείου ήδη από την 6^η χιλιετηρίδα π.Χ. με τις νεότερες έρευνες να τοποθετούν τις γεωγραφικές της ρίζες είτε στις χώρες του Λεβάντε (χώρες της Μέσης Ανατολής που βρέχονται από την Ανατολική Μεσόγειο Θάλασσα) περίπου το 6500 π.Χ. και την Κρήτη το 6000 π.Χ. (Langgut et al., 2019). Ανεξάρτητα από την ακριβή θέση καταγωγής της η ελιά διαδόθηκε ευρέως στις χώρες της Μεσογειακής λεκάνης συνδέοντας την παρουσία της με την οικονομία, την ιστορία, την παράδοση και φυσικά το τοπίο της περιοχής. Προσπάθειες για εγκατάσταση της καλλιέργειας έγιναν και σε άλλες περιοχές εκτός Μεσογείου με παρόμοιο κλίμα όπως η Καλιφόρνια (πρώτη εισαγωγή κατά το 18^ο αιώνα μ.Χ. με τους Ισπανούς ιεραπόστολους, σταθερή καλλιέργεια κατά τον 20^ο αιώνα, εντατικά μετά το 1998 (Polari et al., 2021), η Αυστραλία (πρώτη εισαγωγή μαζί με μετανάστες αρχές 19^{ου} αιώνα, αλλά κυρίως τέλη του 19^{ου} αιώνα μέσω της προσπάθειας του Υπουργείου Γεωργίας της Αυστραλίας να εγκαταστήσει νέα είδη στην περιοχή, εντατικά μετά το 1995 (Mailer, 2012)), η Κίνα (το 1940 από τη Γαλλία –ή 1964 από Αλβανία- αλλά μετά το 1979 έναρξη συστηματικής καλλιέργειας, εντατική μετά το 2000 (Shan-an et al., 1981, Wang et al., 2019)). Τις τελευταίες δυο δεκαετίες παρατηρείται μια έντονη δραστηριότητα στον ελαιοκομικό χώρο παγκοσμίως, καθώς πολλές χώρες, είτε εντός της παραδοσιακής ζώνης καλλιέργειάς της είτε εκτός, επεκτείνουν τους ελαιώνες τους αυξάνοντας την παραγωγή, διεκδικώντας τη θέση τους στην παγκόσμια αγορά (FAO, 2022b). Αυτή η γεωγραφική επέκταση της ελαιοκαλλιέργειας συνδέεται με την αύξηση της κατανάλωσης ελαιόλαδου και ελαιοκομικών προϊόντων τις τελευταίες δεκαετίες (IOC, 2022), που προφανώς οφείλεται στη στροφή των καταναλωτών σε πιο υγιεινά πρότυπα διατροφής (Nianvis et al., 2018). Από τις μεσογειακές χώρες δυναμική είναι η παρουσία της Τυνησίας η οποία αύξησε τους ελαιώνες της κατά 161% (από $1,4 \times 10^6$ σε $3,6 \times 10^6$ ha) τα τελευταία 30 χρόνια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα όμως των εκτός παραδοσιακής ζώνης καλλιέργειας χωρών αποτελεί η Αυστραλία η οποία έχει αυξήσει την καλλιεργούμενη έκταση ελαιώνων περίπου κατά 6610% από το 1990 (FAO, 2022b) (από 500 ha σε 20132 ha) επενδύοντας ταυτόχρονα στα συστήματα υπέρ-πυκνής φύτευσης (Mailer, 2012).

Σήμερα καλλιεργούνται παγκοσμίως περίπου 13×10^6 ha (FAO, 2022b) παράγονται 24×10^6 τόνοι ελαιόκαρπου εκ των οποίων το 97% και το 93%, αντίστοιχα, εξακολουθεί να βρίσκεται στις παραδοσιακές χώρες της λεκάνης της Μεσογείου. Ετησίως παράγονται παγκοσμίως 3000×10^3 τόνοι ελαιόλαδο με σχεδόν το 65% να παράγεται από την Ισπανία, την Ιταλία και την Ελλάδα και 2800×10^3 επιτραπέζιας ελιάς με κυρίαρχες χώρες παραγωγής την Ισπανία, την Αίγυπτο, την Τουρκία και την Ελλάδα. Το προϊόν έχει μεγάλη οικονομική σημασία για τις μεσογειακές χώρες της Ευρώπης, καθώς συνιστά ένα από τα πιο εξαγωγίμα προϊόντα αυτών των χωρών. Περίπου το 65% της ποσότητας ελαιόλαδου που εξάγεται παγκοσμίως παράγεται στην Ευρωπαϊκή Ένωση (European Commission, 2022). Η Ελλάδα συμμετέχει σχεδόν στο 30% των εξαγωγών αυτών. Οι κύριες χώρες εξαγωγής είναι οι ΗΠΑ, η Βραζιλία και η Ιαπωνία (European Commission, 2022). Σε ό,τι αφορά τις επιτραπέζιες ελιές η συμμετοχή της Ελλάδας στην παγκόσμια παραγωγή επιτραπέζιας ελιάς είναι περίπου 9%, ενώ σε επίπεδο ευρωπαϊκής Μεσογείου αποτελεί τη δεύτερη χώρα σε κατάταξη μετά την Ισπανία συνεισφέροντας το 28% της συνολικής παραγωγής των κρατών αυτών. Οι ευρωπαϊκές χώρες της Μεσογείου εξάγουν το 45% τη συνολικής εξαγόμενης ποσότητας επιτραπέζιας ελιάς και η Ελλάδα συνεισφέρει στο 12,5% αυτού του ποσοστού.

1.6.2 Βασικά στοιχεία καλλιέργειας ελιάς

Η ελιά είναι γνωστή για την ανθεκτικότητά της στις πιο αντίξοες εδαφολογικές και κλιματολογικές συνθήκες. Είναι προσαρμοσμένη άριστα στο κλίμα της Μεσογείου και αποδίδει από τα γόνιμα εδάφη μέχρι και το πιο άγονο. Το ύψος της φτάνει μέχρι τα 15-20 μέτρα αν και όταν καλλιεργείται διατηρείται με κλάδεμα μέχρι τα 4-5 μέτρα ύψος. Το μεγαλύτερο ποσοστό του ριζικού συστήματος αναπτύσσεται στα 60-70 εκατοστά. Σε βαριά εδάφη το ριζικό σύστημα αναπτύσσεται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ σε αμμώδη και γενικά ελαφριά εδάφη και σε περιοχές με ξηρασία η ελιά αναπτύσσει εκτεταμένο ριζικό σύστημα που της επιτρέπει την πρόσληψη θρεπτικών και νερού από το έδαφος ακόμα και με ελάχιστες βροχοπτώσεις. Η ανάπτυξη των βλαστών της ελιάς λαμβάνει χώρα κυρίως την άνοιξη με την άνοδο της θερμοκρασίας και συνεχίζεται μέχρι το πολύ τα μέσα Ιουλίου. Έπειτα από τις φθινοπωρινές βροχοπτώσεις ή έπειτα από άρδευση μπορεί να ακολουθήσει και ένα δεύτερο κύμα βλάστησης το Σεπτέμβριο – Οκτώβριο. Το μέγεθος της ετήσιας βλάστησης επηρεάζεται από την καρποφορία, καθώς οι καρποί ανταγωνίζονται την ανάπτυξη της βλάστησης. Η διαφοροποίηση των οφθαλμών συμβαίνει τον Ιούνιο. Με την έναρξη της επικράτησης των χαμηλών θερμοκρασιών από τα μέσα Φθινοπώρου οι οφθαλμοί εισέρχονται σε λήθαργο ο οποίος διαρκεί μέχρι το τέλος Ιανουαρίου ή Φεβρουαρίου ανάλογα την ποικιλία. Για τη διαφοροποίηση των οφθαλμών σε ανθοφόρους απαιτούνται κάποιες ώρες ψύχους που παραλλάσσουν ανάλογα την ποικιλία. Μετά την αναγκαία κάλυψη των ωρών ψύχους ακολουθεί η έκπτυξη των ανθοφόρων οφθαλμών και στη συνέχεια η άνθηση. Στο στάδιο αυτό από την έκπτυξη των οφθαλμών και έξι εβδομάδες μετά η έλλειψη νερού ή αζώτου μειώνει την άνθηση και τον αριθμό των ανθέων στην ταξιανθία ή και των ερμαφρόδιτων ανθέων. Η έναρξη και η διάρκεια της ανθοφορίας ποικίλει ανάλογα την περιοχή καλλιέργειας και μπορεί να ξεκινά τα τέλη Μαρτίου μέχρι αρχές Ιουνίου και διαρκεί ανάλογα την ποικιλία από 5-6 ημέρες. Μετά τη γονιμοποίηση των ανθέων ξεκινά η καρπόδεση και η αύξηση του καρπού. Μόνο περίπου το 2%-4% των ανθέων θα γονιμοποιηθούν και θα οδηγήσουν σε καρποφορία. Στο επόμενο διάστημα ακολουθούν μορφολογικές μεταβολές στον καρπό που ολοκληρώνονται σε τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιούνται κυτταροδιαίρεσεις και σημειώνει γρήγορη αύξηση ο καρπός, στο δεύτερο στάδιο επιβραδύνεται η αύξηση αλλά

παρατηρείται η σκλήρυνση του πυρήνα και στο τρίτο στάδιο με την αύξηση του μεγέθους των κυττάρων αυξάνει γρήγορα ο καρπός. Η αύξηση του μεγέθους με τη σκλήρυνση του πυρήνα και την ταχύτερη αύξηση του καρπού λαμβάνει χώρα περίπου από τον Αύγουστο μέχρι τον Σεπτέμβριο (ανάλογα την ποικιλία). Η ωρίμανση του καρπού ανάλογα ξεκινάει από τα μέσα Οκτώβρη και ολοκληρώνεται ανάλογα με την ποικιλία. Στην ελιά εκφράζεται έντονα η παρεννιαυτοφορία, το χαρακτηριστικό της παραγωγής καρπών κάθε δυο ή παραπάνω χρόνια που οφείλεται στην παρεμπόδιση από τα σπέρματα των αναπτυσσόμενων καρπών της ανθικής επαγωγής λόγω ανταγωνισμού για θρεπτικά. Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την έκφραση αυτού του χαρακτηριστικού όπως η υδατική καταπόνηση, οι κλιματικοί παράγοντες που επικρατούν και η ποικιλία.

Η ελιά παραδοσιακά καλλιεργείται ως ξηρική και μπορεί να αναπτύσσεται και να καρποφορεί σε ικανοποιητικό βαθμό ακόμα και χωρίς την παροχή νερού άρδευσης κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Η ικανοποιητική ανάπτυξη και παραγωγή όμως δεν είναι αρκετή για τα ανταγωνιστικά σχήματα καλλιέργειας που υφίστανται πλέον παγκοσμίως και που απαιτούν το μέγιστο των αποδόσεων για να θεωρείται η καλλιέργεια βιώσιμη από οικονομικής πλευράς. Η παροχή άρδευσης βελτιώνει την ανάπτυξη των βλαστών με την αύξηση της ετήσιας βλάστησης, την αύξηση στη φυλλική επιφάνεια και τον αριθμό των φύλλων επιδρώντας θετικά στην παραγωγή της επόμενης χρονιάς. Βελτιώνει την ανθοφορία με την αύξηση της παραγωγής τέλειων ανθέων και την αύξηση του ποσοστού καρπόδεσης και ελέγχει το φαινόμενο της παρεννιαυτοφορίας (σε κάποιες ποικιλίες). Βελτιώνει την παραγωγή καρπών με την αύξηση του μεγέθους των καρπών και την αύξηση του αριθμού καρπών ανά δένδρο. Αυξάνει τη συνολική παραγωγή ελαιόλαδου ανά δένδρο αν και μειώνει την ελαιοπεριεκτικότητα του καρπού. Στις επιτραπέζιες ποικιλίες ελιάς η άρδευση είναι πιο σημαντική για την επίτευξη μεγάλου μεγέθους καρπού. Οι επιτραπέζιες ελιές θα πρέπει να αρδεύονται ιδιαίτερα κατά το τρίτο στάδιο της ανάπτυξης του καρπού ώστε να αυξηθεί το μέγεθός του. Υπερβολική όμως άρδευση αυτή την περίοδο μπορεί να αυξήσει τη βλαστική ανάπτυξη και την ευαισθησία των δένδρων στους χειμερινούς παγετούς.

Βροχοπτώσεις μέχρι και 450-650 mm/έτος καλύπτουν πλήρως τις υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας και δεν απαιτείται συμπληρωματικά άρδευση. Αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση που το ύψος των βροχοπτώσεων είναι μικρότερο από 450 mm/έτος οπότε και η άρδευση είναι αναγκαία. Η άρδευση είναι απαραίτητη όταν: α) οι βροχοπτώσεις δεν καλύπτουν τις υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας (οι οποίες προσδιορίζονται από την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας), β) δεν είναι σωστά κατανομημένες στο χρόνο, οι βροχοπτώσεις δηλαδή στα κρίσιμα στάδια της ανάπτυξης της ελιάς δεν ικανοποιούν τις υδατικές ανάγκες, και γ) η καλλιέργεια πραγματοποιείται σε πολύ ελαφρά ή ρηχά εδάφη που δε συγκρατούν νερό. Τα κρίσιμα στάδια στην ανάπτυξη της ελιάς όπου η έλλειψη νερού προκαλεί δυσμενείς επιπτώσεις στην ανάπτυξη του δέντρου και στην ελαιοπαραγωγή είναι: α) η περίοδος της ανάπτυξης των ανθοφόρων οφθαλμών, β) η περίοδος της ανθοφορίας και καρπόδεσης, γ) η περίοδος της ανάπτυξης των βλαστών, δ) το πρώτο στάδιο της ανάπτυξης των καρπών, και ε) το στάδιο της τρίτης φάσης ανάπτυξης τους καρπού (ταχεία αύξηση). Έλλειψη νερού στο στάδιο της ανάπτυξης των ανθοφόρων οφθαλμών προκαλεί μείωση των σχηματιζόμενων ανθοφόρων οφθαλμών, έλλειψη στο στάδιο της ανθοφορίας και μέχρι την καρπόδεση αυξάνει την παραγωγή ατελών ανθέων, μειώνει τον αριθμό των ανθοταξιών, ενισχύει την πτώση των ανθέων (ανθόρροια), μειώνει το ποσοστό καρπόδεσης, ενισχύει την καρπόπτωση και επιτείνει την παρεννιαυτοφορία.

Έλλειψη κατά το στάδιο της βλάστησης προκαλεί μειωμένη βλάστηση. Έλλειψη στο πρώτο στάδιο της ανάπτυξης του καρπού μειώνει την κυτταρική διαίρεση, ενώ έλλειψη νερού στα επόμενα στάδια ανάπτυξης του καρπού προκαλεί μικρό μέγεθος καρπού, μειωμένη αύξηση των κυττάρων και συρρίκνωση καρπών. Αντίθετα, η υπερβολική άρδευση στη συγκεκριμένη φάση ανάπτυξης και σε συνδυασμό με καλλιέργεια σε αμμώδη εδάφη μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική έκπλυση της αζωτούχου λίπανσης και σε καρπόπτωση (Therios, 2009, Chartzoulakis, 2015).

1.6.3 Κονσερβολιά

Η Κονσερβολιά (*Olea europaea* L. 'Konservolea') είναι ανάμεσα στις τρεις σημαντικότερες επιτραπέζιες ποικιλίες ελιάς που καλλιεργούνται στην Ελλάδα με τις άλλες δυο να είναι η Χονδρολιά Χαλκιδικής και η Καλαμών. Καλλιεργείται στη ζώνη της Κεντρικής Ελλάδας που εκτείνεται από τα ανατολικά στις περιοχές της Μαγνησίας, της Φθιώτιδας, της βόρεια Εύβοιας μέχρι στα δυτικά στις περιοχές της Άρτας, Αιτωλοακαρνανίας, και Ηγουμενίτσας. Συναντάται όμως και σε άλλες περιοχές όπως στη Μακεδονία ή ακόμα και στην Κρήτη. Λόγω της ευρείας εξάπλωσής της στην Ελλάδα τη συναντάμε με πολλά ονόματα όπως: Χονδρελιά, Αμφίσσης, Βόλου, Βολιώτικη, Άρτας, Αγρινίου, Μπολιάνα, Πατρινέικη, Πατρινή, Ματεσέικη κ.ά. (Κωστελένος, 2011). Η καλλιεργούμενη έκταση με Κονσερβολιά στη χώρα καλύπτει σχεδόν το 8% της συνολικής έκτασης ελαιοκαλλιέργειας καταλαμβάνοντας 53974 ha σε σύνολο 733456 ha (2020) και το 47% της καλλιεργούμενης έκτασης με επιτραπέζιες ποικιλίες ελιάς (ΟΠΕΚΕΠΕ, 2022). Ήταν η πρώτη ποικιλία που τυποποιήθηκε στην Ελλάδα σε κονσέρβα από όπου προήρθε το διεθνές όνομά της και μέχρι τη δεκαετία του 1980 αποτελούσε την κύρια εξαγωγίσιμη ποικιλία επιτραπέζιας ελιάς της χώρας. Στην Άρτα η πλειοψηφία των ελαιώνων είναι φυτεμένοι με Κονσερβολιά και καταλαμβάνουν το 15% της συνολικής καλλιεργούμενης έκτασης στην περιοχή (ΟΠΕΚΕΠΕ, 2022) σημειώνοντας μια μικρή αλλά σταθερή αυξητική τάση της τάξης του 6,2% την τελευταία δεκαετία.

Ως δένδρο χαρακτηρίζεται από την ανθεκτικότητά του στο ψύχος (και αυτός είναι και ο λόγος που τη συναντά κανείς ακόμα και στο Πήλιο ή και σε υψόμετρο έως και τα 600 μέτρα) και σε αντίξοες συνθήκες, στο κυκλοκόνιο, αλλά και τον καρκίνο, ενώ αναφέρεται ως αδύναμο σημείο της η ευαισθησία στο *Verticillium* (Κωστελένος 2011) και το δάκο (Therios, 2009). Ο καρπός της είναι τραγανός με φρουτώδη γεύση και, μετά από μεταποίηση, συντηρείται για μεγάλο χρονικό διάστημα. Έχει σχήμα ωοειδές χωρίς θηλή, με μεγάλα φακίδια και η σάρκα αποκολλάται εύκολα από τον πυρήνα. Το μέσο βάρος του καρπού είναι 6,5 g και η αναλογία σάρκας:πυρήνα είναι 8,28:1. Η Κονσερβολιά μπορεί να συγκομίζεται σε διάφορα στάδια, από πράσινη κατά τα τέλη Σεπτεμβρίου, παρδαλή (ξανθή) τον Οκτώβριο και μαύρη (μελανοϊώδες χρώμα) κατά τα τέλη Νοέμβριο. Στην περιοχή της Άρτας η πλειοψηφία των ελαιοκαλλιεργητών συγκομίζει τον ελαιόκαρπο στο στάδιο της πράσινης ελιάς καθώς έχει καλύτερη τιμή από την παρδαλή (ξανθή) ενώ αποφεύγουν για λόγους ασφάλειας της παραγωγής (χαμηλές θερμοκρασίες χειμώνα) να περιμένουν να συγκομίσουν τις μαύρες παρόλο που έχουν την υψηλότερη τιμή. Οι τελευταίες, οι φυσικά μαύρες ελιές, καθώς δεν υπόκεινται σε κάποια χημική επεξεργασία και άρα διατηρούν τις οργανοληπτικές τους ιδιότητες αποτελούν ένα ανώτερο προϊόν που θα μπορούσε να ανταγωνιστεί με επιτυχία τις τεχνητές μαύρες ελιές confit. Στην περιοχή της Άρτας καλλιεργείται κυρίως ως ξηρική, τις τελευταίες δεκαετίες όμως αυξάνεται η εγκατάσταση αρδευτικών συστημάτων στους ελαιώνες της περιοχής. Η Κονσερβολιά Άρτας αναγνωρίστηκε ως Προϊόν

Γεωγραφικής Ένδειξης (ΠΓΕ) με την ΥΑ 317713/14.01.94 (ΦΕΚ 17/14.01.94) και καταχωρίσθηκε στον αντίστοιχο κατάλογο της ΕΕ το 1996 (Επίσημη Εφημερίδα της Ε.Ε. L163/1996).

1.7 Σκοπός Διατριβής

Καθώς η ελαιοκαλλιέργεια επεκτείνεται διαρκώς, η εντατικοποίησή της απαιτεί περισσότερους πόρους νερού κυρίως στην περιοχή της Μεσογείου, όπου η πίεση στα υδατικά αποθέματα είναι αυξημένη και με βάση τα μελλοντικά κλιματολογικά σενάρια αναμένεται να αυξηθεί ακόμα περισσότερο.

Επιπρόσθετα η οικονομική σημασία της ελαιοκαλλιέργειας στην Ελλάδα και οι μελλοντικές προοπτικές όπως διαγράφονται από τις τάσεις της αγοράς καθιστά επιτακτική την ενίσχυση της θέσης του προϊόντος στην παγκόσμια αγορά.

Για να αποφύγουμε την αφοριστική λογική του «με κάθε κόστος» σε κάθε μια από τις δυο κατευθύνσεις (περιβάλλον ή οικονομία) ή την υποχωρητική (συμβιβαστική) λογική του «με το μικρότερο κόστος» και για τις δυο κατευθύνσεις προκύπτει η ανάγκη της διερεύνησης της διασφάλισης της περιβαλλοντικής και οικονομικής βιωσιμότητας της καλλιέργειας στην περιοχή. Προκύπτει δηλαδή η ανάγκη να απαντηθεί το ερώτημα: «Είναι εφικτή η εντατικοποιημένη καλλιέργεια με μικρό περιβαλλοντικό αποτύπωμα χωρίς συμβιβασμούς στις αποδόσεις και στην ποιότητα του τελικού προϊόντος;» Η προσέγγιση ενός τέτοιου ερωτήματος συναντά δυσκολίες γιατί πρακτικά απαιτεί το συνδυασμό προσεγγίσεων ποσοτικοποίησης διαφορετικών διαστάσεων μεγεθών (περιβαλλοντικές επιπτώσεις, απόδοση καλλιέργειας και ποιότητα τελικού προϊόντος).

Στο παρελθόν έχει γίνει αξιολόγηση δουλειά προσέγγισης του ερωτήματος στα επιμέρους συστατικά του όχι όμως στην ολότητά του. Έτσι συναντάμε αρκετές εργασίες που μελετούν μόνο τη συσχέτιση της εξοικονόμησης νερού με τις τελικές αποδόσεις ή την ποιότητα του τελικού προϊόντος, ή μόνο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της καλλιέργειας ή τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις διάφορων στρατηγικών διαχείρισης της καλλιέργειας χωρίς όμως να γίνεται σύνδεση με την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Για την περίπτωση της επιτραπέζιας ελιάς που τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος συνδέονται άμεσα με την εμπορική της αξία, η παράμετρος αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία.

Στην παρούσα εργασία αξιοποιώντας την προηγούμενη γνώση αντιμετωπίζεται το παραπάνω ερώτημα ως ενιαίο συνδυάζοντας διαφορετικές μεθοδολογίες εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για την αξιολόγηση της επίδρασης διαφορετικών πρακτικών άρδευσης στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα καλλιέργειας επιτραπέζιας ελιάς ποικιλίας Κονσερβολιά, αλλά και στην απόδοση, τη φυσιολογική της κατάσταση και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του καρπού της.

Αξιολογήθηκαν πρακτικές εξοικονόμησης νερού που αναπτύσσονται σε δύο άξονες. Ο πρώτος εστιάζει στην εφαρμοζόμενη ποσότητα υδατικών πόρων, ενώ ο δεύτερος στην πηγή των υδατικών πόρων. Έτσι αξιολογήθηκε η εφαρμογή της ορθολογικής άρδευσης με τη βοήθεια εξειδικευμένων συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων άρδευσης (DSS) και η αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών άρδευσης.

Για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των παραπάνω επιλέχθηκαν δυο διαφορετικές μεθοδολογίες. Η πρώτη είναι το Υδατικό Αποτύπωμα που εστιάζει στην εκτίμηση

της ιδιοποίησης των υδάτινων πόρων και πρακτικά αποτυπώνει την επίδραση της διεργασίας στην ποσότητα και την ποιότητα των υδάτινων πόρων και των υδάτινων αποδεκτών που συνδέονται με τη συγκεκριμένη διεργασία λόγω και της γειτνίασης με το σημαντικό οικοσύστημα του Αμβρακικού κόλπου. Η δεύτερη μεθοδολογία, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής, αποτελεί μια πιο ευρεία προσέγγιση της εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καθώς δεν εξειδικεύεται μόνο στους υδάτινους πόρους αλλά αποτυπώνει την επίδραση μιας διεργασίας στο περιβάλλον συνολικά.

Σε πρώτη φάση για την εκτίμηση/αποτύπωση της υπάρχουσας κατάστασης υπολογίστηκε το Υδατικό Αποτύπωμα των συμβατικών συστημάτων καλλιέργειας επιτραπέζιας ελιάς στην περιοχή της Άρτας. Για τον υπολογισμό, αξιοποιήθηκαν δεδομένα που προέκυψαν από μετρήσεις στο πεδίο ελαχιστοποιώντας όσο το δυνατόν περισσότερο ανακρίβειες που εισάγουν οι εκτιμήσεις ή η αξιοποίηση μόνο βιβλιογραφικών δεδομένων.

Στη συνέχεια σε έναν αντιπροσωπευτικό ελαιώνα εφαρμόστηκαν για τρία συνεχόμενα χρόνια τρεις διαφορετικές αρδευτικές πρακτικές: η ξηρική καλλιέργεια όπου δεν εφαρμόστηκε καθόλου άρδευση, η άρδευση με βάση την εμπειρία του παραγωγού και τέλος η «έξυπνη άρδευση», η οποία στοχεύοντας στην κάλυψη των πραγματικών αναγκών του φυτού πραγματοποιήθηκε με βάση συμβουλές για τον κάθε ελαιώνα ενός DSS που λειτουργεί στην περιοχή. Εκτιμήθηκε η επίδραση στους υδάτινους πόρους με τον υπολογισμό του Υδατικού Αποτυπώματος των τριών αυτών πρακτικών με δεδομένα που συλλέχθηκαν από τον εξοπλισμό λήψης μετρήσεων που εγκαταστάθηκε στον αγρό. Στη συνέχεια αξιολογήθηκε η επίδοση των ελαιόδενδρων που δέχτηκαν τις διαφορετικές αρδευτικές επεμβάσεις σε επίπεδο ανάπτυξης, φυσιολογικής κατάστασης, απόδοσης της καλλιέργειας και ποιότητας των συγκομιζόμενων καρπών.

Πραγματοποιήθηκε επιπλέον και μια συνολικότερη εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των τριών αυτών διαφορετικών αρδευτικών πρακτικών της περιοχής με την εφαρμογή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής σε δυο λειτουργικές μονάδες, την καλλιεργούμενη έκταση και την ποσότητα του τελικού προϊόντος.

Τέλος, διερευνήθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης των εναλλακτικών πηγών νερού για την άρδευση δενδρυλλίων Κονσερβολιάς σε επίπεδο φυτωρίου. Σε ενός έτους δενδρύλλια που διατηρήθηκαν σε θερμοκήπιο για περίπου 6 μήνες εφαρμόστηκε άρδευση με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα και, αφενός αξιολογήθηκε η επίδρασή τους στην ανάπτυξη και τη φυσιολογική κατάσταση των φυτών, αφετέρου εκτιμήθηκαν οι επιπτώσεις αυτής της πρακτικής στα υδατικά αποθέματα και στο περιβάλλον με τον υπολογισμό του Υδατικού Αποτυπώματος.

2 Κεφάλαιο 2^ο: Υπολογισμός Υδατικού Αποτυπώματος και εκτίμηση απόδοσης καλλιέργειας ελιάς ποικιλίας «Κονσερβολιά Άρτας» υπό διαφορετικές πρακτικές άρδευσης

2.1 Περίληψη

Στο πλαίσιο αυτής της ενότητας εργασίας, έγινε ανάλυση του Υδατικού Αποτυπώματος (WF) τριών διαφορετικών πρακτικών άρδευσης της καλλιέργειας ελιάς ποικιλίας Κονσερβολιάς και, στη συνέχεια, το αποτύπωμα συνδέθηκε με την επίδρασή τους στην απόδοση της καλλιέργειας σε ποσότητα και ποιότητα. Αρχικά πραγματοποιήθηκε ένα πιλοτικό πείραμα ανάλυσης του Υδατικού Αποτυπώματος της ελαιοκαλλιέργειας στην περιοχή της Γραμμενίτσας Άρτας, όπου αποτυπώθηκαν σε αρχικό επίπεδο οι επικρατούσες αγρονομικές πρακτικές στην ελαιοκαλλιέργεια και οι περιβαλλοντικές τους επιδράσεις. Στο πιλοτικό πείραμα συμμετείχαν τέσσερις ελαιώνες της περιοχής, τρεις από του οποίους ήταν αρδευόμενοι και ένας ξηρικός. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδωσαν αρχικά μια πρώτη εικόνα του WF της καλλιέργειας Κονσερβολιάς Άρτας, σημείωσαν τις αδυναμίες υπολογισμού του, και έφεραν στην επιφάνεια σημεία που αποτέλεσαν τη βάση για το σχεδιασμό του κυρίου πειράματος, όπως το πόσο περιβαλλοντικά φιλικές είναι οι ξηρικές καλλιέργειες, καθώς στη συγκεκριμένη μελέτη ο ξηρικός ελαιώνας σημείωσε το μεγαλύτερο WF και πόσο σχετίζεται με την απόδοση σε επίπεδο ποιότητας και ποσότητας, αλλά και την οικονομική βιωσιμότητα η εφαρμογή πρακτικών εξοικονόμησης νερού; Τα επόμενα τρία χρόνια πραγματοποιήθηκε πείραμα σε έναν από τους πιλοτικούς ελαιώνες κατά το οποίο επιχειρήθηκε να δοθούν απαντήσεις στα παραπάνω ερωτήματα. Πραγματοποιήθηκε για τρεις συνεχόμενες χρονιές (2019, 2020 και 2021) ανάλυση του WF τριών διαφορετικών πρακτικών άρδευσης της καλλιέργειας ελιάς ποικιλίας Κονσερβολιάς Άρτας: ξηρική καλλιέργεια, άρδευση με βάση την εμπειρία του παραγωγού και άρδευση με βάση τη συμβουλή που παρείχε το σύστημα υποστήριξης αποφάσεων άρδευσης (DSS) που λειτουργεί στην πεδιάδα της Άρτας, το IRMA_SYS. Την ίδια περίοδο μελετήθηκε η επίδραση των διαφορετικών αυτών μεταχειρίσεων στην ανάπτυξη και τη φυσιολογική κατάσταση των ελαιόδενδρων, καθώς και την τελική παραγωγή και την ποιότητα των καρπών τους. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την πρώτη εκτίμηση ότι οι ξηρικές καλλιέργειες, εφόσον λαμβάνουν τις ίδιες καλλιεργητικές φροντίδες με τις αρδευόμενες σε ό,τι αφορά τη λίπανση κυρίως, λόγω της χαμηλότερης παραγωγής, καταλήγουν σε μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Ανέδειξαν επίσης τη βασική αδυναμία της πρακτικής αυτής: την εξάρτηση από τον απρόβλεπτο παράγοντα κλίμα, ο οποίος επιδρά όχι μόνο στην τελική παραγωγή αλλά και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καρπών, όπως έδειξαν τα αποτελέσματα του πειράματος. Ανάμεσα στις τρεις πρακτικές άρδευσης η πιο βιώσιμη (περιβαλλοντικά) αποδείχθηκε η ορθολογική άρδευση με βάση τις συμβουλές από το DSS, καθώς κατά την ολοκλήρωση της έρευνας, μεταξύ των αρδευόμενων μεταχειρίσεων αξιοποίησε καλύτερα το νερό της βροχής καταναλώνοντας λιγότερο νερό άρδευσης χωρίς να υπολείπεται, και σε μερικές περιπτώσεις υπερέχοντας, σε ανάπτυξη, φυσιολογική κατάσταση, αλλά και ποιότητα και ποσότητα παραγόμενων καρπών σε σύγκριση με την άρδευση με βάση την επικρατούσα πρακτική στην περιοχή. Η ενότητα ολοκληρώνεται με συζήτηση με βάση τα ευρήματα της ανάλυσης WF σχετικά με τις δυνατότητες και τη βελτίωση των πρακτικών εξοικονόμησης νερού.

2.2 Εισαγωγή

Η στροφή τις τελευταίες δεκαετίες σε πιο υγιεινές διατροφικές συνήθειες έχει τοποθετήσει τη μεσογειακή διατροφή στο κέντρο του ενδιαφέροντος πολλών καταναλωτών στις αναπτυσσόμενες χώρες. Το ελαιόλαδο και οι επιτραπέζιες ελιές, καθώς και τα λοιπά ελαιοκομικά προϊόντα, είναι η καρδιά της μεσογειακής δίαιτας και η αύξηση στη ζήτηση τους τα τελευταία χρόνια είναι η κύρια αιτία της ταχείας εξάπλωσης της ελαιοκαλλιέργειας όχι μόνο στις παραδοσιακά ελαιοκομικές περιοχές αλλά και σε περιφερειακές περιοχές που έχουν παρόμοιο κλίμα (IOC, 2022). Συγκεκριμένα για την περίπτωση της επιτραπέζιων ελιών τα τελευταία τριάντα χρόνια η παγκόσμια παραγωγή αλλά και κατανάλωση έχουν τριπλασιαστεί (IOC, 2022) επιδεικνύοντας τις τάσεις και τις προοπτικές του συγκεκριμένου προϊόντος.

Η Ελλάδα, μια παραδοσιακή χώρα παραγωγής επιτραπέζιας ελιάς, παράγει και εξάγει παγκοσμίως περίπου το 9% της συνολικής ποσότητας (IOC, 2022). Στην περιοχή ενδιαφέροντος, την Άρτα (βορειοδυτική Ελλάδα), η κύρια ποικιλία ελιάς που καλλιεργείται είναι η Κονσερβολιά, μια από τις τρεις πιο κοινές ποικιλίες επιτραπέζιας ελιάς που καλλιεργούνται στην Ελλάδα μαζί με την Καλαμών και τη Χονδρολιά Χαλκιδικής. Η τοπική παραγωγή επιτραπέζιας ελιάς συνιστά το 8% της συνολικής εθνικά εξαγόμενης ποσότητας, καθιστώντας έτσι το προϊόν αυτό σημαντικό πυλώνα της τοπικής οικονομίας. Παρόλο που παραδοσιακά στην περιοχή η ελιά καλλιεργείται ως ξηρική, η παροχή νερού κυρίως κατά τα κρίσιμα στάδια ανάπτυξης, βελτιώνει την ανάπτυξη του φυτού αλλά και την ποσότητα και ποιότητα του συγκομιζόμενου καρπού (Nanos et al., 2008), ενώ παράλληλα καθιστά δυνατή την εντατικοποίηση της καλλιέργειας. Επιπλέον, το γεγονός ότι για λόγους ασφάλειας οι παραγωγοί συγκομίζουν τον καρπό στο στάδιο της πράσινης ελιάς δηλαδή περίπου κατά τα τέλη Σεπτεμβρίου και, αν είναι δυνατόν πριν την έναρξη των φθινοπωρινών βροχοπτώσεων, η άρδευση κυρίως κατά το κρίσιμο στάδιο της ανάπτυξης της σάρκας (τέλη Αυγούστου αρχές Σεπτέμβρη) αποτελεί σημαντικό στοιχείο της ελαιοκαλλιέργειας στην περιοχή κυρίως τα τελευταία χρόνια που οι παρατεταμένες περίοδοι ανομβρίας μέχρι τα μέσα Οκτωβρίου αποτελούν συχνό φαινόμενο. Στην πράξη, η έλλειψη καθοδήγησης των παραγωγών από ειδικούς έχει οδηγήσει στην υπεράρδευση και αυτό σε συνδυασμό με την αυξανόμενη πίεση στα υδατικά αποθέματα τις τελευταίες δεκαετίες καλεί για εφαρμογή καλύτερης αρδευτικής πρακτικής.

Το Υδατικό Αποτύπωμα (WF) ήδη από την εισαγωγή του σαν έννοια από τον Hoekstra το 2002 έχει βρει μεγάλη εφαρμογή ως δείκτης της κατανάλωσης και ρύπανσης των υδατικών αποθεμάτων κατά τη διάρκεια μιας παραγωγικής διαδικασίας. Το συνολικό Υδατικό Αποτύπωμα (WF_{total}) υπολογίζεται ως το άθροισμα τριών συστατικών: του πράσινου (WF_{green}), του μπλε (WF_{blue}) και του γκριζου υδατικού (WF_{grey}) αποτυπώματος. Τα πρώτα δυο συστατικά αναφέρονται στην κατανάλωση του νερού που προέρχεται αντίστοιχα από βροχοπτώσεις και αυτού που προέρχεται από επιφανειακά ή υπόγεια ύδατα κατά τη διαδικασία παραγωγής ενός προϊόντος. Το γκριζο υδατικό αποτύπωμα αναφέρεται στη θεωρητική ποσοτικοποίηση σε μονάδες όγκου νερού, της ρύπανσης που προκαλεί μια παραγωγική διαδικασία στους υδατικούς αποδέκτες. Στη γεωργία το WF επισημαίνει τη χρήση νερού από τα φυτά και τη ρύπανση που προκαλείται κυρίως μέσω λίπανσης κατά την καλλιεργητική διαδικασία. Η χρήση νερού αναφέρεται στην ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται από το φυτό για να καλύψει τις υδατικές του ανάγκες, η οποία υπολογίζεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής και όχι στη συνολική ποσότητα άρδευσης που εφαρμόζεται στην καλλιέργεια. Αυτό ισχύει γιατί η περίσσεια νερού όσο επιστρέφει

στην ίδια υδρολογική λεκάνη και δεν μεταφέρεται σε άλλη ή στη θάλασσα δε μπορεί να θεωρηθεί ως «χαμένη» ποσότητα νερού (Hoekstra et al., 2011). Το WF έχει αποδειχθεί αποτελεσματικό εργαλείο για την αναγνώριση και εκτίμηση των αστοχιών και αδυναμιών της διαχείρισης του νερού σε διάφορα επίπεδα (γεωχωρικά, κοινωνικά και οικονομικά) και μπορεί να λειτουργήσει ως η βάση πάνω στην οποία μπορούν να σχεδιαστούν στρατηγικές διαχείρισης νερού με χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

2.3 Σκοπός ενότητας εργασίας

Σε ένα πλαίσιο αυξανόμενης εγκατάστασης νέων αρδευομένων ελαιώνων Κονσερβολιάς στην περιοχή της Άρτας τη στιγμή που τα υδατικά αποθέματα μειώνονται εγείρεται το ερώτημα πόσο περιβαλλοντικά αποδεκτή είναι η παραπάνω πρακτική; Μέχρι πιο σημείο μπορούμε να «δικαιολογήσουμε» την υποβάθμιση τους περιβάλλοντος στο όνομα της τοπικής οικονομικής σταθερότητας; Από την άλλη όμως διερωτόμαστε τι πραγματική επίπτωση μπορεί να έχουν οι υπάρχουσες φιλοπεριβαλλοντικές πρακτικές άρδευσης στην τοπική οικονομία; Πόσο μπορεί να επηρεάσουν πρακτικές εξοικονόμησης νερού τις τελικές αποδόσεις αλλά και την ποιότητα των τελικών προϊόντων;

Για να απαντήσουμε στα παραπάνω ερωτήματα η ανάλυση του Υδατικού Αποτυπώματος αποτελεί το πιο αποτελεσματικό εργαλείο προσέγγισης, καθώς καταφέρνει να ενσωματώσει στον υπολογισμό του την ποσοτική αλλά και ποιοτική επίδραση μιας παραγωγικής διαδικασίας στα υδατικά αποθέματα αλλά και να συνδέσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης νερού με την τελική παραγωγή. Η προσέγγιση που επιλέξαμε διακρίνεται σε τρεις άξονες καθένας από τους οποίους απαντάει σε μια από τις εξής ερωτήσεις:

1. Ποιο είναι το Υδατικό Αποτύπωμα της καλλιέργειας Κονσερβολιάς Άρτας;
2. Ποιο είναι το Υδατικό Αποτύπωμα της καλλιέργειας Κονσερβολιάς όταν εφαρμόζεται άρδευση με γνώμονα την εξοικονόμηση νερού;
3. Τι επίπτωση έχουν διαφορετικές πρακτικές άρδευσης στην τελική παραγωγή και ποιότητα των καρπών;

Ο πρώτος άξονας πρακτικά δίνει για την καλλιέργεια της Κονσερβολιάς Άρτας τα χαρακτηριστικά της υπάρχουσας κατάστασης σε επίπεδο χρήσης των τοπικών υδατικών αποθεμάτων και ρύπανσης των τοπικών υδατικών αποδεκτών. Ο δεύτερος άξονας εξερευνά τις δυνατότητες που έχουν διαφορετικές πρακτικές εξοικονόμησης άρδευσης. Ο τρίτος άξονας συνδέει τις διαφορετικές πρακτικές με την τελική παραγωγή σε επίπεδο ποσοτικό (σοδειά) και ποιοτικό (ποιότητα καρπών).

Για τη διερεύνηση των παραπάνω ερωτημάτων πραγματοποιήθηκαν δυο πειράματα. Το πρώτο, που ορίζεται ως **πιλοτικό πείραμα**, αφορά τον υπολογισμό του WF σε αντιπροσωπευτικούς ελαιώνες Κονσερβολιάς Άρτας της περιοχής Γραμμενίτσας Άρτας για ένα έτος (2018). Η ανάλυση του Υδατικού Αποτυπώματος (WF) έδωσε μια αρχική εικόνα της υπάρχουσας κατάστασης αλλά ανέδειξε και τις αδυναμίες / δυσκολίες κατά τον υπολογισμό του WF ορίζοντας τις επιπλέον ενέργειες στις οποίες έπρεπε να προβούμε για τον ακριβέστερο και αναλυτικότερο υπολογισμό των επόμενων ετών. Το δεύτερο πείραμα που ορίζεται ως **κύριο πείραμα** αφορά στον υπολογισμό του WF διαφορετικών πρακτικών άρδευσης και τη σύνδεσή τους με την απόδοση της καλλιέργειας σε ποσοτικό και ποιοτικό

επίπεδο. Σε έναν αντιπροσωπευτικό ελαιώνα Κονσερβολιάς Άρτας της ίδιας περιοχής εφαρμόστηκαν για τρία συνεχόμενα χρόνια (2019-2020-2021) τρεις αρδευτικές πρακτικές: η μη άρδευση (ξηρική καλλιέργεια), η ορθολογική άρδευση με βάση τις πραγματικές ανάγκες του φυτού και η συμβατική άρδευση που βασίζεται στην εμπειρία των παραγωγών και αποτελεί την επικρατούσα πρακτική άρδευσης στην περιοχή. Για τον υπολογισμό του WF αξιοποιήθηκαν δεδομένα που προέκυψαν από πραγματικές μετρήσεις στο πεδίο. Στον ίδιο ελαιώνα μελετήθηκε για τις ίδιες χρονιές η επίδραση των διαφορετικών αρδευτικών πρακτικών στην τελική συγκομιζόμενη ποσότητα, στην ανάπτυξη των δένδρων, στη φυσιολογική τους κατάσταση, αλλά και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καρπών.

2.4 Γενικά στοιχεία περιοχής διεξαγωγής των πειραμάτων

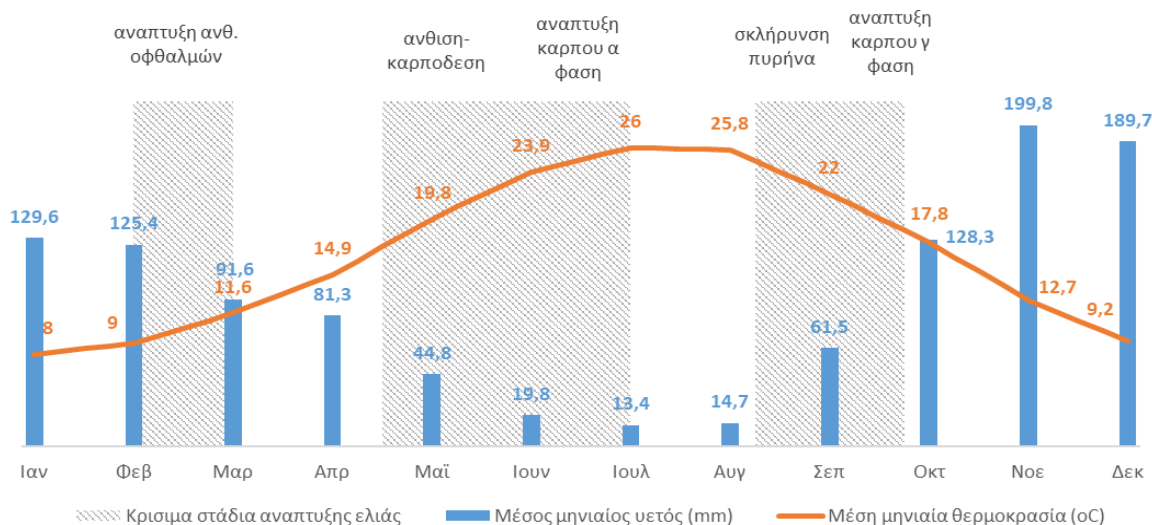
Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε ελαιώνες που βρίσκονται στο χωρίο Γραμμενίτσα (39.10 °N, 20.58 °E) στην πεδιάδα της Άρτας (Ηπειρος, Βορειοδυτική Ελλάδα, Εικόνα 2.1). Το υψόμετρο της περιοχής είναι 58 m και το κλίμα χαρακτηρίζεται ως τυπικό μεσογειακό, με ήπιους βροχερούς χειμώνες και ζεστά και ξηρά καλοκαίρια. Η μέση θερμοκρασία στην περιοχή είναι 17,2 °C και το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης είναι 1084 mm.



Εικόνα 2.1 Πειραματική περιοχή στη Γραμμενίτσα Άρτας στη Βορειοδυτική Ελλάδα

Παρόλο που η περιοχή δέχεται πολλές βροχοπτώσεις αυτές δεν κατανέμονται ισόποσα μέσα στην χρονιά, καθώς ο κύριος όγκος αυτών τοποθετείται κυρίως στο διάστημα από τα τέλη Οκτωβρίου μέχρι τον Απρίλη. Οι θερινοί μήνες διακρίνονται ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια από συχνά ανομβρικά φαινόμενα και έντονη ξηρασία, καθιστώντας την άρδευση επιτακτική για την κάλυψη των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών.

Ομβροθερμικό Διάγραμμα Άρτας



Διάγραμμα 2.1 Ομβροθερμικό διάγραμμα Άρτας και κρίσιμα στάδια στην ανάπτυξη της ελιάς. Τα κλιματικά δεδομένα προέρχονται από καταγεγραμμένα δεδομένα της ΕΜΥ για περίοδο από το 1976 έως το 2010 (http://www.emy.gr/emv/el/climatology/climatology_city?perifereia=Epirus&poli=Arta)

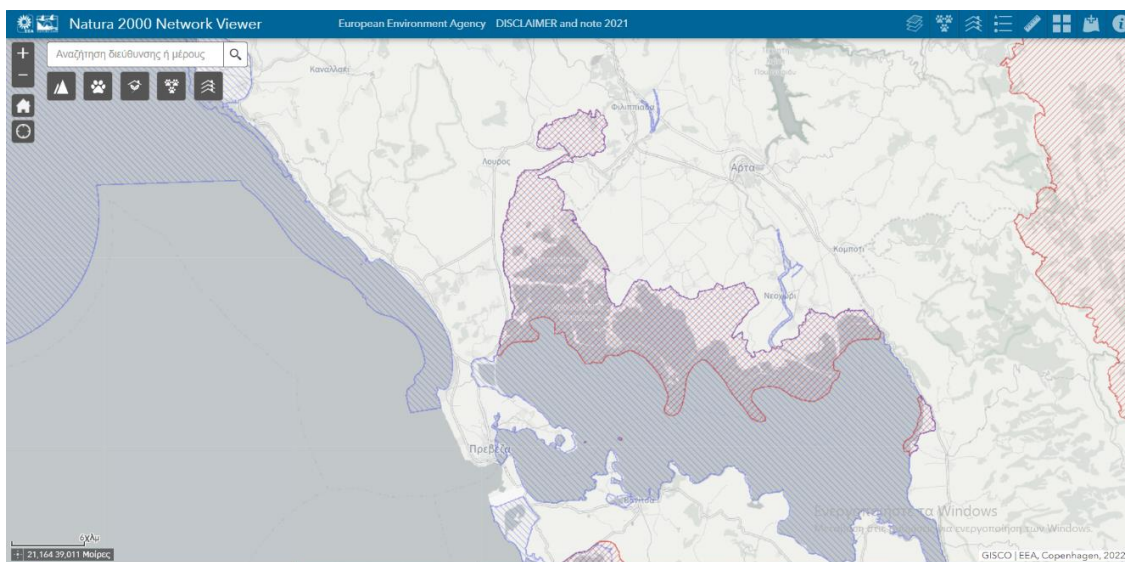
Σε ό,τι αφορά τις καλλιεργητικές πρακτικές που ακολουθούνται στην περιοχή, εφαρμόζεται η βασική λίπανση από τα τέλη Δεκεμβρίου μέχρι αρχές Φλεβάρη και η επιφανειακή τον Μάρτη. Η φυτοπροστασία στοχεύει στην αντιμετώπιση του κυκλοκόνιου που προκαλεί συχνά ζημιές στην περιοχή με 4 ή 5 εφαρμογές χαλκού ανά έτος και εφαρμογή εντομοκτόνων 2 με 3 φορές το έτος για την αντιμετώπιση του πυρηνοτρήτη και του δάκου. Η συγκομιδή πραγματοποιείται περίπου στα τέλη Σεπτεμβρίου μέχρι το αργότερο μέσα Οκτώβρη στο στάδιο της πράσινης ελιάς, για να αποφευχθούν τυχόν απώλειες της παραγωγής λόγω καιρικών φαινομένων. Πραγματοποιείται ελαφρύ κλάδεμα κάθε χρόνο μαζί με τη συγκομιδή.



Εικόνα 2.2 Συγκομιδή Κονσερβολιάς στην περιοχή. Ο καρπός συγκομίζεται πράσινος και ταυτόχρονα πραγματοποιείται ελαφρύ κλάδεμα

Οι ελαιώνες στην περιοχή είναι κατά κύριο λόγο αρδευόμενοι, υπάρχουν όμως και αρκετοί ξηρικοί. Για την άρδευση χρησιμοποιούνται συστήματα με μικρο-εκτοξευτήρες.

Η πεδιάδα της Άρτας, η μεγαλύτερη της Ηπείρου, συνορεύει με τον Κόλπο του Αμβρακικού, ένα μοναδικό υδροβιότοπο που προστατεύεται από τη συνθήκη Ramsar, ανήκει στο δίκτυο Natura και από το 2008 έχει θεσμοθετηθεί ως Εθνικό Πάρκο.



Εικόνα 2.3 Οι περιοχές του Αμβρακικού Κόλπου και της Άρτας που συμμετέχουν στο δίκτυο Natura (<https://natura2000.eea.europa.eu/>)

Ο υδροβιότοπος είναι αποδέκτης των εκβολών τριών ποταμών που διασχίζουν την πεδιάδα της Άρτας, καθώς και των απολήξεων ενός εκτεταμένου αποστραγγιστικού δικτύου που αναπτύσσεται σε αυτή και εξυπηρετεί τις τοπικές αγροτικές δραστηριότητες. Οι κύριες καλλιέργειες της περιοχής είναι δενδροκομικές και περιλαμβάνουν ελιές, εσπεριδοειδή και ακτινίδια. Η έντονη αγροτική δραστηριότητα στην πεδιάδα που άρχισε να λαμβάνει χώρα από τη δεκαετία του 1950, οπότε και ολοκληρώθηκε η κατασκευή του μεγαλύτερου τμήματος του αρδευτικού και αποστραγγιστικού δικτύου, αυξήθηκε η καλλιεργήσιμη έκταση και έγινε εφικτή η πρόσβαση σε νερό άρδευσης, στηρίζει σημαντικά την τοπική οικονομία αποτελεί όμως και την κύρια αιτία υποβάθμισης του προστατευόμενου αυτού υδροβιότοπου. Η ορθολογική διαχείριση των εισροών και εκροών των αγροτικών δραστηριοτήτων αποτελεί τη μόνη στρατηγική διατήρησης της περιβαλλοντικής και οικονομικής ισορροπίας στην περιοχή αυτή.

2.5 ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ: Υπολογισμός WF Κονσερβολιάς Άρτας σε 4 ελαιώνες

2.5.1 Υλικά και Μέθοδοι

2.5.1.1 Πειραματική εγκατάσταση

Το Υδατικό Αποτύπωμα υπολογίστηκε σε τέσσερις αντιπροσωπευτικούς ελαιώνες Κονσερβολιάς Άρτας της περιοχής. Η εγκατάσταση των ελαιώνων έγινε από το 1979 μέχρι και το 1981 (Εικόνα 2.4). Η έκταση του κάθε ελαιώνα κυμαίνεται από 0,18 έως και 0,25 ha. Η μέση πυκνότητα φύτευσης είναι περίπου 240 δένδρα ανά εκτάριο. Οι ελαιώνες καλλιεργούνται συμβατικά σύμφωνα με την επικρατούσα τοπική πρακτική σε ό,τι αφορά τη λίπανση, τη φυτοπροστασία, το κλάδεμα και τη συγκομιδή. Σε ό,τι αφορά την άρδευση στους υπό μελέτη ελαιώνες, στους τρεις από τους τέσσερις ελαιώνες πραγματοποιούνταν άρδευση με μικροεκτοξευτήρες, ενώ ο τέταρτος ήταν ξηρικός. Στον Πίνακα 2.1 συγκεντρώνονται τα χαρακτηριστικά του κάθε ελαιώνα.

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά ελαιώνων

Ελαιώνας ID	Συντεταγμένες	Έτος εγκατάστασης	Έκταση (m ²)	# δένδρων	Άρδευση
Ελαιώνας 1	39°10'47.0"N 20°58'44.7"E	1981	3000	72	μικροεκτοξευτήρες
Ελαιώνας 2	39°11'44.2"N 20°57'53.6"E	1981	2000	60	μικροεκτοξευτήρες
Ελαιώνας 3	39°11'03.3"N 20°58'59.2"E	1979	1800	40	μικροεκτοξευτήρες
Ελαιώνας 4	39°11'44.0"N 20°57'51.5"E	1981	2000	60	ξηρικός



Εικόνα 2.4 Τοποθεσία ελαιώνων του πιλοτικού πειράματος

2.5.1.2 Υπολογισμός WF_{total}

Ο υπολογισμός του WF_{total} πραγματοποιήθηκε με βάση τη μεθοδολογία που περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 1.3.2 της παρούσας διατριβής.

2.5.1.3 Δεδομένα εισαγωγής στο CROPWAT

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα CROPWAT (έκδοση 8.0, διαθέσιμο στο <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en/>) που έχει αναπτύξει ο FAO για την παροχή σχεδίου άρδευσης καλλιεργειών εφαρμόζοντας την επιλογή «πρόγραμμα άρδευσης» (“Irrigation Schedule”). Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης (θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα ανέμου, ακτινοβολία, βροχόπτωση), δεδομένα της καλλιέργειας (συντελεστής καλλιέργειας $-K_c$, βάθος ριζοστρώματος καλλιέργειας, ύψος καλλιέργειας, διάρκεια σταδίων ανάπτυξης της καλλιέργειας σε ημέρες, απόδοση παραγωγής, μέγιστο επιτρεπόμενο υδατικό έλλειμμα), εδαφολογικά δεδομένα (υδατοϊκανότητα, σημείο μόνιμης μάρανσης, ρυθμός διήθησης) και δεδομένα άρδευσης (ποσότητα άρδευσης, αποτελεσματικότητα άρδευσης, συντελεστής απόδοσης παραγωγής). Τα δεδομένα αυτά με βάση την εξίσωση των Penman-Montieth που εκτιμά την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) όπως περιγράφεται στο FAO PAPER 56 (R. G. Allen et al., 1998) δίνουν την εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (ET_c).

Τα μετεωρολογικά δεδομένα αντλήθηκαν από το δίκτυο αγρο-μετεωρολογικών σταθμών του τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, το οποίο καλύπτει την πεδιάδα της Άρτας με 6 σταθμούς (<http://advantage.interregir2ma.eu:8080/livedata/map.jsf>). Εφαρμόστηκε η μέθοδος της αντίστροφα σταθμισμένης απόστασης (Inverse Distance Weighting -IDW) η οποία δίνει τη δυνατότητα της εκτίμησης των μετεωρολογικών δεδομένων στους συγκεκριμένους ελαιώνες (Tegos et al., 2017). Δεδομένα που αφορούν την καλλιέργεια (συντελεστής καλλιέργειας K_c , ημερες διάρκειας σταδίων ανάπτυξης, βάθος ριζοστρώματος, συντελεστής μέγιστου επιτρεπόμενου υδατικού ελλείμματος) αντλήθηκαν από τη σχετική βιβλιογραφία (Allen et al., 1998, Gucci and Fereres, 2012), ενώ τα σχετικά δεδομένα που αφορούν τις εδαφικές ιδιότητες έπεται από τον προσδιορισμό του τύπου του εδάφους (όπως περιγράφεται στο 2.5.1.4) ορίστηκαν με βάση τη μεθοδολογία των Saxton και Rawls (2006). Η αποτελεσματικότητα άρδευσης ορίστηκε στο 80% με βάση τη σχετική βιβλιογραφία για τους μικροεκτοξευτήρες (Phocaides, 2007).

2.5.1.4 Μηχανική ανάλυση εδάφους

Για τον προσδιορισμό του τύπου εδάφους σε κάθε ελαιώνα πραγματοποιήθηκε μηχανική ανάλυση σε δείγματα εδάφους στα 30 και 60 εκατοστά βάθος σύμφωνα με τη μεθοδολογία Βουγιούκου (Bouyoucos, 1936). 50 g εδαφικού δείγματος (Γ) κοσκινισμένο σε 2 mm κόσκινο αναμειχθηκαν με 50 mL Na_2PO_3 1% και 50 mL απιονισμένο νερό και αφέθηκε όλη τη νύχτα. Στη συνέχεια έγινε ανάδευση στο mixer για 10 min και ακολούθως μεταφέρθηκε στον ειδικό κύλινδρο Βουγιούκου και συμπληρώθηκε νερό μέχρι τη χαραγή. Έγινε ανάδευση με την ειδική ράβδο και αφέθηκε στον πάγκο. Σε 40 s μετρήθηκε η πυκνότητα (P_a) του αιωρήματος με το πυκνόμετρο Βουγιούκου, καθώς και η θερμοκρασία του (ΘA). Το αιώρημα αφέθηκε να ηρεμήσει δυο ώρες οπότε και καταγράφηκε εκ νέου η πυκνότητά του (P_b) και η θερμοκρασία του (ΘB) (Εικόνα 2.5). Οι διορθωμένες τιμές P_a και P_b για θερμοκρασία 20 °C δίνονται από τους τύπους: $P_a' = P_a + \Sigma \Theta A$ και $P_b' = P_b + \Sigma \Theta B$,

όπου $\Sigma\theta A = (\theta A - 20)/2,5$ και $\Sigma\theta B = (\theta B - 20)/2,5$

Η περιεκτικότητα της αργίλου δίνεται από τη σχέση: $\text{Αργίλος \%} = 100 \times Pb'/\Gamma$

Η περιεκτικότητα της ιλύος δίνεται από τη σχέση: $\text{Ιλύς \%} = (Pa' - Pb') \times 100/\Gamma$

Η περιεκτικότητα σε άμμο δίνεται από τη σχέση: $\text{Άμμος \%} = 100 - (\text{Αργίλος \%} + \text{Ιλύς \%})$



Εικόνα 2.5 Στιγμιότυπα από τη μηχανική ανάλυση των δειγμάτων χώματος από τους ελαιώνες

2.5.1.5 Κατανάλωση νερού

Η ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε μέσω της άρδευσης μετρήθηκε με τη βοήθεια υδρομέτρων (DS-TRP, Maddalena S.P.A., Italy) που εγκαταστάθηκαν στους χαρακτηριστικούς αγωγούς εφαρμογής του δικτύου άρδευσης σε κάθε ελαιώνα. Η ένδειξη κάθε υδρομέτρου πολλαπλασιάστηκε με τον αριθμό των γραμμών άρδευσης σε κάθε ελαιώνα για την παροχή της συνολικής ποσότητας άρδευσης σε αυτούς (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6 Υδρόμετρα εγκατεστημένα στους χαρακτηριστικούς αγωγούς εφαρμογής του δικτύου άρδευσης για μέτρηση της ποσότητας εφαρμοζόμενης άρδευσης

2.5.1.6 Αγρονομικά δεδομένα

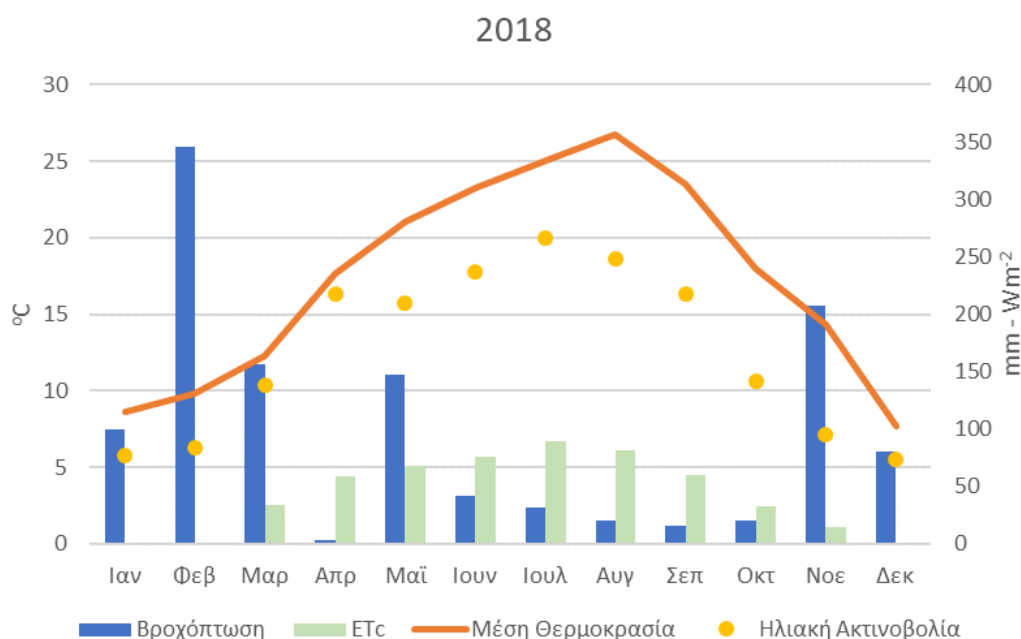
Τα αγρονομικά δεδομένα που αφορούν τη λίπανση και φυτοπροστασία, καθώς και τη συγκομιζόμενη ποσότητα τα παρείχαν οι ιδιοκτήτες των ελαιώνων.

2.5.2 Αποτελέσματα – Συζήτηση

2.5.2.1 Δεδομένα εισαγωγής στο CROPWAT

2.5.2.1.1 Μετεωρολογικά δεδομένα

Στον Διάγραμμα 2.2 αποτυπώνονται η μέση μηνιαία θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και το ύψος της μηνιαίας βροχόπτωσης και της εξατμισοδιαπνοής για το έτος 2018. Το συνολικό ύψος βροχόπτωσης το 2018 ήταν 1170 mm, ενώ η μέση θερμοκρασία ήταν 17,34 °C. Το διάστημα από τον Ιούνιο μέχρι και τον Οκτώβριο το ύψος των βροχοπτώσεων δεν ξεπέρασε συνολικά τα 130 mm όταν η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (ET_c) την ίδια περίοδο συνολικά ισούταν με 278 mm. Το έτος αυτό χαρακτηρίστηκε ως ιδιαίτερα ξηρό, καθώς η παρατεταμένη ξηρασία διήρκεσε μέχρι και τις αρχές του Νοέμβρη οπότε και σημειώθηκαν οι πρώτες ικανοποιητικές βροχοπτώσεις.



Διάγραμμα 2.2 Μετεωρολογικά δεδομένα για το έτος 2018 στην πειραματική περιοχή (Γραμμενίτσα Άρτας). Σημειώνεται η μέση μηνιαία θερμοκρασία, η μέση μηνιαία ακτινοβολία (Wm⁻²), το συνολικό μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm) και η συνολική μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ελιάς ET_c (mm)

2.5.2.1.2 Δεδομένα καλλιέργειας

Για τη συγκεκριμένη καλλιέργεια με βάση τη βιβλιογραφία (Allen et al., 1998) ο συντελεστής καλλιέργειας ορίστηκε στο 0,65 για το αρχικό στάδιο ανάπτυξης, 0,70 για το ενδιάμεσο και τελικό στάδιο ανάπτυξης. Η διάρκεια σε ημέρες του κάθε διαστήματος ανάπτυξης ορίστηκαν στις 30 για το αρχικό, 90 για το στάδιο ανάπτυξης, 60 για το ενδιάμεσο στάδιο και 90 για το τελικό στάδιο ανάπτυξης. Το βάθος ριζοστρώματος ορίστηκε από τα 1,20 m έως τα 1,70 m, ενώ το ύψος του δέντρου στα 3-5 m.

Ο συντελεστής μέγιστου επιτρεπόμενου υδατικού ελλείμματος της καλλιέργειας ορίστηκε στο 0,65, ενώ ο συντελεστής απόδοσης παραγωγής στο 1 με βάση τους Gucci and Fereres (2012).

2.5.2.1.3 Δεδομένα εδαφικών ιδιοτήτων

Με βάση τον τύπο των εδαφών των ελαιώνων όπως προσδιορίστηκε από τη μηχανική ανάλυση (περιγράφεται στο 2.5.2.2) οι εδαφικές ιδιότητες των ελαιώνων που αφορούν την υδατοϊκανότητα, το σημείο μόνιμης μάρανσης και το ρυθμό διήθησης όπως προκύπτουν από τις συναρτήσεις που δίνονται από τους Saxton and Rawls (2006) συνοψίζονται στον Πίνακα 2.2.

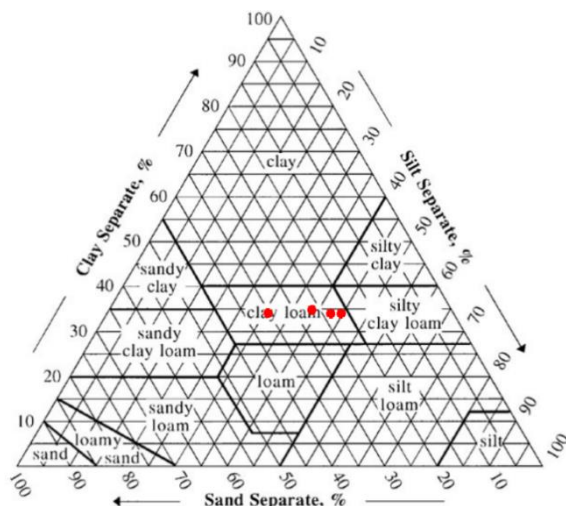
Πίνακας 2.2 Ιδιότητες των εδαφών των τεσσάρων ελαιώνων

Ελαιώνας ID	Υδατοϊκανότητα %	Σημείο Μόνιμης Μάρανσης %	Ρυθμός διήθησης (mm/day)
Ελαιώνας 1	34	19,0	110
Ελαιώνας 2	34	18,6	110
Ελαιώνας 3	32	18,7	110
Ελαιώνας 4	34	18,5	110

2.5.2.2 Μηχανική ανάλυση εδάφους

Με βάση τα αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης τα εδάφη των ελαιώνων κατατάσσονται σύμφωνα με την USDA κατάταξη εδαφών (Soil Survey Staff, 1999) στον τύπο των αργιλοπηλώδων (Πίνακας 2.3).

Πίνακας 2.3 Αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης για τον προσδιορισμό του τύπου εδάφους των πειραματικών ελαιώνων



Ελαιώνας	Αμμος %	Αργίλος %	Ίλύς %	Τύπος
Ελαιώνας 1	27,7	34,3	38	αργιλοπηλώδες
Ελαιώνας 2	24,6	33,4	42	αργιλοπηλώδες
Ελαιώνας 3	36,4	33,6	30	αργιλοπηλώδες
Ελαιώνας 4	22,6	33,4	44	αργιλοπηλώδες

2.5.2.3 Δεδομένα κατανάλωσης νερού και αγρονομικά δεδομένα

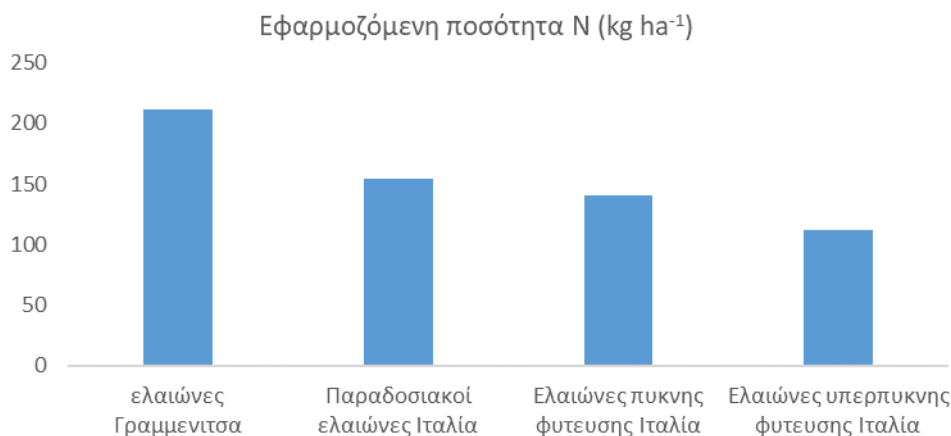
Στον Πίνακα 2.4 συνοψίζονται τα δεδομένα που αφορούν την εφαρμοζόμενη ποσότητα λίπανσης και άρδευσης καθώς και την τελική συγκομιζόμενη ποσότητα ελαιοκαρπού σε κάθε ελαιώνα. Στους τρεις από τους τέσσερις ελαιώνες (Ελαιώνας 1, 2 και 4) η εφαρμοζόμενη ποσότητα N-λίπανσης ήταν περίπου η ίδια και κυμαίνονταν από 220,8 kg ha⁻¹ έως 257,7 kg ha⁻¹. Στον Ελαιώνα 3 η ποσότητα ήταν σχεδόν η μισή (117,8 kg ha⁻¹). Επίσης στους δυο πρώτους ελαιώνες η εφαρμοζόμενη ποσότητα άρδευσης ήταν

παρόμοια (1876,5 και 1740 m³ ha⁻¹, αντίστοιχα) σε αντίθεση με την αντίστοιχη στον Ελαιώνα 3 που ήταν παραπάνω από διπλάσια (4020,3 m³ ha⁻¹). Σε ό,τι αφορά την τελική συγκομιζόμενη ποσότητα ο Ελαιώνας 3 επέδειξε τη μεγαλύτερη παραγωγή σε σύγκριση με τους υπόλοιπους ελαιώνες (17,8 t ha⁻¹), ενώ ο ξηρικός ελαιώνας (Ελαιώνας 4) τη μικρότερη (7,85 t ha⁻¹).

Πίνακας 2.4 Δεδομένα εφαρμοζόμενης άρδευσης και λίπανσης και συγκομιδή σε κάθε ελαιώνα για το έτος 2018

Ελαιώνας	Εφαρμοζόμενη ποσότητα N (kg ha ⁻¹)	Εφαρμοζόμενη ποσότητα άρδευσης (m ³ ha ⁻¹)	Συγκομιζόμενη ποσότητα (t ha ⁻¹)
Ελαιώνας 1	220,8	1876,50	10,4
Ελαιώνας 2	248,4	1740,00	12,5
Ελαιώνας 3	117,8	4020,30	17,8
Ελαιώνας 4	257,7	0,00	7,85

Συγκρίνοντας τις εισροές στους ελαιώνες της παρούσας εργασίας με τις αντίστοιχες σε ελαιώνες στη νότια Ιταλία όπως αναφέρονται σε σχετική εργασία πρέπει να σημειώσουμε (χωρίς να μπορούμε να γενικεύσουμε) ότι είναι αυξημένες στους ελαιώνες του πειράματος. Πιο συγκεκριμένα ο μέσος όρος της εφαρμοζόμενης ποσότητας N στους ελαιώνες του πειράματος ήταν 211,2 kg ha⁻¹, όταν οι Pellegrini et al. (2016) αναφέρουν τιμές όπως 154, 140 και 112 kg ha⁻¹ σε παραδοσιακούς (<200 δένδρα ha⁻¹), πυκνής φύτευσης (250-500 δένδρα ha⁻¹) και υπέρπυκνης φύτευσης (>1200 δένδρα ha⁻¹), αντίστοιχα (Διάγραμμα 2.3).



Διάγραμμα 2.3 Εφαρμοζόμενη ποσότητα λίπανσης (ποσότητα N) στους ελαιώνες του πειράματος και σε ελαιώνες στο Bari της Ιταλίας (στοιχεία από Pellegrini et al., 2016)

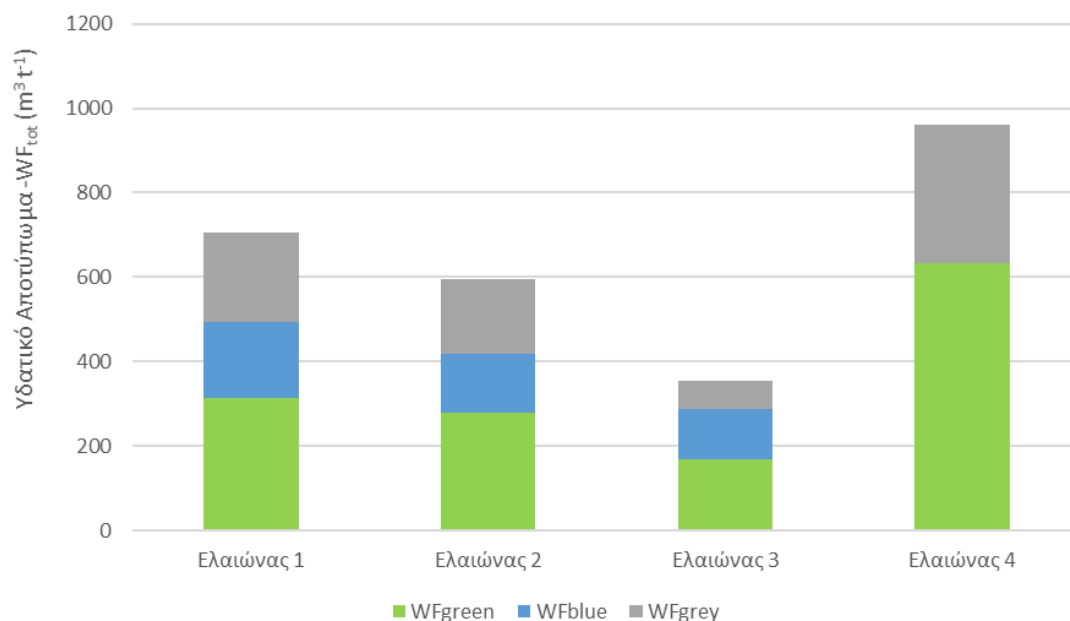
Σε ό,τι σχετίζεται με την άρδευση, η εφαρμοζόμενη ποσότητα άρδευσης στους ελαιώνες της παρούσας εργασίας εάν εξαιρέσουμε τον Ελαιώνα 3, όπου εφαρμόστηκε η διπλάσια ποσότητα νερού, οι Ελαιώνες 1 και 2 είναι κοντά με τα αντίστοιχα δεδομένα της ίδιας εργασίας (2000 και 1660 m³ ha⁻¹ στους ιταλικούς ελαιώνες πυκνής και υπέρπυκνης φύτευσης, αντίστοιχα) τη στιγμή όμως που η ετήσια αποτελεσματική βροχόπτωση στην περιοχή της Γραμμενίτσας ήταν περίπου 750 mm, ενώ στην αντίστοιχη περιοχή αναφοράς στη γειτονική Ιταλία ήταν περίπου 550 mm (Pellegrini et al., 2016).

2.5.2.4 Υπολογισμός συνολικού Υδατικού Αποτυπώματος (WF_{total})

Στον Πίνακα 2.5 και στο Διάγραμμα 2.4 παρουσιάζονται το συνολικό Υδατικό Αποτύπωμα (WF_{total}) του κάθε ελαιώνα μαζί με τα επιμέρους συστατικά τους (WF_{green} , WF_{blue} , WF_{grey}) καθώς και το ποσοστό συμμετοχής αυτών στο WF_{total} . Οι τιμές των WF_{total} κυμάνθηκαν από 354 μέχρι 961 $m^3 t^{-1}$. Το WF_{green} κυμάνθηκε από 170 έως και 633 $m^3 t^{-1}$, το WF_{blue} κυμάνθηκε από 118 έως 181 $m^3 t^{-1}$, ενώ το WF_{grey} κυμάνθηκε από 66 έως 328 $m^3 t^{-1}$.

Πίνακας 2.5 Συνολικό Υδατικό Αποτύπωμα για κάθε ελαιώνα και η ανάλυση στην κάθε συνιστώσα. Περιλαμβάνονται και τα ποσοστά συμμετοχής της κάθε συνιστώσας στο WF_{total} .

Ελαιώνας	WF_{green} ($m^3 t^{-1}$)	WF_{blue} ($m^3 t^{-1}$)	WF_{grey} ($m^3 t^{-1}$)	WF_{tot} ($m^3 t^{-1}$)
Ελαιώνας 1	313 (44,3%)	181 (25,6%)	212 (30,1%)	706
Ελαιώνας 2	279 (46,9%)	139 (23,5%)	176 (29,7%)	594
Ελαιώνας 3	170 (48,0%)	118 (33,3%)	66 (18,7%)	354
Ελαιώνας 4	633 (65,9%)	0 (0,00%)	328 (34,1%)	961



Διάγραμμα 2.4 Απεικόνιση των συνολικών Υδατικών Αποτυπωμάτων (WF_{tot}) και των επιμέρους συστατικών τους (WF_{green} , WF_{blue} , WF_{grey}) σε κάθε ελαιώνα για το έτος 2018

2.5.2.4.1 Πράσινο Υδατικό Αποτύπωμα (WF_{green})

Στην παρούσα ενότητα εργασίας, στους αρδευόμενους ελαιώνες αλλά και στον ξηρικό, το WF_{green} συνιστά το μεγαλύτερο μέρος του WF_{total} . Αυτή η παρατήρηση συμφωνεί με κάποιες σχετικές εργασίες (Dichio et al., 2014, Xiloyannis et al., 2015), σε άλλες όμως (Salmoral et al., 2011, Pellegrini et al., 2016)

μόνο στους ξηρικούς ελαιώνες το WF_{green} αποτελούσε το μεγαλύτερο ποσοστό του WF_{total} . Στην παρούσα εργασία στα αρδευόμενα αγροτεμάχια η μέση συνεισφορά του WF_{green} στο WF_{total} ήταν 46,4%, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό στο ξηρικό ήταν 65,9%, γεγονός που υποδεικνύει τη δυνατότητα αύξησης της παραγωγικότητας (αξιοποίησης) του πράσινου νερού (βροχόπτωση) ειδικά σε ξηρικούς ελαιώνες όπου η πρόσβαση σε οποιαδήποτε άλλη πηγή νερού είναι αδύνατη.

2.5.2.4.2 Γκρίζο Υδατικό Αποτύπωμα (WF_{grey})

Το WF_{grey} στον ξηρικό ελαιώνα (ελαιώνας 4) και στους ελαιώνες 1 και 2 είχε τη δεύτερη μεγαλύτερη συνεισφορά στο WF_{total} και αυτό μπορεί να αποδοθεί στην υψηλή ποσότητα εφαρμοζόμενης αζωτούχου λίπανσης στους συγκεκριμένους ελαιώνες. Αυτή η παρατήρηση δε συμφωνεί με σχετικές εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στη γειτονική Ιταλία (Dichio et al., 2014, Pellegrini et al., 2016) στις οποίες το WF_{grey} είχε τη μικρότερη συνεισφορά στο WF_{total} , αποτυπώνοντας έτσι τις διαφορετικές αγρονομικές πρακτικές που ακολουθούνται σε διαφορετικές περιοχές αλλά παράλληλα υπογραμμίζοντας την επίδραση αυτών των διαφορετικών αγρονομικών πρακτικών στο WF_{total} και άρα στο περιβάλλον. Η μέση ποσότητα εφαρμοζόμενης N-λίπανσης στους εν λόγω ελαιώνες (ελαιώνας 1, 2 και 4) ήταν $242,3 \text{ kg ha}^{-1}$, σχεδόν διπλάσια από αυτή που εφαρμόστηκε στον ελαιώνα 3 και 70% μεγαλύτερη από αυτή που αναφέρθηκε σε παρόμοιες μελέτες στη Νότια Ιταλία (Dichio et al., 2014, Pellegrini et al., 2016).

2.5.2.4.3 Μπλε Υδατικό Αποτύπωμα (WF_{blue})

Σε ό,τι αφορά το WF_{blue} η ποσότητα άρδευσης διέφερε μεταξύ των τριών αρδευόμενων ελαιώνων. Το πρόγραμμα άρδευσης που εφάρμοσε ο κάθε παραγωγός βασίστηκε περισσότερο στην προσωπική του εμπειρία παρά στη συμβουλή κάποιου ειδικού (γεωπόνος). Ο Ελαιώνας 3, που κατανάλωσε τη μεγαλύτερη ποσότητα αρδευτικού νερού σε σύγκριση με τους υπόλοιπους ελαιώνες ($4020,33 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ Πίνακας 2.4) σημείωσε το χαμηλότερο WF_{blue} ($118 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$). Αυτό οφείλεται στην υψηλότερη παραγωγή ($17,80 \text{ t ha}^{-1}$) συγκριτικά με αυτή που σημειώθηκε στους υπόλοιπους αρδευόμενους ελαιώνες (10,4 και $12,5 \text{ t ha}^{-1}$, αντίστοιχα).

2.5.2.5 Ανάλυση του Συνολικού Υδατικού Αποτυπώματος (WF_{total})

Το Υδατικό Αποτύπωμα αναλύθηκε σε επίπεδο καλλιέργειας (ελαιώνα) με σκοπό τον προσδιορισμό της υπάρχουσας κατάστασης στην ελαιοκαλλιέργεια της περιοχής. Ο υπολογισμός του WF_{total} και κυρίως των επιμέρους συστατικών του σε κάθε ελαιώνα έδωσε μια λεπτομερή εικόνα των καλλιεργητικών πρακτικών που εφαρμόζονται στην περιοχή σε συνδυασμό με τις ανάγκες της καλλιέργειας. Πέρα από τον ποσοτικό προσδιορισμό των πρακτικών αυτών αναγνωρίστηκε η επίδραση της χρονικής τοποθέτησής τους στην τελική παραγωγή αλλά και στο περιβάλλον.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι ο ξηρικός ελαιώνας (Ελαιώνας 4) σημείωσε το μεγαλύτερο WF_{total} , ενώ ο ελαιώνας στον οποίο εφαρμόστηκε η μεγαλύτερη ποσότητα νερού σημείωσε και το μικρότερο WF_{total} . Αυτό αρχικά φαίνεται οξύμωρο, αλλά η εξήγηση έγκειται στην τελική συγκομιζόμενη ποσότητα καρπών. Στον ξηρικό ελαιώνα η πολύ χαμηλή σοδεία (συγκριτικά με τους αρδευόμενους ελαιώνες) ως αποτέλεσμα των ασυνήθιστα υψηλών θερμοκρασιών και της παρατεταμένης ανομβρίας που παρατηρήθηκαν το καλοκαίρι του 2018 είχε σαν αποτέλεσμα να «μεγενθύνει» το αποτύπωμα των εφαρμοζόμενων καλλιεργητικών πρακτικών. Ειδικά κατά τη διάρκεια της κρίσιμης περιόδου της

ανάπτυξης της σάρκας του ελαιόκαρπου, όπου η άρδευση είναι αναγκαία για το φυτό (Gucci & Fereres, 2012), και μέχρι τη συγκομιδή, οι βροχοπτώσεις δε αρκούσαν για να καλύψουν τις υδατικές ανάγκες των ελαιόδενδρων της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα στο διάστημα από τον Αύγουστο μέχρι και αρχές Οκτώβρη που πραγματοποιείται η συγκομιδή στην περιοχή για πράσινη ελιά, η αποτελεσματική βροχόπτωση ήταν 36 mm όταν για την ίδια περίοδο η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (ET_c) ήταν 141 mm. Οι ανεπαρκείς βροχοπτώσεις είχαν σαν αποτέλεσμα τη συρρίκνωση των καρπών και επομένως τη χαμηλή ποσότητα καρπών. Επιπλέον καθώς η λίπανση είχε εφαρμοστεί νωρίτερα (τέλη Φλεβάρη – αρχές Μάρτη), όπως συμβαίνει στις ξηρικές καλλιέργειες ώστε να αξιοποιηθούν οι βροχοπτώσεις εκείνης της περιόδου, και εφόσον η τελική παραγωγή ήταν η χαμηλότερη σε σύγκριση με αυτή των υπολοίπων ελαιώνων, το WF_{grey} στον ξηρικό ελαιώνα ήταν μεγαλύτερο από αυτό που σημείωσαν οι υπόλοιποι ελαιώνες.

Εδώ η ανάλυση του WF_{total} έφερε στην επιφάνεια μια πολύ σημαντική παράμετρο, αυτή της αποτελεσματικότητας των αγρονομικών πρακτικών. Η άρδευση κατά τις κρίσιμες περιόδους της καλλιέργειας των ελαιόδενδρων όχι μόνο θα μπορούσε να αντισταθμίσει τις αντίξοες καιρικές συνθήκες και να σώσει την τελική παραγωγή αλλά θα μπορούσε να «δικαιολογήσει» προηγούμενες αγρονομικές πρακτικές, όπως η λίπανση, οι οποίες αν δεν κεφαλαιοποιηθούν στην τελική παραγωγή ως τελική σοδειά, αφήνουν μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Στον αντίποδα βρίσκεται ο αρδευόμενος Ελαιώνας 3. Ο συγκεκριμένος ελαιώνας στον οποίο εφαρμόστηκε η μεγαλύτερη ποσότητα νερού άρδευσης σημείωσε και το χαμηλότερο WF_{total} . Αυτό αποδίδεται στη μεγαλύτερη συγκομισθείσα ποσότητα καρπών σε σύγκριση με τους υπόλοιπους ελαιώνες η οποία φαίνεται να μειώνει την επίπτωση των εισροών στο περιβάλλον. Στο συγκεκριμένο ελαιώνα επίσης η χαμηλότερη εφαρμοζόμενη ποσότητα N δε σχετίστηκε με τη μείωση της παραγωγής. Εφόσον καλύπτονται οι ανάγκες της καλλιέργειας η εφαρμογή μεγαλύτερης ποσότητας λίπανσης δε σχετίζεται με την αύξηση των αποδόσεων, αλλά αντίθετα σχετίζεται με τη ρύπανση του περιβάλλοντος και το WF_{grey} .

Ένα άλλο σημείο που εντοπίστηκε μετά τον υπολογισμό του Υδατικού Αποτυπώματος είναι η παραλλακτικότητα ανάμεσα στις τιμές των WF των σχετικών εργασιών. Οι τιμές των WF που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία φαίνεται να συμφωνούν με τις αντίστοιχες ορισμένων παρόμοιων εργασιών (Dichio et al., 2014, Xiloyannis et al., 2015, Novoa et al., 2019), διαφέρουν όμως πολύ ακόμα και σε τάξη μεγέθους από άλλες σχετικές εργασίες (Salmoral et al., 2011, Schyns and Hoekstra, 2014, Charchousi et al., 2015, Chouchane et al., 2015, Pellegrini et al., 2016). Αυτή η μεγάλη παραλλακτικότητα στις τιμές του συνολικού WF σε ελαιοκαλλιέργειες παρατηρήθηκε επίσης από τους Nogueira et al. (2012) οι οποίοι την απέδωσαν στα διαφορετικά καλλιεργητικά μοτίβα που ακολουθούνται στις διάφορες χώρες, αλλά επίσης και στον τρόπο υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής. Στην παρούσα εργασία η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιώντας το CROPWAT βασίστηκε κυρίως σε δεδομένα από τη βιβλιογραφία. Για πιο ακριβή εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής θα έπρεπε να οριστούν πιο εξειδικευμένες στην καλλιέργεια τιμές K_c . Αντίστοιχα και για το βάθος ριζοστρώματος επιλέχθηκε η προκαθορισμένη από το μοντέλο CROPWAT τιμή (1,20 – 1,70 m) η οποία επίσης βασίζεται στη βιβλιογραφία (Allen et al., 1998). Στην περίπτωση των καλά αρδευόμενων δένδρων το βάθος του ριζοστρώματος δεν ξεπερνά τα 70 cm. Καθώς η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής είναι βασικό

συστατικό του υπολογισμού του WF είναι προφανές ότι κάθε βελτίωση στην εκτίμηση της ET_c θα παρέχει και πιο ακριβή και αξιόπιστη τιμή WF.

2.5.3 Συμπεράσματα

Ο υπολογισμός και η ανάλυση του Υδατικού Αποτυπώματος στην παρούσα εργασία έδωσε μια πρώτη αποτύπωση των μοτίβων χρήσης νερού στην περιοχή και την επίδραση της ελαιοκαλλιέργειας στα υδατικά αποθέματα. Η συγκριτική ανάλυση του WF των τεσσάρων ελαιώνων αναγνώρισε τις διαφοροποιήσεις στην παραγωγικότητα του νερού αλλά και στα επίπεδα ρύπανσης των υδάτινων αποδεκτών μεταξύ διαφορετικών αγρονομικών πρακτικών. Παράλληλα έδωσε τη βάση πάνω στην οποία μπορεί να αναπτυχθεί μια πιο εξειδικευμένη στην καλλιέργεια αλλά και περιοχή μεθοδολογία υπολογισμού του WF_{total} . Ακριβέστερος υπολογισμός του WF_{total} θα μπορούσε να ενισχύσει την εφαρμογή του στη βελτίωση των μοτίβων κατανομής της χρήσης νερού αλλά και στην ανάπτυξη στρατηγικών αποτελεσματικής διαχείρισης των υδάτων.

Τα συμπεράσματα της πρώτης ανάλυσης δε μπορούν να γενικευθούν δεδομένων των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της ελαιοκαλλιέργειας. Η χαμηλή παραγωγή στον ξηρικό ελαιώνα θα μπορούσε να συνδέεται και με την παρενιαυτοφορία της ελιάς, επομένως για να προβούμε σε πιο γενικευμένα συμπεράσματα θα ήταν αναγκαίο να γίνει περαιτέρω έρευνα. Έτσι τα πρώτα ευρήματα αποτέλεσαν τη βάση για το σχεδιασμό του κύριου πειράματος το οποίο θα προσπαθούσε να απαντήσει στα εξής θέματα που έφερε στην επιφάνεια η πρώτη πιλοτική ανάλυση του Υδατικού Αποτυπώματος:

1. Είναι όντως περιβαλλοντικά οικονομικότερη η ξηρική καλλιέργεια όπως εφαρμόζεται στην περιοχή ή λόγω των χαμηλών αποδόσεων απαιτεί διαφορετική διαχείριση των εισροών;
2. Μπορεί μια ορθολογικότερη διαχείριση των εισροών να αφήσει μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα χωρίς να υπολείπεται σε ποιότητα και ποσότητα η τελική παραγωγή;

2.6 ΚΥΡΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑ: Υπολογισμός Υδατικού Αποτυπώματος τριών διαφορετικών πρακτικών άρδευσης και η επίδραση τους στην ανάπτυξη, φυσιολογική κατάσταση, παραγωγή και ποιότητα καρπών

2.6.1 Υλικά και Μέθοδοι

2.6.1.1 Χαρακτηριστικά ελαιώνα

Το πείραμα διεξήχθη σε ελαιώνα Κονσερβολιάς Άρτας ηλικίας 40 ετών στην περιοχή της Γραμμενίτσας Άρτας (Ελαιώνας 1 του πιλοτικού πειράματος). Η έκταση του ελαιώνα ήταν 0,25 εκτάρια και η πυκνότητα φύτευσης ήταν 250 δένδρα ανά εκτάριο. Οι καλλιεργητικές πρακτικές που αφορούν το κλάδεμα, την λίπανση και τη φυτοπροστασία ήταν οι τυπικές της περιοχής. Στον πίνακα 2.6 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά του ελαιώνα.

Πίνακας 2.6 Χαρακτηριστικά πειραματικού ελαιώνα

Ελαιώνας	Συντεταγμένες	Έτος εγκατάστασης	Έκταση (ha)	Αριθμός δένδρων	Τύπος εδάφους
Ελαιώνας 1	39°10'47.0"N 20°58'44.7"E	1981	0,3	72	αργιλοπηλώδες

2.6.1.2 Πειραματική διάταξη – Μεταχειρίσεις

Το πείραμα διήρκεσε τρία συνεχόμενα χρόνια από το 2019 έως και το 2021. Σε μια γραμμή φύτευσης (επομένως και άρδευσης) εφαρμόστηκε μια διαφορετική πρακτική άρδευσης που αποτελούσε και την κάθε μεταχείριση:

1. Ξηρικό: Στο πειραματικό αυτό τεμάχιο δεν πραγματοποιήθηκε καθόλου άρδευση
2. Παραγωγός: Στο πειραματικό αυτό τεμάχιο η άρδευση πραγματοποιήθηκε με βάση την εμπειρία του παραγωγού που αντανάκλα την επικρατούσα στην περιοχή αρδευτική πρακτική
3. DSS: Στο πειραματικό αυτό τεμάχιο η άρδευση πραγματοποιήθηκε με βάση τις συμβουλές άρδευσης που έδωσε για όλο το διάστημα του πειράματος το σύστημα υποστήριξης αποφάσεων άρδευσης IRMA_SYS.

Τα πειραματικά τεμάχια στα οποία εφαρμόστηκε η κάθε μεταχείριση (γραμμή φύτευσης/άρδευσης) είχαν έκταση 300 m² και περιείχαν 10 δένδρα και το κάθε ένα από αυτά συνιστούσε και μια επανάληψη της κάθε μεταχείρισης. Εκατέρωθεν των γραμμών φύτευσης που εφαρμόστηκαν οι μεταχειρίσεις υπήρχε μια απόσταση προστασίας ώστε να αποφευχθούν οι πλευρικές επιδράσεις.

Στην Εικόνα 2.7 φαίνεται η πειραματική διάταξη:



Εικόνα 2.7 Πειραματική διάταξη

2.6.1.3 Υπολογισμός Υδατικού αποτυπώματος (WF_{total})

Το WF_{total} υπολογίσθηκε για κάθε μεταχείριση με βάση τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο σχετικό κεφάλαιο της εισαγωγής της παρούσας διατριβής (1.3.1).

2.6.1.4 Σύστημα παροχής συμβουλών άρδευσης IRMA_SYS

Τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων άρδευσης αξιοποιούν μετεωρολογικά δεδομένα από εγκατεστημένους αγρο-μετεωρολογικούς σταθμούς και εφαρμόζουν μαθηματικά μοντέλα για να παράγουν εκτιμήσεις της ΕΤ_o και της βροχόπτωσης σε κάθε σημείο της περιοχής εφαρμογής ή λαμβάνουν τις πληροφορίες αυτές από μοντέλα καιρού. Ακόμη ορισμένα συστήματα της κατηγορίας αυτής αξιοποιούν δεδομένα τηλεπισκόπησης (π.χ. δορυφορικά) για να προσαρμόζουν τους καλλιεργητικούς συντελεστές στην τρέχουσα κατάσταση. Στη συνέχεια με τη χρήση ειδικών πληροφοριών που αφορούν το έδαφος, την καλλιέργεια, το σύστημα άρδευσης, τις αρδεύσεις κοκ., για κάθε αγροτεμάχιο μπορούν στη βάση ισοζυγίου νερού και με δεδομένα πρόγνωσης καιρού, να αναπτύξουν συμβουλές σχετικά με την ανάγκη άρδευσης.

Το IRMA_SYS (<https://irmasys.com/>) είναι ένα έξυπνο σύστημα παροχής συμβουλών άρδευσης το οποίο λειτουργεί στην πεδιάδα της Άρτας (Trendon, Varas, & Meng, 2019). Το σύστημα αντλεί μετεωρολογικά δεδομένα από το εγκατεστημένο δίκτυο αγρο-μετεωρολογικών σταθμών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων στην πεδιάδα της Άρτας και παράγει εικονικό μετεωρολογικό για κάθε

αγροτεμάχιο που εισάγεται στο σύστημα. Το σύστημα IRMA_SYS συνοδεύεται από βάση δεδομένων με παραμέτρους για κάθε καλλιέργεια με βάση τη βιβλιογραφία (Allen et al., 1998), ενώ διαθέτει στο υπόβαθρο εδαφολογικό χάρτη με τις βασικές κατηγορίες υφής εδάφους και προτείνει σχετικές αρδευτικές παραμέτρους ανά σημείο με βάση πάλι τη βιβλιογραφία (Twarakavi et al., 2009). Παρόλα αυτά παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα να εισάγει ο ίδιος τις παραμέτρους του εδάφους και καλλιέργειας εφόσον τις γνωρίζει.

2.6.1.5 Δεδομένα εξατμισοδιαπνοής και καλλιέργειας

Για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιήθηκε μια χρονοσειρά εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) από τον εικονικό μετεωρολογικό σταθμό που το σύστημα IRMA_SYS δημιουργεί για κάθε αγροτεμάχιο (Malamos et al., 2017). Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής K_c της καλλιέργειας ελιάς όπως προτείνεται στη βιβλιογραφία (Allen et al., 1998) και περιγράφεται στο 2.5.2.1.2. Το βάθος ριζοστρώματος ορίστηκε στα 0,7 m.

2.6.1.6 Εδαφικές ιδιότητες

Για τον προσδιορισμό του τύπου εδάφους σε κάθε ελαιώνα πραγματοποιήθηκε μηχανική ανάλυση σύμφωνα με τη μεθοδολογία Βουγιούκου (Βουγιουκος, 1936) σε δείγματα εδάφους που ελήφθησαν από τα πρώτα 50 εκατοστά βάθους όπως περιγράφεται στο 2.5.1.4. Στη συνέχεια, αξιοποιώντας τιμές για τις αναλογίες άμμου, ιλύος και αργίλου και χρησιμοποιώντας την τυπολογία που έχουν αναπτύξει οι Saxton και Rawls (2006) προσδιορίστηκαν οι αρδευτικές παράμετροι εδάφους που εισήχθησαν στο σύστημα IRMA_SYS (Πίνακας 2.2 και Πίνακας 2.3 – Ελαιώνας 1).

2.6.1.7 Εφαρμοζόμενη ποσότητα άρδευσης

Σε κάθε πειραματική γραμμή άρδευσης εγκαταστάθηκε υδρόμετρο (DS-TRP, Maddalena S.P.A., Italy) που παρείχε τη συνολική ποσότητα άρδευσης σε κάθε μεταχείριση (Εικόνα 2.6).

2.6.1.8 Αγρονομικά δεδομένα

Τα δεδομένα λίπανσης τα παρείχε ο ιδιοκτήτης του ελαιώνα, ενώ τα δεδομένα της τελικής συγκομιζόμενης ποσότητας κάθε πειραματικό έτος (2019, 2020, 2021) προήλθαν από την επιτόπια καταμέτρηση κατά τη διάρκεια της συγκομιδής.

2.6.1.9 Μετρήσεις ανάπτυξης

Σε όλη τη διάρκεια των τριών χρόνων του πειράματος για κάθε καλλιεργητική περίοδο (άνοιξη έως αρχές φθινοπώρου – συγκομιδή) μετρήθηκε η ανάπτυξη των βλαστών σε κάθε επανάληψη της κάθε μεταχείρισης. Στην έναρξη κάθε καλλιεργητικής περιόδου επιλέχθηκαν και σημειώθηκαν σε κάθε δένδρο δυο βλαστοί σε αντιδιαμετρικές πλευρές του δένδρου. Σε κάθε βλαστό μετρήθηκε σε μηνιαία βάση το μήκος του (Εικόνα 2.8). Στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου η μεταβολή του μήκους του βλαστού, υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση 2.1:

2.1

$$\Delta x = 100\% \times \frac{\text{τελική μέτρηση} - \text{αρχική μέτρηση}}{\text{αρχική μέτρηση}}$$



Εικόνα 2.8 Μέτρηση ανάπτυξης βλαστού. Διακρίνεται ο σημειωμένος βλαστός. Η μέτρηση ανάπτυξης πραγματοποιήθηκε από το σημείο σύμφυσης του ποδίσκου του 1ου καρπού μέχρι την άκρη του βλαστού πριν το σημείο έκπτυξης των νέων φύλλων (μπλε βέλος).

2.6.1.10 Μετρήσεις χρωστικών (χλωροφύλλη και καροτενοειδή)

Η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη α, χλωροφύλλη β, ολική χλωροφύλλη και καροτενοειδών μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών της τρίτης καλλιεργητικής περιόδου (2021) σύμφωνα με τη μέθοδο των Lichtenthaler and Buschmann (2005). Μια ποσότητα 0,10 g φρέσκων φύλλων ελιάς ομογενοποιήθηκε σε 10 mL καθαρής ακετόνης για την παραλαβή του εκχυλίσματος χλωροφύλλης. Ακολούθησε φυγοκέντρηση του διαλύματος στις 3000 rpm για 5 min. Η απορρόφηση του υπερκειμένου του εκχυλίσματος μετρήθηκε σε φασματοφωτόμετρο στα 661,6 για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης α, 644,8 για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης β και 470 nm για τον προσδιορισμό στη συγκέντρωση των καροτενοειδών (Εικόνα 2.11).

2.6.1.11 Μέτρηση σχετικής περιεκτικότητας νερού στα φύλλα

Η σχετική περιεκτικότητα νερού στα φύλλα (Leaf relative water content - LRWC) προσδιορίστηκε κατά τη διάρκεια του τρίτου έτους του πειράματος (2021) σε μηνιαία βάση από τον Ιούνιο μέχρι τον Οκτώβρη, σύμφωνα με τη μέθοδο των Barrs και Weatherley (1962). Τρία πλήρως εκπτυγμένα φύλλα ελιάς συλλέχθηκαν από κάθε δένδρο (επανάληψη) το ηλιακό μεσημέρι (12:00 πμ) και μεταφέρθηκαν αμέσως στο εργαστήριο όπου ζυγίστηκαν για να ληφθεί το νωπό βάρος (FW). Στη συνέχεια ακολούθησε η ενυδάτωσή τους. Τα φύλλα βυθίστηκαν σε φιαλίδια με απεσταγμένο νερό τα οποία σφραγίστηκαν ερμητικά και φυλάχθηκαν σε συνθήκες σκότους σε θερμοκρασία δωματίου. Έπειτα από 24 ώρες τα φύλλα αφού απομακρύνθηκε η επιπλέον εξωτερική υγρασία ζυγίστηκαν ξανά για να πάρουμε το βάρος στη σπαργή (TW) και αφυδατώθηκαν σε ξηραντήρα (Memmert, Germany) στους 70 °C για 48 ώρες για να ληφθεί το ξηρό βάρος (DW). Η σχετική περιεκτικότητα νερού στα φύλλα (LRWC) υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση 2.2:

$$LRWC = 100 \times \frac{(FW - DW)}{(TW - DW)}$$

2.6.1.12 Μέτρηση περιεκτικότητας ολικών φαινολών

Το περιεχόμενο των φύλλων σε ολικές φαινόλες μετρήθηκε σε μηνιαία βάση το καλοκαίρι του τρίτου πειραματικού έτους (2021) σύμφωνα με τη μέθοδο των Wissam et al. (2016). Είκοσι (20) mg ξηρών φύλλων ελιάς ομογενοποιήθηκαν με 10 mL διαλύματος αιθανόλης:νερού 80:20. Ακολούθησε φυγοκέντρωση του εκχυλίσματος στις 5000 rpm για 5 min. 250 µL από το υπερκείμενο αραιώθηκαν σε 9,75 mL απεσταγμένου νερού. Ένα (1) mL από το αραιωμένο εκχύλισμα αναμείχθηκε με 500 µL αντιδραστηρίου Folin-Ciocalteu (2 N) και 4,5 mL απεσταγμένου νερού και αφέθηκε σε ηρεμία σε θερμοκρασία δωματίου για 3 min. Στη συνέχεια στο διάλυμα προστέθηκαν 4 mL Na₂CO₃ 7,5% και τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε υδατόλουτρο στους 40 °C για 30 min. Η απορρόφηση μετρήθηκε στα 734 nm και τα αποτελέσματα εκφράστηκαν σε γραμμάρια (g) γαλλικού οξέος ανά 100 g ξηράς ουσίας (Εικόνα 2.9).

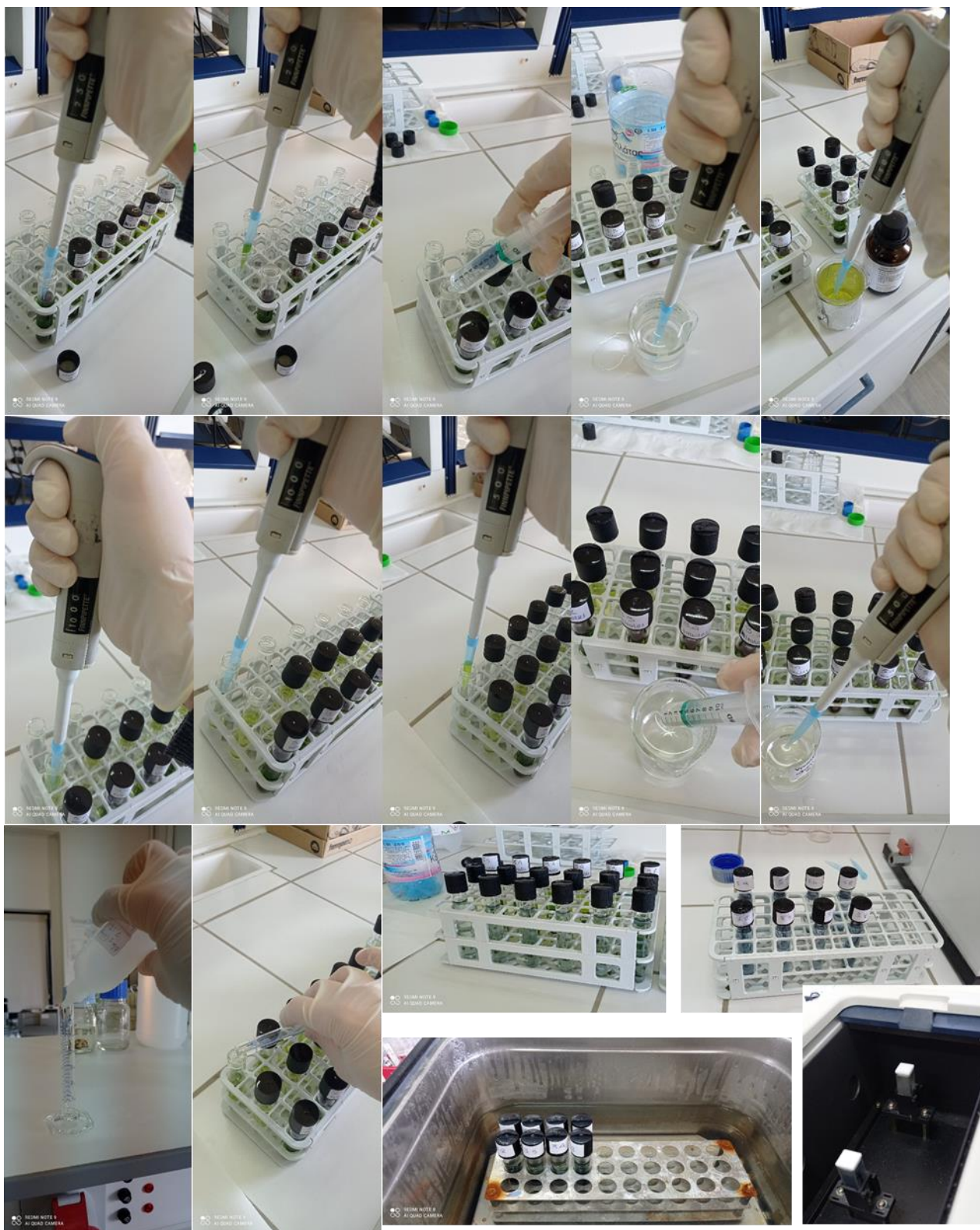
2.6.1.13 Μέτρηση περιεκτικότητας σε προλίνη

Το περιεχόμενο των φύλλων σε προλίνη μετρήθηκε το τρίτο έτος του πειράματος (2021) σε μηνιαία βάση από τον Ιούνιο έως τον Οκτώβρη σύμφωνα με την μέθοδο του Bates et al. (1973). Δέκα mg ξηράς ουσίας φύλλων ομογενοποιήθηκαν με 4 mL διαλύματος 80:20 αιθανόλης:νερό. Ακολούθησε φυγοκέντρωση του εκχυλίσματος στις 4000 rpm για 10 min. Ένα mL του υπερκειμένου αναμείχθηκε με 2 mL νινυδρίνης, και στροβιλίστηκε για 15 s στο vortex και στη συνέχεια τοποθετήθηκε στο υδατόλουτρο στους 90 °C για 25 min. Ακολούθησε ξανά φυγοκέντρωση του εκχυλίσματος στις 4000 rpm για 10 min και το υπερκείμενο μετρήθηκε σε φασματοφωτόμετρο στα 520 nm (Εικόνα 2.10).

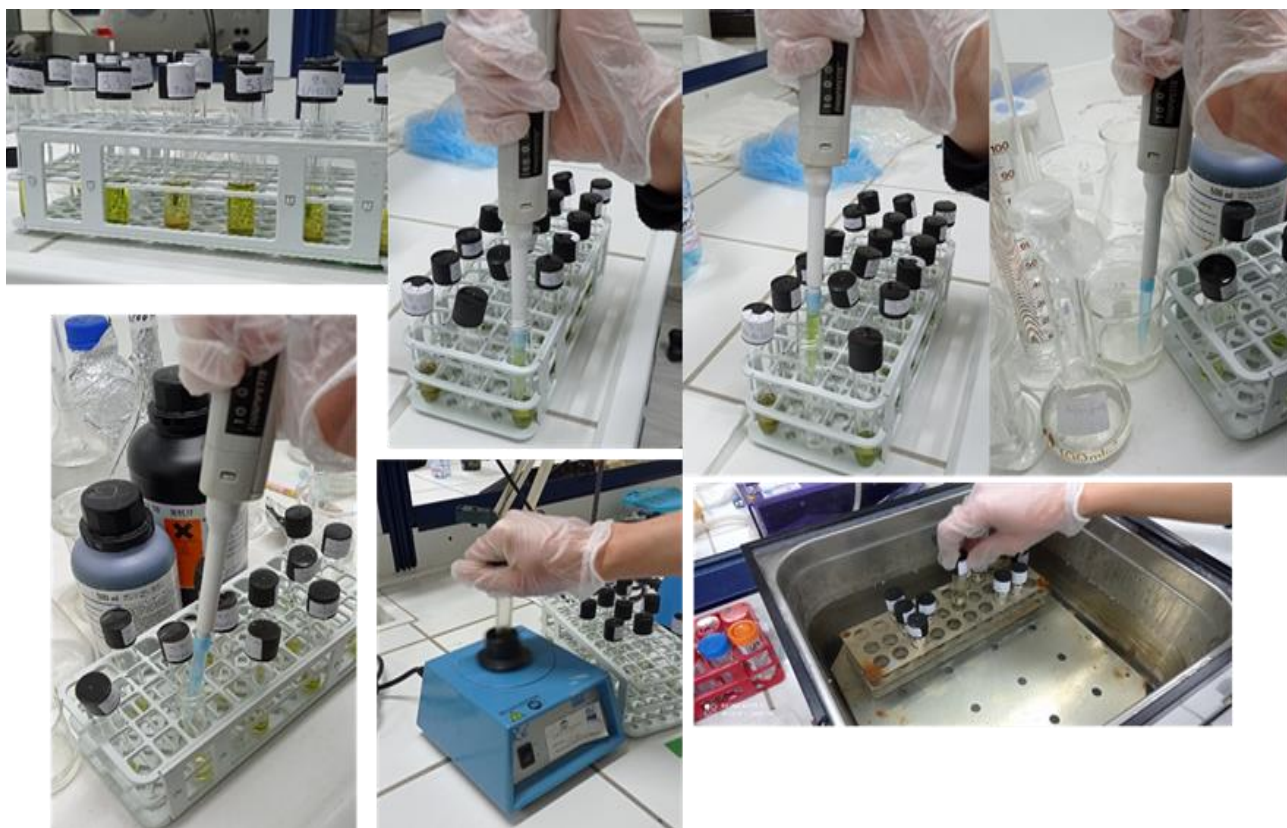
2.6.1.14 Μέτρηση ποιοτικών χαρακτηριστικών καρπών

Η μέτρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των καρπών περιελάμβανε τη μέτρηση του βάρους του καρπού, του βάρους του πυρήνα, της σκληρότητας της σάρκας, του μήκους και του πλάτους του καρπού, το ξηρό βάρος σάρκας και το χρώμα του φλοιού. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν στους συγκομιζόμενους καρπούς κάθε καλλιεργητικής περιόδου του πειράματος (2019, 2020, 2021).

Η δειγματοληψία των καρπών έλαβε χώρα κάθε έτος μια μέρα πριν τη συγκομιδή. Από κάθε δένδρο (επανάληψη) κάθε μεταχείρισης λήφθηκε περιμετρικά και σε ίδιο ύψος περίπου 2 m ποσότητα 30 καρπών (Εικόνα 2.12). Οι καρποί μετά τη συλλογή τους τοποθετήθηκαν σε σημειωμένο, με τον αντίστοιχο κωδικό της κάθε επανάληψης περιέκτη, και αποθηκεύτηκαν για μια μέρα στο ψυγείο μέχρι τη μεταφορά τους στο εργαστήριο όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις (Εικόνα 2.13).



Εικόνα 2.9 Στιγμιότυπα από τη διαδικασία προσδιορισμού περιεκτικότητας ολικών φαινολικών στα φύλλα ελιάς



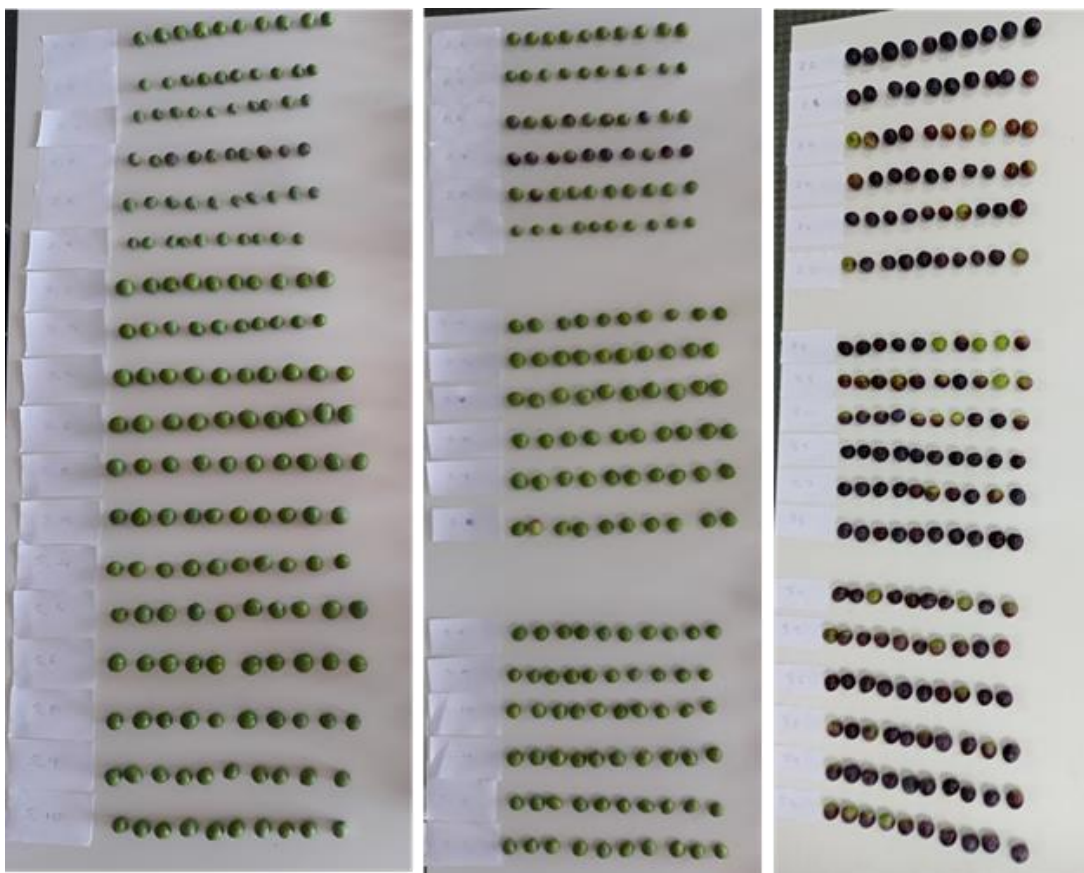
Εικόνα 2.10 Στιγμιότυπα από τη διαδικασία προσδιορισμού περιεκτικότητας προλίνης στα φύλλα ελιάς



Εικόνα 2.11 Στιγμιότυπα από τη διαδικασία προσδιορισμού περιεκτικότητας χρωστικών στα φύλλα ελιάς



Εικόνα 2.12 Δειγματοληψία ελαιόκαρπου στον αγρό



Εικόνα 2.13 Δείγματα ελαιόκαρπου για προσδιορισμό των ποιοτικών χαρακτηριστικών τους. Διακρίνονται οι καρποί των διαφορετικών επαναλήψεων των τριών μεταχειρίσεων τα τρία χρόνια του πειράματος

2.6.1.14.1 Μέσο βάρος καρπού

Δέκα καρποί ανά επανάληψη κάθε μεταχείρισης ζυγίστηκαν σε ζυγαριά ακριβείας (Kern, model EW 600-ZM, Balingen, Germany) για να προσδιοριστεί το μέσο βάρος καρπού.

2.6.1.14.2 Μέσο βάρος πυρήνα

Μετά την αφαίρεση της σάρκας δέκα καρπών από κάθε επανάληψη ζυγίστηκαν οι πυρήνες τους σε ζυγαριά ακριβείας (Kern, model EW 600-ZM, Balingen, Germany) για να προσδιοριστεί το μέσο βάρος πυρήνα (Εικόνα 2.14).



Εικόνα 2.14 Ζύγιση πυρήνων ελαιοκάρπου

2.6.1.14.3 Σκληρότητα σάρκας καρπού

Η σκληρότητα της σάρκας μετρήθηκε με τη βοήθεια ψηφιακού πενετρόμετρου (Μοντέλο 53205, Turoni Srl, Forli, Italy) με έμβολο διαμέτρου 3 mm, έπειτα από την προσεκτική αφαίρεση του φλοιού στο σημείο εισόδου του εμβόλου (Εικόνα 2.15).



Εικόνα 2.15 Μέτρηση της σκληρότητας της σάρκας του ελαιοκάρπου με τη βοήθεια του πενετρόμετρου

2.6.1.14.4 Ξηρό βάρος σάρκας

Σε δέκα καρπούς από κάθε επανάληψη κάθε μεταχείρισης ζυγίστηκαν σε ζυγαριά ακριβείας (Kern, model EW 600-ZM, Balingen, Germany) επιμήκεις φέτες από το περικάρπιο (Εικόνα 2.16). Στη συνέχεια τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα (Mettmert, Germany) στους 80 °C για 48 h και ακολούθησε ζύγιση για τον προσδιορισμό του ξηρού βάρους της σάρκας με βάση την εξίσωση 2.3:

2.3

$$EB = 100 \times \frac{\text{ξηρό βάρος}}{\text{νωπό βάρος}}$$



Εικόνα 2.16 Ζύγιση επιμήκων φετών από το περικάρπιο του ελαιόκαρπου και προετοιμασία για ξήρανση για τον προσδιορισμό του ξηρού βάρους της σάρκας

2.6.1.14.5 Μήκος και πλάτος καρπού

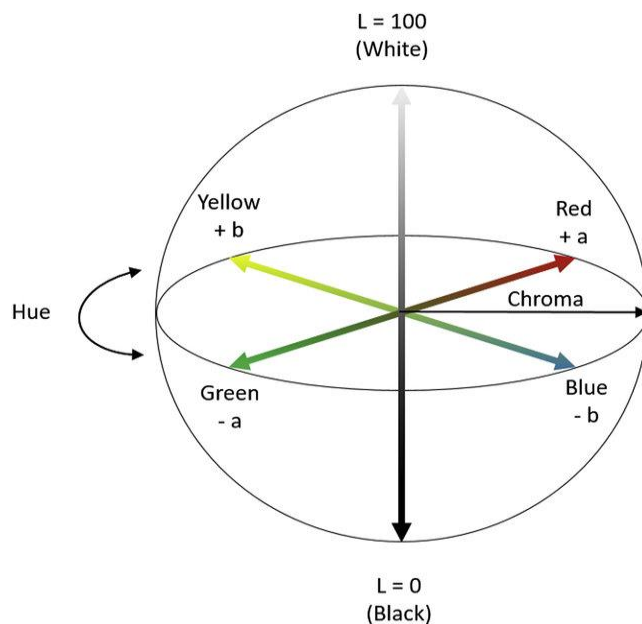
Το μήκος και το πλάτος δέκα καρπών από κάθε επανάληψη κάθε μεταχείρισης μετρήθηκε με τη βοήθειά παχύμετρου.

2.6.1.14.6 Χρώμα φλοιού

Το χρώμα του φλοιού των καρπών μετρήθηκε με το φορητό χρωματόμετρο (Μοντέλο CR-400, Minolta Ltd, Osaka, Japan).

Οι παράμετροι χρώματος L^* , a^* και b^* τοποθετούν το χρώμα σε ένα τρισδιάστατο ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων, όπου το L^* είναι κάθετο στο επίπεδο που σχηματίζουν τα a^* και b^* (Εικόνα 2.17).

Η τιμή L^* αφορά τη φωτεινότητα (0 λευκό – 100 μαύρο), η τιμή a^* τη μεταβολή από το πράσινο ($-a^*$) στο κόκκινο ($+a^*$) και η τιμή b^* τη μεταβολή από το μπλε ($-b^*$) στο κίτρινο ($+b^*$).



Εικόνα 2.17 Ο τρισδιάστατος ομοιόμορφος χρωματικός χώρος CIELAB

Δέκα (10) καρποί από κάθε δένδρο (επανάληψη) από κάθε μεταχείριση μετρήθηκαν στη μια πλευρά στον ισημερινό τους για τις παραμέτρους L^* , a^* και b^* και υπολογίστηκε αυτόματα από το όργανο ο μέσος όρος των αντίστοιχων τιμών των δέκα καρπών (Εικόνα 2.18).

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι παράμετροι chroma (C^*) και hue (H°) με τη βοήθεια των παρακάτω εξισώσεων (2.4) και (

2.5):

2.4

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

2.5

$$H^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right)$$

Το C^* είναι μία παραμέτρος ανάλογη με την ένταση του χρώματος από το γκρι μέχρι το έγχρωμο. Όσο πιο μεγάλο είναι το C^* , τόσο πιο καθαρό χρώμα έχει ο καρπός.

Η παράμετρος Hue (H°) εκφράζει την απόχρωση. Τιμή $H^\circ=0^\circ$ εκφράζει το κόκκινο, τιμή $H^\circ=90^\circ$ εκφράζει το κίτρινο, τιμή $H^\circ=180^\circ$ το πράσινο, και τιμή $H^\circ=270^\circ$ το μπλε.

Σε συνδυασμό τα C^* και H° δίνουν το ακριβές πραγματικό χρώμα (McGuire, 1992).



Εικόνα 2.18 Μέτρηση χρώματος φλοιού καρπού

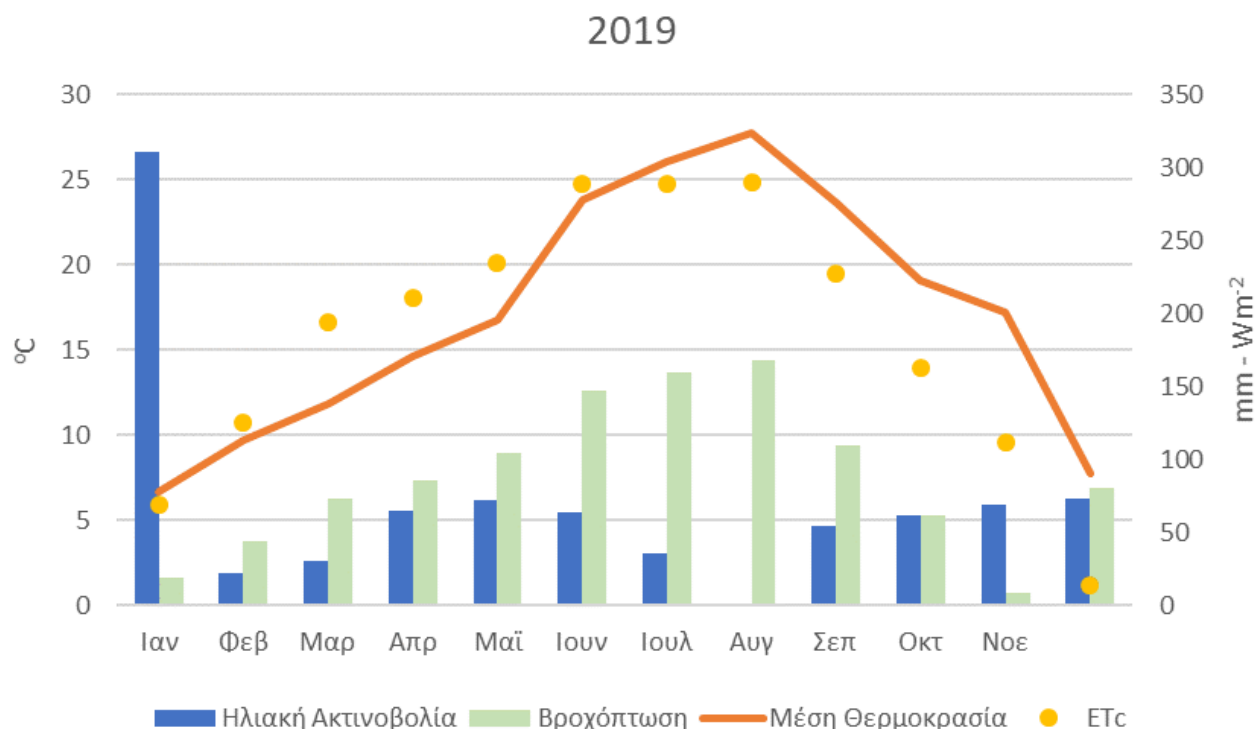
2.6.1.15 Στατιστική ανάλυση

Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού SPSS 20.0 (SPSS 20.0, IBM Corp. 2011). Εφαρμόστηκε η ανάλυση διασποράς (ANOVA) και οι διαφορές μεταξύ των μέσων όρων μεταχειρίσεων για όλες τις παραμέτρους προσδιορίστηκε με το LSD test ($p \leq 0.05$).

2.6.2 Αποτελέσματα – Συζήτηση

2.6.2.1 Κλιματικές συνθήκες

Τα τρία χρόνια του πειράματος διέφεραν σημαντικά σε ό,τι αφορά τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες και την επίδρασή τους στην τελική παραγωγή. Το καλοκαίρι του 2019 ήταν σχετικά ξηρό και ζεστό καλοκαίρι με παρατεταμένη ξηρασία που αποτυπώθηκε στο μέγεθος και στο χρώμα των καρπών των ελαιόδενδρων που δεν αρδεύονταν. Οι βροχοπτώσεις στις αρχές του Οκτώβρη δεν κατάφεραν να «διορθώσουν» πλήρως αυτή την επίδραση και έτσι, ενώ κατάφεραν να ανακτήσουν το σχήμα τους οι καρποί, το ίδιο δε συνέβη με το χρώμα τους. Παρ' όλα αυτά η χρονιά αυτή σε γενικά πλαίσια ήταν μια καλή χρονιά από πλευράς τελικής σοδειάς. Οι επόμενες δυο χρονιές που ακολούθησαν όμως, ήταν κακές χρονιές για την τελική σοδειά για διαφορετικούς λόγους. Το 2020, οι ασυνήθιστα υψηλές θερμοκρασίες αρχές του Μάη που συνέπεσε με το στάδιο της άνθισης και η αδυναμία παροχής νερού άρδευσης από τον ΤΟΕΒ της περιοχής είχε σαν αποτέλεσμα να επηρεαστεί σημαντικά η καρπώδευση και τελικά και η σοδειά. Το 2021 από την άλλη, η αδυναμία συμπλήρωσης των ωρών ψύχους για την ανθική διαφοροποίηση λόγω σχετικά θερμού χειμώνα οδήγησε επίσης σε χαμηλή καρποφορία και τελική σοδειά.

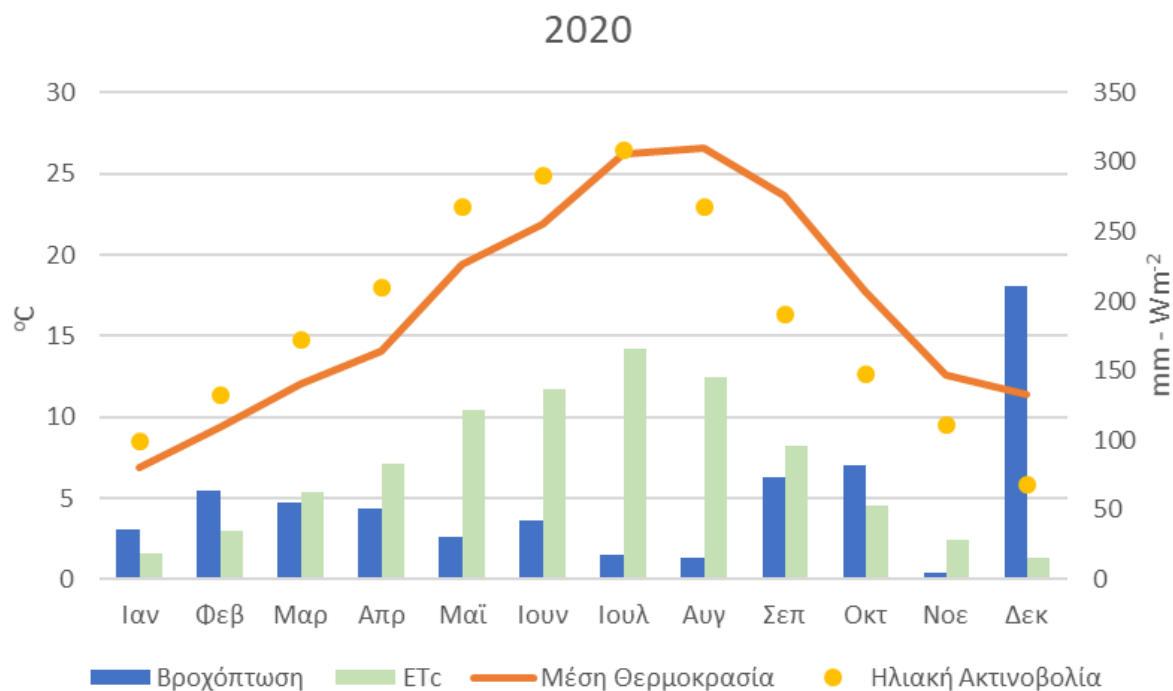


Διάγραμμα 2.5 Μετεωρολογικά δεδομένα για τον πειραματικό ελαιώνα για το έτος 2019. Σημειώνεται η μέση μηνιαία θερμοκρασία, η μέση μηνιαία ακτινοβολία (Wm^{-2}), το συνολικό μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm) και η συνολική μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ελιάς ETc (mm).

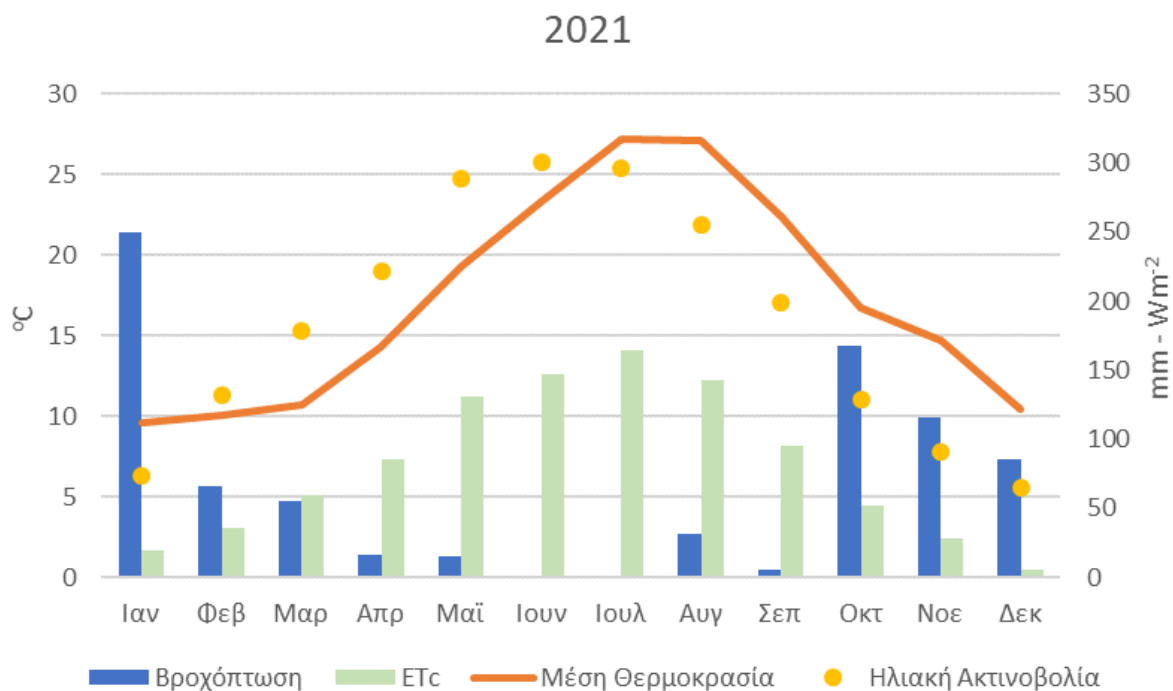
Πιο συγκεκριμένα το 2019 η μέση θερμοκρασία ήταν $17,1^{\circ}C$ και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης 860 mm. Κατά τους θερινούς μήνες (Ιούνιος έως και Αύγουστος) το συνολικό ύψος βροχόπτωσης ήταν 100,67 mm, ενώ η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας το ίδιο διάστημα ήταν 474,15 mm (Διάγραμμα 2.5).

Το 2020 η μέση θερμοκρασία ήταν $16,8^{\circ}C$, ενώ η ετήσια βροχόπτωση ήταν 683 mm. Τους θερινούς μήνες το ύψος των βροχοπτώσεων δεν ξεπέρασε τα 75 mm, όταν η εξατμισοδιαπνοή την ίδια περίοδο ήταν 447,41 mm. Το δεύτερο δεκαπενθήμερο του Μαΐου, όπως προαναφέρθηκε, σημειώθηκαν μέσες θερμοκρασίες ημέρας έως και $28^{\circ}C$ (Διάγραμμα 2.6).

Το 2021 η μέση θερμοκρασία ήταν $17,15^{\circ}C$, ενώ το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης ήταν 808,26 mm. Τους θερινούς μήνες το ύψος βροχόπτωσης ήταν 33,35 mm με την εξατμισοδιαπνοή το ίδιο διάστημα να φτάνει τα 454,59 mm. Τους χειμερινούς μήνες (12^{ος} 2020 και 1^{ος} και 2^{ος} του 2021) η θερμοκρασία ήταν $10,35^{\circ}C$, ενώ η αντίστοιχη θερμοκρασία για το 2019 ήταν $8,03^{\circ}C$ και το 2020 ήταν $7,98^{\circ}C$ (Διάγραμμα 2.7).



Διάγραμμα 2.6 Μετεωρολογικά δεδομένα για τον πειραματικό ελαιώνα για το έτος 2020. Σημειώνεται η μέση μηνιαία θερμοκρασία, η μέση μηνιαία ακτινοβολία (Wm^{-2}), το συνολικό μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm) και η συνολική μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ελιάς ETc (mm).



Διάγραμμα 2.7 Μετεωρολογικά δεδομένα για τον πειραματικό ελαιώνα για το έτος 2021. Σημειώνεται η μέση μηνιαία θερμοκρασία, η μέση μηνιαία ακτινοβολία (Wm^{-2}), το συνολικό μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm) και η συνολική μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ελιάς ETc (mm).

Στον Πίνακα 2.7 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για τα τρία έτη του πειράματος (2019, 2020 και 2021) το ύψος βροχόπτωσης (mm) ανά εποχή, η μέγιστη θερμοκρασία (T_{\max} , °C) κατά την περίοδο άνθισης και οι ώρες που τα δένδρα του πειραματικού αγρού δέχτηκαν θερμοκρασίες από 0°C έως 7.2 °C κατά τη διάρκεια του Δεκεμβρίου και Ιανουαρίου κάθε έτους.

Πίνακας 2.7 Συγκεντρωτικά για τα έτη 2019, 2020 και 2021 το ύψος βροχόπτωσης (mm) ανά εποχή, η μέγιστη θερμοκρασία (T_{\max} , °C) κατά την περίοδο άνθισης και οι ώρες από 0°C έως 7.2°C κατά τη διάρκεια του Δεκεμβρίου και Ιανουαρίου.

Ετος	Βροχόπτωση (mm)			T_{\max} (°C)	Ώρες (h)
	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Περίοδος άνθισης	(0°C < °C < 7.2 °C)
2019	167,45	100,67	116,11	30,0	508
2020	136,67	75,90	156,12	39,1	447
2021	85,29	33,35	172,5	34,1	291

2.6.2.2 Δεδομένα άρδευσης και άλλα αγρονομικά δεδομένα

Στον Πίνακα 2.8 συνοψίζονται τα δεδομένα άρδευσης, της εφαρμοζόμενης ποσότητας N και της τελικής παραγωγής καρπών σε κάθε μεταχείριση. Οι τρεις μεταχειρίσεις δέχθηκαν την ίδια ποσότητα λίπανσης κάθε χρόνο η οποία όμως διαφέρει ανάμεσα στις τρεις χρονιές. Η άρδευση τον τρίτο χρόνο φαίνεται αρκετά μειωμένη στην DSS μεταχείριση. Αυτό αποδίδεται στην καλύτερη προσαρμογή του συστήματος στη συγκεκριμένη καλλιέργεια έπειτα από τρία χρόνια εφαρμογής. Η παραγωγή μόνο το 2019 ήταν κοντά στα συνηθισμένα για την περιοχή επίπεδα. Τις επόμενες χρονιές ήταν πολύ χαμηλότερα ακόμα και από τις «κακές χρονιές» που συνδέονται με την παρειαυτοφορία. Η χαμηλή συγκομιδή τις χρονιές 2020-2021 συνδέεται με τις κλιματικές συνθήκες όπως περιγράφονται στην παράγραφο 2.6.2.1.

Πίνακας 2.8 Αγρονομικά δεδομένα για τις τρεις μεταχειρίσεις τα τρία χρόνια του πειράματος (2019, 2020, 2021)

Μεταχειρίσεις	Καθαρή άρδευση			Εφαρμοζόμενη ποσότητα			Συγκομιζόμενη ποσότητα		
	(mm)			N (kg ha ⁻¹)			(tn ha ⁻¹)		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
Ξηρικό	0	0	0	173	96	160	12,6	3,4	1,4
Παραγωγός	455	327	329	173	96	160	16,7	7	3
DSS	206	263	158	173	96	160	15,8	6,7	2,9

2.6.2.3 Υπολογισμός Υδατικού Αποτύπωματος (WF_{total})

Το WF_{total} για κάθε μεταχείριση και κάθε καλλιεργητική περίοδο συνοψίζονται στον Πίνακα 2.9. Το κάθε WF_{total} αναλύεται στα επιμέρους συστατικά του (WF_{green} , WF_{blue} , WF_{grey}).

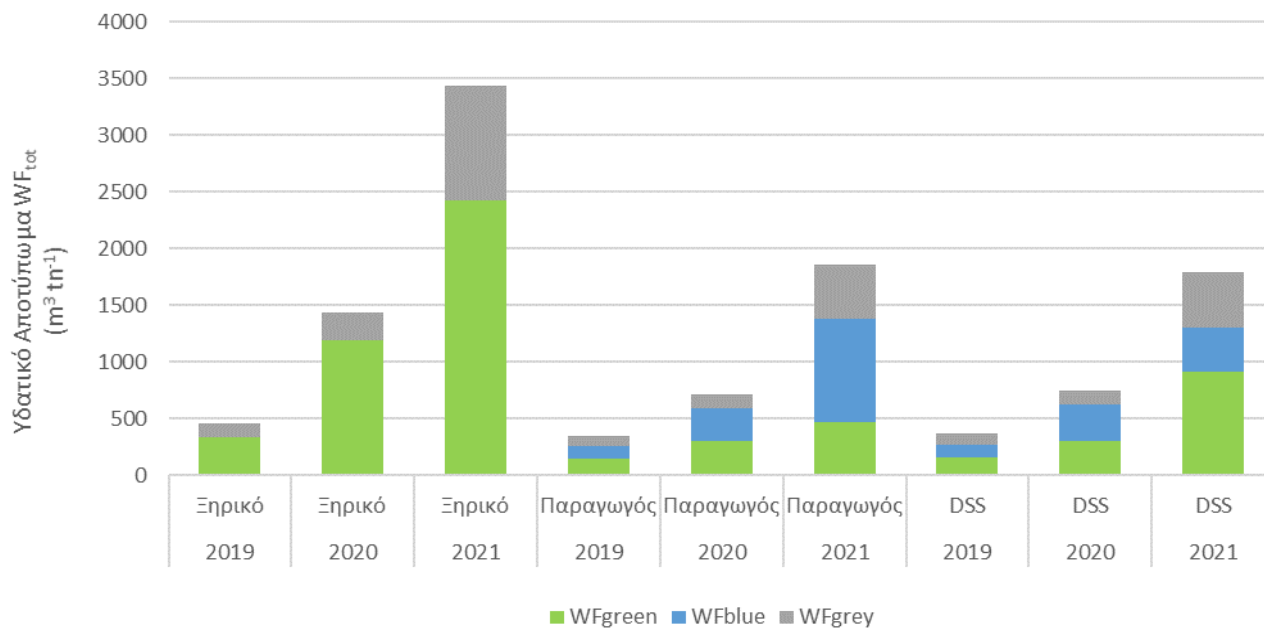
Πίνακας 2.9 Το συνολικό Υδατικό Αποτύπωμα WF_{tot} και τα επιμέρους συστατικά του για κάθε μεταχείριση (ξηρικό, παραγωγός και DSS) για κάθε πειραματικό έτος (2019, 2020, 2021)

Μεταχείριση	έτος	WF_{green} ($m^3 t^{-1}$)	WF_{blue} ($m^3 t^{-1}$)	WF_{grey} ($m^3 t^{-1}$)	WF_{total} ($m^3 t^{-1}$)	μ.ο. WF_{total} ($m^3 t^{-1}$)
Ξηρικό	2019	340,93	0,00	121,21	462,14	1782,16
Ξηρικό	2020	1192,99	0,00	249,42	1442,40	
Ξηρικό	2021	2426,93	0,00	1014,99	3441,93	
Παραγωγός	2019	153,00	105,78	91,83	350,61	972,61
Παραγωγός	2020	303,10	287,97	121,34	712,41	
Παραγωγός	2021	466,47	916,26	472,09	1854,82	
DSS	2019	161,96	111,01	96,87	369,84	970,03
DSS	2020	300,73	321,46	127,72	749,91	
DSS	2021	914,84	392,17	483,33	1790,35	

Παρατηρούμε ότι σε κάθε καλλιεργητική περίοδο το ξηρικό πειραματικό τεμάχιο επέδειξε το υψηλότερο WF_{total} . Αυτό όπως φαίνεται από τον τρόπο υπολογισμού του WF_{total} οφείλεται στη χαμηλότερη παραγωγή που σημείωσαν τα ξηρικά ελαιόδενδρα και τις τρεις συνεχόμενες χρονιές (Πίνακας 2.8). Έτσι οι εισροές που συμμετέχουν στον υπολογισμό του WF_{total} (βροχόπτωση και λίπανση) παρόλο που είναι ίδιες με αυτές των άλλων δυο μεταχειρίσεων κάθε χρόνο αφήνουν μεγαλύτερο αποτύπωμα, καθώς διαιρούνται με μικρότερη παραγωγή.

Τα δένδρα των άλλων δυο μεταχειρίσεων (παραγωγός και DSS) παρόλο που σημείωσαν παρόμοια παραγωγή και τα τρία χρόνια, ενώ κατανάλωσαν διαφορετικές ποσότητες νερού σημείωσαν μέχρι τον τρίτο χρόνο παρόμοιο WF με κάποια μικρή διαφοροποίηση στην κατανομή των επιμέρους συστατικών τους (Διάγραμμα 2.8 και Πίνακας 2.9). Τον τρίτο χρόνο τα ελαιόδενδρα που αρδεύτηκαν με βάση το DSS σημείωσαν το χαμηλότερο WF_{total} .

Για να προβούμε στην Ανάλυση του WF_{total} έχει μεγάλη σημασία να δούμε αναλυτικά τα επιμέρους συστατικά του.



Διάγραμμα 2.8 Το συνολικό Υδατικό Αποτύπωμα (WF_{total}) και των επιμέρους συστατικών του (WF_{green} , WF_{blue} , WF_{grey}) των διαφορετικών μεταχειρίσεων για τα τρία πειραματικά έτη

2.6.2.3.1 Πράσινο Υδατικό Αποτύπωμα (WF_{green})

Τα ξηρικά προφανώς σημείωσαν τη μεγαλύτερη συμμετοχή του WF_{green} στο WF_{total} κάθε πειραματικό έτος. Καθώς η βροχή είναι η μόνη πηγή νερού για αυτά έκαναν μεγαλύτερη αξιοποίηση του βρόχινου νερού και αυτό αντανακλάται στο WF_{green} κάθε έτους.

Τα δένδρα που ποτίστηκαν με βάση τη συμβουλή άρδευσης του DSS (IRMA_SYS) παρήγαγαν ελάχιστα μικρότερη συγκομιδή καρπών σε σχέση με αυτά που αρδεύτηκαν με βάση την εμπειρία του παραγωγού. Τα δένδρα της DSS μεταχείρισης έκαναν τα πρώτα δυο χρόνια αν όχι ίδια λίγο καλύτερη αξιοποίηση του βρόχινου νερού σε σύγκριση με τα αντίστοιχα της μεταχείρισης του παραγωγού. Τον τρίτο πλέον χρόνο όμως σημείωσαν πολύ υψηλότερο WF_{green} ($914,84 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$) σε σχέση με τα ελαιόδενδρα που αρδεύτηκαν με βάση την εμπειρία του παραγωγού ($466,47 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$) αποτυπώνοντας έτσι τη σημαντική βελτίωση στην αξιοποίηση του νερού της βροχής (Πίνακας 2.9 και Διάγραμμα 2.8).

2.6.2.3.2 Μπλε Υδατικό Αποτύπωμα (WF_{blue})

Τα πρώτα δυο χρόνια, ενώ τα δένδρα που ποτίστηκαν με βάση τη συμβουλή του DSS κατανάλωσαν λιγότερο νερό, η μικρότερη παραγωγή τους σε σύγκριση με αυτή των ελαιόδενδρων που αρδεύτηκαν με βάση την εμπειρία του παραγωγού έδωσε ελάχιστα μεγαλύτερο WF_{blue} (Πίνακας 2.9). Την τρίτη χρονιά πλέον (2021) που τα δένδρα της DSS μεταχείρισης έκαναν σημαντικά καλύτερη αξιοποίηση του βρόχινου νερού το WF_{blue} που σημείωσαν είναι 2,5 φορές λιγότερο από το αντίστοιχο των δένδρων της μεταχείρισης με άρδευση παραγωγού (Πίνακας 2.9 και Διάγραμμα 2.8). Η βελτίωση αυτή στη χρήση νερού οφείλεται στην προσαρμογή του συστήματος DSS στη συγκεκριμένη καλλιέργεια.

2.6.2.3.3 Γκρίζο Υδατικό Αποτύπωμα (WF_{grey})

Εφόσον η εφαρμοζόμενη ποσότητα N ήταν η ίδια κάθε έτος για κάθε μεταχείριση οι διαφοροποιήσεις στο WF_{grey} οφείλονται αποκλειστικά στις διαφορές της παραγωγής ανάμεσα στις μεταχειρίσεις. Έτσι τα

ελαιόδενδρα που αρδεύτηκαν με βάση την εμπειρία του παραγωγού επέδειξαν και τις τρεις χρονιές του πειράματος το χαμηλότερο WF_{grey} σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, ενώ τα ξηρικά το μεγαλύτερο. Τα δένδρα του αρδεύτηκαν με βάση τη συμβουλή άρδευσης του DSS (IRMA_SYS), καθώς είχαν ελάχιστα μικρότερη παραγωγή από τα αρδευόμενα επέδειξαν παρόμοιο σχεδόν WF_{grey} (Πίνακας 2.9 και Διάγραμμα 2.8). Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι, ενώ η συνολικά εφαρμοζόμενη ποσότητα λιπάσματος το 2021 ήταν μικρότερη από την αντίστοιχη του 2019, το μερίδιο του WF_{grey} στο WF_{total} το 2021 σε όλες τις μεταχειρίσεις είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του 2019. Αυτό συνδέεται με τη συνολικά χαμηλότερη τελική παραγωγή το 2021.

2.6.2.4 Ανάλυση Υδατικού Αποτυπώματος

Το Υδατικό Αποτύπωμα αναλύθηκε σε επίπεδο ελαιώνα για κάθε διαφορετική πρακτική άρδευσης. Σκοπός της ανάλυσης ήταν η αποτύπωση της επίδρασης των διαφορετικών αυτών πρακτικών στους φυσικούς πόρους και συγκεκριμένα στην ποσότητα και ποιότητα των υδατικών αποθεμάτων. Ο υπολογισμός του WF_{total} και των επιμέρους συστατικών του ανέδειξε κάποια σημαντικά σημεία των διαφορετικών αρδευτικών πρακτικών υπογραμμίζοντας τις αδυναμίες αλλά και τα δυνατά τους στοιχεία.

Θα πρέπει στο συγκεκριμένο σημείο να γίνει σαφές ότι από μόνο του το απόλυτο νούμερο του WF_{total} μιας καλλιέργειας δεν προσφέρει σημαντική πληροφορία σχετικά με τη χρήση και τη ρύπανση των υδάτων, αλλά μόνο όταν αναλυθεί στα συστατικά του. Η αποτύπωση της συμμετοχής των επιμέρους συστατικών του (WF_{green} , WF_{blue} και WF_{grey}) στο WF_{total} δίνει αναλυτική και σαφή εικόνα των επιπτώσεων μια καλλιεργητικής διαδικασίας στα υδατικά αποθέματα και τους υδατικούς αποδέκτες, δίνει πληροφορία σχετικά με τη βιωσιμότητα μιας καλλιέργειας και αποτελεί τη βάση για σχεδίαση στρατηγικών με γνώμονα τη μείωση του.

Αρχικά η ανάλυση του Υδατικού Αποτυπώματος υπογράμμισε το γεγονός ότι τα ξηρικά ελαιόδενδρα, όπως όλες οι ξηρικές καλλιέργειες, είναι πιο «ευαίσθητα» στην επίδραση δυσμενών κλιματικών συνθηκών σε σύγκριση με τα αρδευόμενα. Αυτές οι επιδράσεις αντικατοπτρίζονται άμεσα στην τελική παραγωγή. Καθώς η τελική παραγωγή καθορίζει το μέγεθος του αποτυπώματος των καλλιεργητικών πρακτικών που εφαρμόζονται, φτάνουμε στην παράδοση παρατήρηση, μια εξ' ορισμού φιλοπεριβαλλοντική καλλιέργεια να αφήνει μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Οι ξηρικές καλλιέργειες είναι όντως φιλοπεριβαλλοντικές όταν όλες οι συνθήκες είναι ευνοϊκές ώστε να διασφαλίζεται η τελική παραγωγή. Σε δυσμενείς συνθήκες όμως έχουν χαμηλότερη «απόκριση» σε σύγκριση με τις αρδευόμενες.

Με βάση το παραπάνω και αναγνωρίζοντας την αδυναμία των ξηρικών να διασφαλίσουν την τελική τους παραγωγή το βάρος για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτής της πρακτικής «πέφτει» στον τρόπο διαχείρισης των εισροών. Οι ξηρικές καλλιέργειες αξιοποιούν στο μέγιστο το βρόχινο νερό επομένως δε θα μπορούσε να υπάρχει πιο «οικονομική» πρακτική εξοικονόμησης επιφανειακών ή υπόγειων υδάτων. Για να αυξήσουμε την παραγωγικότητα του βρόχινου νερού (μειώνοντας έτσι το WF_{green}) μια πρόταση είναι η αποθήκευσή του ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί τουλάχιστον στα κρίσιμα στάδια της καλλιέργειας και να διασφαλιστεί η παραγωγή. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία υπολογισμού του WF η συλλογή και χρήση του βρόχινου νερού το καθιστά αυτόματα

μπλε νερό, επομένως σε αυτή την περίπτωση τα ξηρικά γίνονται αρδευόμενα, παρόλα αυτά όμως το κέρδος από τη διασφάλιση της παραγωγής και από τη εξοικονόμηση όρων μπλε νερού είναι μεγάλο. Θα πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι στην πλειοψηφία των ξηρικών ελαιώνων η πρόσβαση σε αρδευτικό δίκτυο είναι αδύνατη ούτως ή άλλως επομένως η μονή δυνατότητα αξιοποίησης κάποιας πηγής νερού είναι αυτή του βρόχινου νερού. Θα πρέπει όμως σε αυτή την περίπτωση να μελετηθεί το κόστος συλλογής και διατήρησης του βρόχινου νερού καθώς και το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του αρδευτικού συστήματος και να εκτιμηθεί το Υδατικό Αποτύπωμα της συγκεκριμένης διαδικασίας.

Η αξιοποίηση συστημάτων παροχής συμβουλής άρδευσης (DSS) αποδείχτηκε η πιο αποτελεσματική πρακτική εξοικονόμησης υδάτων. Τα ελαιόδενδρα που αρδεύτηκαν με βάση το σύστημα DSS (IRMA_SYS) είχαν περίπου την ίδια τελική παραγωγή σε σύγκριση με αυτά που αρδεύτηκαν με βάση την εμπειρία του παραγωγού. Παρ' όλα αυτά μόλις την τρίτη χρονιά του πειράματος (2021) τα δένδρα που αρδεύτηκαν με βάση το IRMA_SYS σημείωσαν χαμηλότερο WF_{total} . Αυτό οφείλεται στην καλύτερη προσαρμογή του συστήματος IRMA_SYS στη συγκεκριμένη καλλιέργεια έπειτα από τρία χρόνια εφαρμογής που εξασφάλισε την καλύτερη αξιοποίηση των βροχοπτώσεων. Εδώ θα πρέπει να προσθέσουμε επίσης ότι η αύξηση της παραγωγικότητας του πράσινου νερού (βροχή) σε μία αρδευόμενη καλλιέργεια οδηγεί και στη μείωση του κόστους ενέργειας και εργασίας που συνδέεται με την άρδευση.

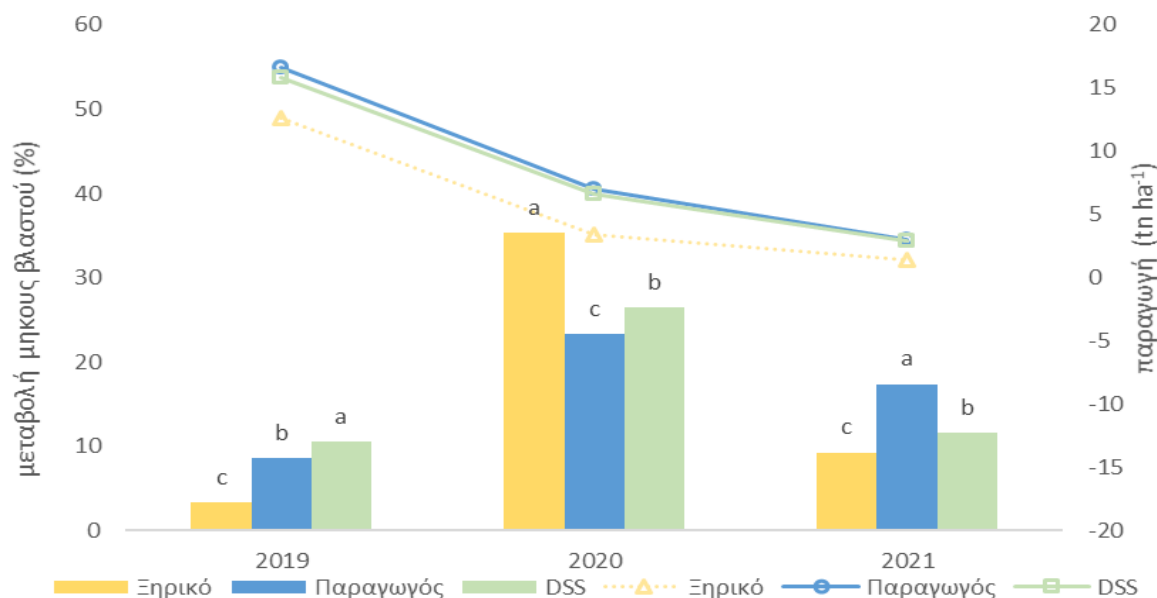
Τα αρδευόμενα ελαιόδενδρα με βάση την εμπειρία του παραγωγού επέδειξαν αρχικά χαμηλότερο WF_{total} λόγω της μεγαλύτερης τελικής παραγωγής. Κοιτάζοντας όμως την ανάλυση του WF_{total} στα επιμέρους συστατικά παρατηρούμε ότι η πρακτική αυτή αξιοποιεί λιγότερο από τις άλλες μεταχειρίσεις το βρόχινο νερό καλύπτοντας το μεγαλύτερο ποσοστό των υδατικών αναγκών της καλλιέργειας με την άρδευση κάτι που είναι ασύμφορο από πλευράς διατήρησης των υδάτινων αποθεμάτων και χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένα άλλο σημείο που ανέδειξε η ανάλυση του WF είναι η επίδραση της τελικής παραγωγής στο αποτύπωμα των καλλιεργητικών πρακτικών. Η χαμηλή τελική παραγωγή μεγενθύνει την επίδραση των αγρονομικών πρακτικών. Έτσι, αν για οποιοδήποτε λόγο μια καλλιέργεια δεν καταφέρει να φτάσει σε μια καλή παραγωγή τότε όλες οι προηγούμενες καλλιεργητικές φροντίδες που έχει δεχθεί (λίπανση, φυτοπροστασία κ.τ.λ.) «κοστίζουν» περιβαλλοντικά περισσότερο. Κάθε υπαίθρια καλλιέργεια ενέχει το ρίσκο των απρόβλεπτων καιρικών συνθηκών. Επομένως είναι δύσκολο να προβλέψει ο παραγωγός από την αρχή την έκβαση ώστε ανάλογα να διαχειριστεί τις εισροές. Οι παραγωγοί στην περιοχή εφαρμόζουν όλη την ποσότητα της λίπανσης τους χειμερινούς μήνες ή νωρίς την άνοιξη έτσι ώστε να εκμεταλλευτούν τις βροχοπτώσεις εκείνης της περιόδου. Αυτή η πρακτική διατρέχει τον κίνδυνο να μην κεφαλαιοποιηθεί στην τελική παραγωγή λόγω δυσχερών κλιματικών συνθηκών, όπως φαινόμενα ξηρασίας που τα τελευταία χρόνια είναι πολύ συχνά. Για να αντιμετωπισθεί αυτός ο κίνδυνος οι παραγωγοί θα έπρεπε να παρέχουν το λίπασμα σταδιακά κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής

περιόδου, που για τις ξηρικές καλλιέργειες μπορεί να μην είναι εφικτό αν δεν υπάρχει δυνατότητα συλλογής και αποθήκευσης έστω του βρόχινου νερού, όμως μπορεί να επιτευχθεί στις αρδευόμενες.

2.6.2.5 Μετρήσεις ανάπτυξης

Οι διάφορες μεταχειρίσεις είχαν και διαφορετική επίδραση στην ανάπτυξη των ελαιόδενδρων. Γενικά τα αρδευόμενα δένδρα (είτε βάσει της εμπειρίας του παραγωγού είτε βάσει της συμβουλής IRMA_SYS) επέδειξαν καλύτερη επίδοση. Στο Διάγραμμα 2.9 φαίνεται η βλαστική ανάπτυξη ανάμεσα στις τρεις μεταχειρίσεις για τα τρία χρόνια του πειράματος. Στο διάγραμμα συμπεριλαμβάνεται και η τελική παραγωγή κάθε μεταχείρισης στο τέλος κάθε πειραματικού έτους. Η ανάπτυξη των βλαστών κατά τη διάρκεια του πρώτου χρόνου ήταν μεγαλύτερη στα δένδρα της DSS μεταχείρισης, ενώ αυτό δεν παρατηρήθηκε τις επόμενες χρονιές. Το δεύτερο χρόνο η βλαστική ανάπτυξη και των τριών μεταχειρίσεων είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της πρώτης χρονιάς γεγονός που μπορεί να συνδέεται με την επένδυση στη βλάστηση παρά την καρποφορία, καθώς ήταν η χρονιά χαμηλής παραγωγής. Τη συγκεκριμένη χρονιά τα ξηρικά επέδειξαν μεγαλύτερη ανάπτυξη βλαστού γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην προηγούμενη χρονιά της χαμηλής παραγωγής. Ακόμα σε αυτή τη χρονιά μεταξύ των αρδευομένων μεταχειρίσεων τα δένδρα της DSS μεταχείρισης επέδειξαν μεγαλύτερη βλαστική ανάπτυξη σε σύγκριση με αυτά της μεταχείρισης όπου η άρδευση πραγματοποιήθηκε με βάση την εμπειρία του παραγωγού. Το 2021 παρατηρήθηκε μικρότερη βλαστική ανάπτυξη παρά την τελική χαμηλή παραγωγή. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στις υψηλές θερμοκρασίες που επικράτησαν τα τέλη της άνοιξης. Τη συγκεκριμένη χρονιά τα αρδευόμενα δένδρα με βάση την εμπειρία του παραγωγού επέδειξαν τη μεγαλύτερη βλαστική ανάπτυξη.



Διάγραμμα 2.9 Βλαστική ανάπτυξη των ελαιόδενδρων (στήλες) των τριών μεταχειρίσεων και συνολική τελική συγκομιδή (γραμμή) για τα τρία χρόνια του πειράματος

2.6.2.6 Μετρήσεις χρωστικών

Στις περισσότερες δειγματοληψίες το καλοκαίρι του 2021 τα φύλλα των δένδρων που αρδεύτηκαν με βάση τη συμβουλή άρδευσης του DSS είχαν μεγαλύτερη συγκέντρωση ολικής χλωροφύλλης αντικατοπτρίζοντας έτσι την καλύτερη φυσιολογική τους κατάσταση (Πίνακας 2.10). Η συγκέντρωση των καροτενοειδών κατά τη διάρκεια των ίδιων δειγματοληψιών δε διέφερε σημαντικά μεταξύ των αρδευόμενων μεταχειρίσεων στις περισσότερες δειγματοληψίες εκτός από την τελευταία. Τα φύλλα των ξηρικών δένδρων είχαν τη χαμηλότερη συγκέντρωση σε ολική χλωροφύλλη και καροτενοειδή παρατήρηση που συνάδει με αντίστοιχα ευρήματα σχετικών εργασιών (Arji et al., 2021, Pliakoni and Nanos, 2011).

Πίνακας 2.10 Μέσοι όροι της συγκέντρωσης ολική χλωροφύλλης και καροτενοειδών στα φύλλα των δένδρων που δέχθηκαν τις διαφορετικές μεταχειρίσεις. (Διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη δείχνουν στατιστικά σημαντικά διαφορά σε $p>0,05$)

Μεταχείριση	Ολική Χλωροφύλλη (mg g ⁻¹)	Καροτενοειδή (mg g ⁻¹)	Ολική Χλωροφύλλη (mg g ⁻¹)	Καροτενοειδή (mg g ⁻¹)	Ολική Χλωροφύλλη (mg g ⁻¹)	Καροτενοειδή (mg g ⁻¹)
	02/07/2021		21/07/2021		26/08/2021	
Ξηρικό	1,57b	0,26b	1,37c	0,28b	1,39c	0,32c
Παραγωγός	1,66b	0,31a	1,76a	0,33a	1,65b	0,34b
DSS	1,71a	0,33a	1,60b	0,33a	1,81a	0,40a

2.6.2.7 Μετρήσεις ολικών φαινολών

Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού του 2021 στα φύλλα των δένδρων και των τριών μεταχειρίσεων το περιεχόμενο των ολικών φαινολών αυξανόταν σταδιακά μέχρι και την τελευταία μέτρηση στα τέλη του Αυγούστου. Μεγαλύτερη αύξηση παρατηρήθηκε στα φύλλα των ξηρικών ελαιόδενδρων, ενώ τη μικρότερη αύξηση επέδειξαν τα δένδρα που αρδεύτηκαν με βάση την εμπειρία του παραγωγού (Πίνακας 2.11). Ως μηχανισμός αντοχής στην ξηρασία, οι φαινόλες τείνουν να αυξάνουν τη συγκέντρωσή τους στα φύλλα των φυτών που υφίστανται υδατική καταπόνηση (Petridis et al., 2012, Naija et al., 2021). Η αυξητική τους τάση μέχρι την τελευταία μέτρηση στις 26/8 δείχνει την αντίστοιχη αύξηση στην υδατική καταπόνηση που υπέστησαν.

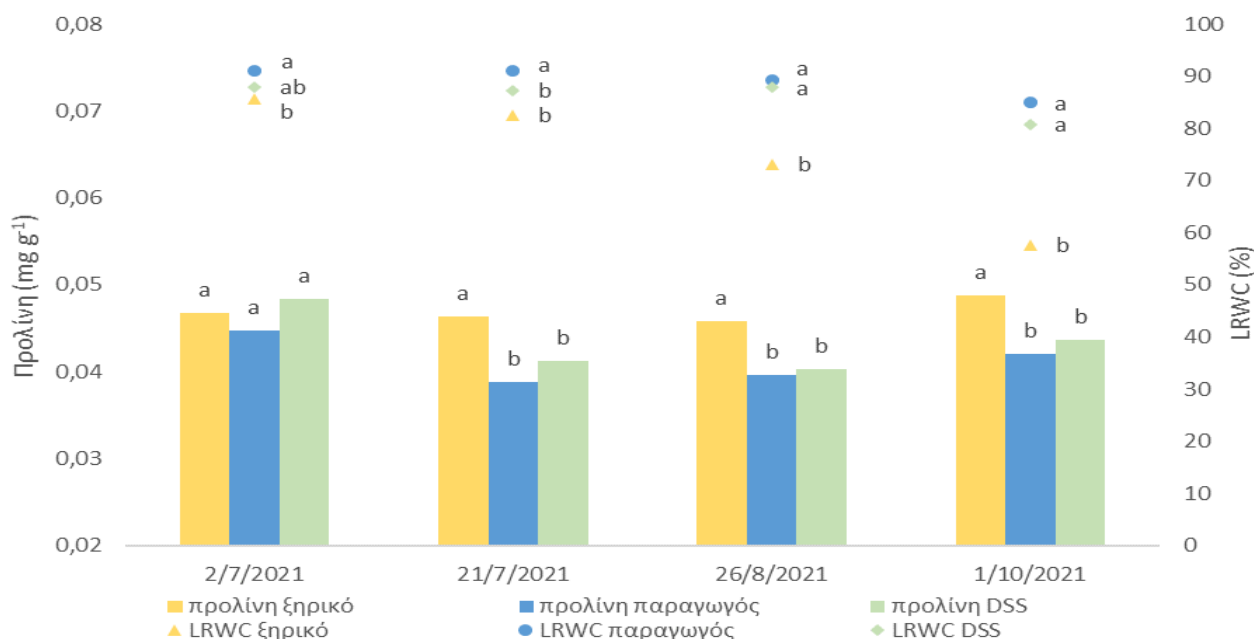
Πίνακας 2.11 Μέσοι όροι της συγκέντρωσης ολικών φαινολών στα φύλλα των δένδρων που δέχθηκαν τις διαφορετικές μεταχειρίσεις. (Διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη δείχνουν στατιστικά σημαντικά διαφορά σε $p>0,05$)

Μεταχείριση	Ολικές φαινόλες (mg g ⁻¹) 2/7/21	Ολικές φαινόλες (mg g ⁻¹) 21/7/21	Ολικές φαινόλες (mg g ⁻¹) 26/8/21
Ξηρικό	23,40a	23,97a	32,91a
Παραγωγός	22,44a	22,24b	27,24c
DSS	23,76a	24,36a	30,15b

2.6.2.8 Μετρήσεις Προλίνης και LRWC

Η συγκέντρωση προλίνης αυξήθηκε σημαντικά στα φύλλα των ξηρικών δένδρων σε όλες τις δειγματοληψίες που έλαβαν χώρα το καλοκαίρι του 2021. Η συσσώρευση προλίνης μαζί με τις χαμηλές τιμές περιεχόμενης υγρασίας φύλλου επιδεικνύουν την υδατική καταπόνηση που υπέστησαν τα ξηρικά δένδρα τη συγκεκριμένη περίοδο (Διάγραμμα 2.10). Από την άλλη πλευρά η συγκέντρωση προλίνης στα φύλλα των δένδρων που αρδεύτηκαν με βάση το DSS δεν ήταν σημαντικά διαφορετική από την αντίστοιχη στα φύλλα των δένδρων που αρδεύτηκαν με βάση την εμπειρία του παραγωγού (Διάγραμμα 2.10). Η αύξηση της συγκέντρωσης της προλίνης είναι ένας ακόμα μηχανισμός αντοχής της ελιάς στην υδατική καταπόνηση μέσω της ωσμορύθμισης (Petridis et al., 2012, Arji et al., 2021).

Η σχετική περιεκτικότητα σε νερό στα φύλλα ήταν πάντα υψηλότερη στα φύλλα των αρδευόμενων δένδρων με βάση την εμπειρία του παραγωγού χωρίς να διαφέρει σημαντικά στις τελευταίες μετρήσεις με αυτή στα φύλλα των δένδρων που αρδεύτηκαν με βάση το DSS. Η αντίστοιχη συγκέντρωση στα φύλλα των ξηρικών ήταν πάντα η μικρότερη μέχρι και την τελευταία μέτρηση που απείχε σημαντικά από τις αρδευόμενες μεταχειρίσεις (Διάγραμμα 2.10).



Διάγραμμα 2.10 Συγκέντρωση προλίνης και σχετική συγκέντρωση υγρασίας (LRWC) στα φύλλα δένδρων των διαφορετικών μεταχειρίσεων. (Διαφορετικά γράμματα δείχνουν στατιστικά σημαντικά διαφορά σε $p > 0,05$)

2.6.2.9 Ποιοτικά χαρακτηριστικά καρπών

Η επίδραση της παρατεταμένης ξηρασίας στους καρπούς των ξηρικών δένδρων ήταν εμφανής στα ποιοτικά χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν (Πίνακας 2.12). Οι καρποί των ξηρικών δένδρων υπολείπονταν στις περισσότερες παραμέτρους που μετρήθηκαν όπως στο μέγεθος, το βάρος και το χρώμα φλοιού. Στις δειγματοληψίες των επόμενων χρόνων (2020-2021) οι καρποί από τα ελαιόδενδρα που αρδεύτηκαν με βάση τη συμβουλή άρδευσης που έδωσε το DSS σημείωσαν καλύτερη επίδοση στα περισσότερα ποιοτικά χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν (Πίνακας 2.12 και Πίνακας 2.13).

2.6.2.9.1 Μέσο βάρος καρπού

Τον πρώτο χρόνο το μέσο βάρος καρπού των ξηρικών υπολείπονταν σημαντικά των άλλων δυο μεταχειρίσεων, καθώς ήταν σχεδόν το μισό από αυτό που σημείωσαν οι καρποί των δένδρων που αρδεύτηκαν με βάση την εμπειρία του παραγωγού. Οι καρποί της DSS μεταχείρισης, ενώ την πρώτη χρονιά τους πειράματος υπολείπονταν κατά 30% του βάρους των αρδευόμενων με βάση την εμπειρία του παραγωγού, τις επόμενες χρονιές υπερείχαν αυτών κατά 10% και 12%, αντίστοιχα, για το 2020 και το 2021 (Πίνακας 2.12).

2.6.2.9.2 Μέσο βάρος πυρήνα

Ανάλογα ήταν και τα αποτελέσματα των καρπών για το μέσο βάρος πυρήνα. Οι καρποί των ξηρικών δένδρων υπολείπονται των αρδευόμενων σε βάρος πυρήνα και τις τρεις χρονιές του πειράματος. Μεγαλύτερο μέσο βάρος πυρήνα επιδεικνύουν οι καρποί των δένδρων που αρδεύτηκαν με βάση το DSS τα δυο τελευταία χρόνια του πειράματος (Πίνακας 2.12).

2.6.2.9.3 Αναλογία σάρκας/πυρήνα

Την πρώτη χρονιά του πειράματος οι καρποί των δένδρων που αρδεύτηκαν με βάση την εμπειρία του παραγωγού είχαν μεγαλύτερη αναλογία σάρκας/πυρήνα σε σύγκριση με τους καρπούς των άλλων δυο μεταχειρίσεων. Αυτή η σχέση διατηρήθηκε και την επόμενη χρονιά, το 2021 όμως τα ξηρικά δένδρα παρήγαγαν καρπούς με μεγαλύτερη αναλογία σάρκας/πυρήνα (Πίνακας 2.12). Αυτό μπορεί να σχετίζεται με τη μικρότερη παραγωγή των ξηρικών δένδρων την τελευταία χρονιά (Πίνακας 2.4).

2.6.2.9.4 Σκληρότητα σάρκας καρπού

Οι καρποί που αρδεύτηκαν με βάση το DSS επέδειξαν μεγαλύτερη σκληρότητα σάρκας καρπού τις δυο τελευταίες χρονιές του πειράματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα δυο τελευταία χρόνια του πειράματος η σκληρότητα σάρκας ήταν πολύ μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη της πρώτης χρονιάς σε όλες τις μεταχειρίσεις (Πίνακας 2.12). Αυτό πιθανώς συνδέεται με το γεγονός ότι εκείνες τις χρονιές η συκομιδή πραγματοποιήθηκε αμέσως μετά από δυνατές βροχοπτώσεις.

2.6.2.9.5 Ξηρό βάρος σάρκας

Η αναλογία ξηρό προς νωπό βάρος σάρκας και τις τρεις χρονιές του πειράματος ήταν μεγαλύτερη στους καρπούς των ξηρικών δένδρων. Ακολούθησαν οι καρποί των αρδευόμενων με βάση το DSS δένδρων, ενώ οι καρποί που αρδεύτηκαν με βάση την εμπειρία του παραγωγού σημείωσαν τη χαμηλότερη αναλογία (Πίνακας 2.12).

2.6.2.9.6 Αναλογία μήκους/πλάτος καρπού

Η αναλογία μήκους/πλάτος καρπού τον πρώτο χρόνο ήταν μεγαλύτερη στους καρπούς των ξηρικών δένδρων, το δεύτερο χρόνο στους καρπούς των αρδευόμενων με βάση το DSS χωρίς όμως να διαφέρει στατιστικά σημαντικά από αυτή των ξηρικών, ενώ τον τρίτο χρόνο δεν υπήρχε διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων (Πίνακας 2.12).

Πίνακας 2.12 Ποιοτικά χαρακτηριστικά που αφορούν το μέγεθος των καρπών, τη σκληρότητα και το σχήμα τους για τις τρεις μεταχειρίσεις τα τρία χρόνια του πειράματος. (Διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη δείχνουν στατιστικά σημαντικά διαφορά σε $p>0,05$)

	Μεταχείριση	Βάρος καρπού (g)	Βάρος πυρήνα (g)	Σάρκα /πυρήνα	Σκληρότητα σάρκας (kg)	Ξηρό/Νωπό (%)	Μήκος καρπού (mm)	Πλάτος καρπού (mm)	Μήκος/Πλάτος καρπού
2019	Ξηρικό	3,35c	0,80b	4,18c	6,02a	36,60a	12,01c	7,31c	1,67a
	Παραγωγός	7,06a	1,05a	6,78a	6,20a	25,70c	17,98b	12,78b	1,41b
	DSS	5,50b	1,03a	5,31b	5,35b	29,08b	24,73a	20,30a	1,22c
2020	Ξηρικό	6,31c	0,85c	7,48c	2,87a	28,73a	25,45c	20,83b	1,22ab
	Παραγωγός	8,98b	1,07b	8,44a	2,07c	25,98b	28,88b	24,35a	1,19b
	DSS	9,93a	1,24a	8,02b	2,40b	28,40a	30,50a	24,23a	1,26a
2021	Ξηρικό	9,37b	1,03b	9,13a	0,45c	32,55a	28,97b	24,15b	1,20a
	Παραγωγός	9,37b	1,03b	9,07a	0,68b	27,40b	28,43b	24,00b	1,19a
	DSS	10,57a	1,26a	8,41b	0,84a	31,52a	30,08a	25,08a	1,20a

2.6.2.9.7 Χρώμα φλοιού

Το 2021 οι καρποί από όλες τις μεταχειρίσεις είχαν λιγότερο πράσινο χρώμα σε σχέση με τις άλλες χρονιές και αυξημένη ωριμότητα πιθανώς λόγω χαμηλής καρποφορίας. Οι καρποί από τα ξηρικά και τα DSS ήταν λιγότερο πράσινοι σε σύγκριση με αυτούς που αρδεύτηκαν με βάση την εμπειρία του παραγωγού (Πίνακας 2.13).

Πίνακας 2.13 Χρώμα φλοιού καρπών των διαφορετικών μεταχειρίσεων για τα τρία χρόνια του πειράματος (Διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη δείχνουν στατιστικά σημαντικά διαφορά σε $p>0,05$)

	Μεταχείριση	L*	a*	b*	Chroma	Hue
2019	Ξηρικό	56,03b	-16,97b	27,37b	33,07b	118,85
	Παραγωγός	58,17a	-18,76a	33,67a	38,53a	119,15
	DSS	57,75a	-18,68a	33,60a	38,47a	119,12
2020	Ξηρικό	55,63b	-18,48	33,23b	38,00b	119,10a
	Παραγωγός	57,13a	-18,52	35,10a	39,70a	117,80b
	DSS	55,73b	-17,88	32,33b	36,95c	118,98a
2021	Ξηρικό	35,27	3,98a	8,37b	10,03b	241,33a
	Παραγωγός	35,89	1,54b	10,69a	11,28a	188,83b
	DSS	35,60	5,41a	7,01c	8,80c	229,00a

Η παράμετρος L^* (φωτεινότητα) χρώματος φλοιού την πρώτη χρονιά σημείωσε (2019) τη μεγαλύτερη τιμή στους καρπούς των δένδρων που αρδεύτηκαν με βάση την εμπειρία του παραγωγού χωρίς όμως να διαφοροποιείται στατιστικά από την αντίστοιχη τιμή των καρπών των δένδρων που αρδεύτηκαν με βάση το DSS. Τη δεύτερη χρονιά του πειράματος εξακολούθησε να προηγείται η συγκεκριμένη μεταχείριση του παραγωγού, ενώ την τρίτη χρονιά οι τιμές της L^* δεν διαφοροποιήθηκαν μεταξύ των μεταχειρίσεων και ήταν χαμηλότερες συγκριτικά με τις προηγούμενες χρονιές (Πίνακας 2.13). Την τελευταία χρονιά η συγκομιδή καθυστέρησε (25/10) και οι καρποί είχαν ήδη αρχίσει να μαυρίζουν (Εικόνα 2.13).

Τις πρώτες δυο χρονιές ο φλοιός των καρπών όλων των μεταχειρίσεων ήταν περισσότερο πράσινος από την τρίτη όπως δείχνει η τιμή της παραμέτρου a^* (Πίνακας 2.13). Την πρώτη χρονιά οι αρδευόμενες μεταχειρίσεις σημείωσαν μεγαλύτερη τιμή a^* χρώματος φλοιού σε σύγκριση με την ξηρική, ενώ τις επόμενες χρονιές δεν υπήρχε διαφοροποίηση στην παράμετρο a^* χρώματος φλοιού μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Η παράμετρος b^* χρώματος φλοιού την τρίτη χρονιά ήταν πολύ χαμηλότερη σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τις προηγούμενες δυο χρονιές. Την πρώτη χρονιά οι καρποί των αρδευόμενων μεταχειρίσεων σημείωσαν υψηλότερη τιμή σε σύγκριση με την ξηρική, τις επόμενες χρονιές όμως η αρδευόμενη με βάση την εμπειρία του παραγωγού μεταχείριση παρήγαγε καρπούς με τη μεγαλύτερη τιμή b^* (Πίνακας 2.13).

Τον πρώτο χρόνο ο φλοιός των καρπών των αρδευόμενων μεταχειρίσεων είχε πιο καθαρό χρώμα σε σύγκριση με το αντίστοιχο των ξηρικών, καθώς η παράμετρος chroma είχε μεγαλύτερη τιμή. Τις επόμενες δυο χρονιές οι καρποί των αρδευόμενων με βάση την εμπειρία του παραγωγού δένδρων σημείωσαν το πιο καθαρό χρώμα ανάμεσα στις μεταχειρίσεις, ενώ ακολουθούν οι καρποί των ξηρικών (Πίνακας 2.13). Παρατηρούμε και σε αυτή την περίπτωση ότι οι τιμές της παραμέτρου την τρίτη χρονιά οπότε και οι καρποί συγκομίστηκαν αργά (στο στάδιο του μαυρίσματος) είναι πολύ χαμηλότερες σε σύγκριση με αυτών των προηγούμενων δυο ετών.

Η παράμετρος Hue, που αναφέρεται στη χρωματική απόχρωση του φλοιού των καρπών, τις πρώτες δυο χρονιές και στις τρεις μεταχειρίσεις σημείωσε τιμές πιο κοντά στις 180° (πράσινο) σε αντίθεση με την τρίτη χρονιά που οι αντίστοιχες τιμές της ξηρικής αλλά και της αρδευόμενης με βάση το DSS μεταχείρισης πλησίαζαν το μπλε (270°) και μόνο ο φλοιός των καρπών των αρδευόμενων με βάση την εμπειρία του παραγωγού δένδρων διατηρούσε πράσινο χρώμα ($188,83^\circ$) (Πίνακας 2.13).

2.6.3 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αξιοποιήθηκε η ανάλυση του Υδατικού Αποτυπώματος σε συνδυασμό με τον προσδιορισμό της ανάπτυξης και της φυσιολογικής κατάστασης ελαιόδενδρων, καθώς και των ποιοτικών χαρακτηριστικών των καρπών τους ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση τριών διαφορετικών πρακτικών άρδευσης (της ξηρικής καλλιέργειας, της άρδευσης με βάση την εμπειρία του παραγωγού και της ορθολογικής άρδευσης με βάση το σύστημα παροχής συμβουλών άρδευσης) στην αποτελεσματικότητα, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα καθώς και τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας.

Παρόλο που η ξηρική καλλιέργεια αναμένεται να είναι μια σημαντική πρακτική εξοικονόμησης νερού, η επανάπαυση στο κλίμα που είναι ούτως ή άλλως ανασφαλής παράγοντας περιορίζει τις δυνατότητες της. Η άμεση εξάρτηση από τις μετεωρολογικές συνθήκες αποτυπώνεται όχι μόνο στην τελική παραγωγή αλλά και στην ανάπτυξη, τη φυσιολογική κατάσταση, καθώς και την ποιότητα των παραγόμενων καρπών. Μια ξηρική καλλιέργεια εμπλουτισμένη με στοχευμένες αρδεύσεις όποτε είναι δυνατό και σε όλα τα κρίσιμα στάδια μιας καλλιέργειας θα μπορούσε να «δικαιολογήσει» τις αγρονομικές πρακτικές που εφαρμόζονται και φυσικά να διασφαλίσει την τελική παραγωγή με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Από την άλλη πλευρά η άρδευση με βάση την εμπειρία του παραγωγού και όχι με βάση τις πραγματικές ανάγκες του φυτού οδηγεί σε πολλές περιπτώσεις σε υπεράρδευση και εξάντληση των φυσικών πόρων οι οποίοι δεν είναι απεριόριστοι, εντείνοντας με αυτό τον τρόπο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η άρδευση με βάση τις ανάγκες της καλλιέργειας αποδείχτηκε ως η πιο αποτελεσματική και φιλοπεριβαλλοντική πρακτική. Η άρδευση με βάση τη συμβουλή DSS είχε κατά μέσο όρο το χαμηλότερο WF_{total} ανάμεσα σε όλες τις μεταχειρίσεις χωρίς να υπολείπεται και σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα να υπερέχει στην ανάπτυξη του δένδρου, τη φυσιολογική κατάστασή του ή την ποιότητα των παραγόμενων καρπών. Τα δένδρα που αρδεύτηκαν με βάση την εμπειρία του παραγωγού σημείωσαν μεγαλύτερη παραγωγή έστω και οριακά σε σύγκριση με τα δένδρα που αρδεύτηκαν με βάση τη συμβουλή του DSS. Αυτό επιτεύχθηκε με την εφαρμογή μεγαλύτερης ποσότητας νερού. Τις τρεις χρονιές που διήρκεσε το πείραμα (2019-2021), τα αρδευόμενα με βάση την εμπειρία του παραγωγού δένδρα δέχτηκαν κατά μέσο όρο 77% περισσότερο νερό σε σύγκριση με τα αρδευόμενα με βάση τη συμβουλή άρδευσης DSS (370 vs 207 mm) για να καταλήξουν σε μια παραγωγή κατά μέσο όρο 5% μεγαλύτερη από αυτή των DSS δένδρων (8,90 vs 8,47 t ha⁻¹). Η εφαρμογή της άρδευσης δεν εμπεριέχει μόνο το κόστος της κατανάλωσης φυσικών πόρων, δηλαδή του νερού, αλλά και το κόστος που αφορά τη δαπάνη ενέργειας για τη μεταφορά του νερού στον αγρό αλλά και τα μεταφορικά για να μεταβεί ο παραγωγός στον αγρό ώστε να πραγματοποιηθεί η άρδευση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το κόστος σε φυσικούς πόρους και ενέργεια για την εφαρμογή επιπλέον ποσότητας άρδευσης προφανώς δεν αντισταθμίζεται από το τελικά συγκομιζόμενο προϊόν.

Προσεκτικά σχεδιασμένες στρατηγικές αποτελεσματικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων μπορούν να διασφαλίσουν τη βιωσιμότητα της αγροτικής παραγωγής χωρίς να υπάρχει συμβιβασμός στην ποσότητα ή την ποιότητα των τελικών προϊόντων.

3 Κεφάλαιο 3^ο: Ανάλυση Κύκλου Ζωής καλλιέργειας ελιάς στη Βορειοδυτική Ελλάδα: Από την ξηρική στη συμβατικά αρδευόμενη και στην αρδευόμενη μέσω πρακτικών ευφυούς γεωργίας

3.1 Περίληψη

Η ελαιοκαλλιέργεια επεκτείνεται ταχέως στη βορειοδυτική Ελλάδα, καθώς εγκαθίστανται νέοι ελαιώνες είτε ξηρικοί είτε αρδευόμενοι. Η άρδευση μπορεί να αποφέρει μεγαλύτερες οικονομικές απολαβές μέσω της αυξημένης παραγωγής, ωστόσο οι αντισταθμίσεις στο πλέγμα νερό-ενέργεια-ρύπανση παραμένει ένα αμφιλεγόμενο θέμα. Η παρούσα ενότητα εργασίας παρουσιάζει μια περιβαλλοντική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ) – Life Cycle Assessment (LCA) συστημάτων ελαιοκαλλιέργειας στην πεδιάδα της Άρτας στην Ήπειρο, συγκρίνοντας τρεις διαφορετικές αρδευτικές πρακτικές της περιοχής: την ξηρική (βάση αναφοράς), την άρδευση με βάση την εμπειρία του παραγωγού (συμβατική άρδευση) και την άρδευση με βάση τη συμβουλή άρδευσης που παρέχει το σύστημα υποστήριξης αποφάσεων άρδευσης (DSS) που λειτουργεί στην περιοχή. Η παρούσα εργασία έχει τις ακόλουθες συνεισφορές: πρώτον παρέχει μια πρώτη ποσοτική ένδειξη της περιβαλλοντικής επίδοσης των ελληνικών συστημάτων ελαιοκαλλιέργειας υπό διαφορετικές αρδευτικές πρακτικές. Δεύτερον, αναλύει τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από την εφαρμογή DSS για άρδευση στην Ελλάδα και τη Μεσόγειο. Δεκαοκτώ επιπτώσεις ενδιάμεσου σημείου (π.χ. κλιματική αλλαγή, έλλειψη νερού, οξίνιση, ευτροφισμός υδάτων κτλ.), δυο κατηγορίες επιπτώσεων τελικού σημείου (ζημιά στην ανθρώπινη υγεία και στην ποιότητα του οικοσυστήματος) και ένα ενιαίο αποτέλεσμα (συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις) υπολογίστηκαν με τη μέθοδο εκτίμησης επιπτώσεων κύκλου ζωής IMPACT World+ χρησιμοποιώντας το λογισμικό OpenLCA v1.10.3. Ορίστηκαν δυο λειτουργικές μονάδες, ο ένας τόνος παραγόμενου προϊόντος και το ένα εκτάριο καλλιεργήσιμης γης ενώ τα όρια του συστήματος καθορίστηκαν εντός των ορίων ελαιώνα (from cradle-to-farm gate). Οι πρακτικές που περιελάμβαναν άρδευση, είχαν τις χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος, καθώς επέδειξαν υψηλότερη παραγωγή σε σύγκριση με τα ξηρικά αλλά σε επίπεδο καλλιεργήσιμης έκτασης επέδειξαν τις υψηλότερες επιπτώσεις. Η «έξυπνη» άρδευση με τη βοήθεια του DSS μείωσε τη χρήση νερού και ενέργειας κατά 42,1% σε σύγκριση με τη συμβατική άρδευση (με βάση την εμπειρία του παραγωγού). Αυτό μεταφράζεται σε μια μείωση των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων της τάξης του 5,3% για κάθε τόνο παραγόμενου προϊόντος και 10,4% για κάθε εκτάριο καλλιεργήσιμης έκτασης. Πραγματοποιήθηκε επίσης μια ανάλυση ευαισθησίας η οποία έδειξε ότι τα οφέλη θα μπορούσαν να αυξηθούν μέχρι και 18% για κάθε τόνο παραγόμενου προϊόντος και 22,6% για κάθε εκτάριο καλλιεργήσιμης γης. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας ενισχύουν την επιλογή των DSS ως υποσχόμενα εργαλεία για την υποστήριξη της βιώσιμης εντατικοποίησης των καλλιεργητικών συστημάτων στην πεδιάδα της Άρτας.

3.2 Εισαγωγή

Η ελιά (*Olea europaea* L.) είναι τυπική μεσογειακή καλλιέργεια με μεγάλη κοινωνικο-οικονομική σημασία (Bernardi et al., 2018). Στην Ελλάδα, την τρίτη ελαιοπαραγωγό χώρα στον κόσμο μετά την Ισπανία και την Ιταλία, η ελαιοκαλλιέργεια αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές αγροτικές δραστηριότητες από οικονομικής, κοινωνικής και οικολογικής πλευράς (Michalopoulos et al., 2020). Στη χώρα καλλιεργούνται περίπου ένα εκατομμύριο εκτάρια ελαιώνων και παράγεται το 17% της

παγκόσμιας παραγωγής ελαιοκάρπου. Σε ό,τι αφορά τις επιτραπέζιες ελιές, η Ελλάδα παράγει πάνω από 200.000 τόνους ετησίως που αποτελούν το 25% και το 7% της ευρωπαϊκής και παγκόσμιας παραγωγής, αντίστοιχα (IOOC, 2020). Στην πεδιάδα της Άρτας (Ηπειρος, Ελλάδα) οι ελαιώνες αποτελούν το 12% της συνολικής και το 22% της αρδευόμενης καλλιεργήσιμης έκτασης της περιοχής (Tsirogiannis et al., 2015), ενώ παράγεται (και εξάγεται) πάνω από το 8% της συνολικής επιτραπέζιας ελιάς στην Ελλάδα.

Παρόλο που η ελιά είναι καλά προσαρμοσμένη στο μεσογειακό κλίμα, η κλιματική αλλαγή και οι νέες προκλήσεις που αυτή συνεπάγεται απειλούν την παραδοσιακή ξηρική καλλιέργειά της (Fraga et al., 2021). Στο μέλλον στην περιοχή της Μεσογείου, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, ο τύπος αυτός καλλιέργειας δε θα μπορεί να είναι οικονομικά εφικτός και όπου το νερό είναι διαθέσιμο θα αντικατασταθεί από την αρδευόμενη (Tanasijevic et al., 2014). Επιπλέον η εφαρμογή της άρδευσης μπορεί να υποστηρίξει την εντατικοποίηση της παραγωγής που λαμβάνει χώρα τα τελευταία χρόνια. Η άρδευση είναι μια πολύ σημαντική αγρονομική πρακτική για την ελαιοκαλλιέργεια, καθώς όχι μόνο επηρεάζει την τελική παραγωγή και το μέγεθος των καρπών αλλά και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της επιτραπέζιας ελιάς (Nanos et al., 2008).

Οι τρέχουσες κλιματικές αλλαγές, καθώς και τα μελλοντικά κλιματικά σενάρια, δείχνουν ότι η πίεση στα παγκόσμια αποθέματα νερού θα αυξηθεί και υπαγορεύουν εξειδικευμένη καθοδήγηση για την ορθολογική εφαρμογή της άρδευσης. Οι αγρονομικές πρακτικές στις αναπτυγμένες χώρες βασίζονται γενικά στην εμπειρία των παραγωγών καταλήγοντας έτσι σε υπεράρδευση και υπερλίπανση (Berbel & Martínez-Dalmau, 2021). Η ανισορροπία στην παροχή και τη ζήτηση του νερού μπορεί να επιτείνει τη χρήση και εξάντληση των υδάτινων πόρων οδηγώντας στη μη βιώσιμη εκμετάλλευσή τους. Παράλληλα, καθώς απαιτείται επιπλέον ενέργεια για τη μεταφορά του νερού στις καλλιέργειες (Belaud et al., 2020), αλλά και για την παραγωγή και μεταφορά των λιπασμάτων (Amenumey & Carpel, 2014) οι επικρατούσες αγρονομικές πρακτικές έχουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων ή της υψηλότερης χρήσης ορυκτής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού (Pradeleix et al., 2015). Οι υπερεντατικές γεωργικές εκμεταλλεύσεις και οι κακές πρακτικές συνεισφέρουν στην υποβάθμιση (ποιοτικά και ποσοτικά) των υδάτων, στην εξάτμιση της αμμωνίας (ammonia volatilization), και στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου προκαλώντας πολλαπλή περιβαλλοντική επιβάρυνση (Xu et al., 2020).

Τις τελευταίες δεκαετίες η εφαρμογή της έξυπνης γεωργίας περιγράφεται επανειλημμένα ως πανάκεια για τη βιώσιμη αγροτική παραγωγή (Lieder & Schröter-Schlaack, 2021). Για την εφαρμογή της έχουν προταθεί και αναπτυχθεί μια ποικιλία αισθητήρων και συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων σχετικά με την άρδευση (Decision Support Systems-DSS) που υπόσχονται αύξηση αποτελεσματικότητας όσον αφορά τη χρήση του νερού άρδευσης και των λιπασμάτων (Montesano et al., 2018, Majsztrik et al., 2013). Ωστόσο μόνο μια ολοκληρωμένη ανάλυση όλων των σταδίων του κύκλου ζωής ενός προϊόντος μπορεί να επιβεβαιώσει τα πλεονεκτήματα αυτής της καινοτομίας (Mirabella et al., 2014).

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής – AKZ, (Life Cycle Assessment - LCA), έχει προσελκύσει αυξημένη προσοχή τα τελευταία χρόνια για την τεκμηρίωση και την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος. Ο ελαιοκομικός τομέας έχει ευρέως μελετηθεί μέσω της προσέγγισης της LCA όπως παρουσιάζεται στην ανασκόπηση των Espadas-Aldana et al. (2019). Τελευταία η LCA εφαρμόστηκε από τους Fernández-Lobato et al. (2021) για να συγκρίνουν παραδοσιακές ξηρικές, παραδοσιακά αρδευόμενες και εντατικά αρδευόμενες ελιές στην Ισπανία, συμπεριλαμβάνοντας και

τη φάση μεταποίησης. Οι Maffia et al. (2020) εκτίμησαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής ελαιολάδου σε μια περιοχή της Καμπανίας στην Ιταλία συγκρίνοντας έξι συστήματα παραγωγής λαδιού (δυο οργανικά, δυο ολοκληρωμένης γεωργίας, και δυο ερασιτεχνικά οργανικά). Οι Ben Abdallah et al. (2021) χρησιμοποιώντας την LCA συγκρίνοντας παραδοσιακά, εντατικά και υπερεντατικά συστήματα συμβατικής και βιολογικής πρακτικής σε ελαιώνες στην Τυνησία.

Ωστόσο πολύ λίγες μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει την LCA για να κάνουν άμεση σύνδεση της «έξυπνης» γεωργίας με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Lieder & Schröter-Schlaack, 2021). Για παράδειγμα οι Mehmeti et al. (2016) πραγματοποίησαν μια ανάλυση οικολογικής απόδοσης για ένα εργαλείο πραγματικού χρόνου διαχείρισης της άρδευσης για περισσότερο ακριβείς εισροές στον αγρό σε ένα μεγάλο αρδευτικό έργο. Οι Balafoutis et al. (2017) ανέλυσαν διαφορετικούς βαθμούς εφαρμογών άρδευσης και λίπανσης σε καλλιέργεια αμπέλου, αλλά η LCA εστίασε μόνο στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Οι Meza-Palacios et al. (2020) προτείνανε ένα DSS για την ορθολογική λίπανση και χρησιμοποίησαν την LCA για να ποσοτικοποιήσουν την περιβαλλοντική του συνεισφορά στην καλλιέργεια ζαχαρότευτλων. Οι Vatsanidou et al. (2020) χρησιμοποίησαν την LCA για να αναλύσουν διαφορετικά συστήματα αζωτούχου λίπανσης σε έναν οπωρώνα αχλαδιών στην Ελλάδα. Πρόσφατα, οι Vacenetti et al. (2020) πραγματοποίησαν LCA για να αξιολογήσουν διάφορα επίπεδα αζωτούχου λίπανσης σε συμβατική και ευφυή (έξυπνη εφαρμογή σε συνδυασμό με δορυφορικά δεδομένα) καλλιέργεια ρυζιού. Η ανάγκη για εφαρμογή περαιτέρω μελετών LCA στις νέες τεχνολογίες είναι προφανές ότι θα επιβεβαιώσει τα οφέλη τους χρησιμοποιώντας την καλύτερη διαθέσιμη γνώση και εμπειρία.

Στην παρούσα ενότητα εργασίας παρουσιάζεται μια περιβαλλοντική LCA σε ξηρικούς και αρδευόμενους ελαιώνες στην πεδιάδα της Άρτας. Αναλύθηκαν επομένως τρεις διαφορετικές πρακτικές άρδευσης της περιοχής: α) η ξηρική καλλιέργεια κατά την οποία δεν εφαρμόστηκε καθόλου άρδευση β) η συμβατική άρδευση που βασίστηκε στην αντίληψη του παραγωγού για τις ανάγκες της καλλιέργειας, και γ) άρδευση με βάση τη συμβουλή άρδευσης που παρέχει το σύστημα υποστήριξης αποφάσεων άρδευσης (DSS) που λειτουργεί στην περιοχή.

Τα κυρίαρχα ερωτήματα της έρευνας ήταν πρώτον εάν η παραγωγή επιτραπέζιας ελιάς σε αρδευόμενα συστήματα οδηγεί σε υψηλότερες ή χαμηλότερες επιπτώσεις σε σύγκριση με τα ξηρικά συστήματα και δεύτερον εάν και σε ποιο βαθμό η «έξυπνη» άρδευση μπορεί να συνεισφέρει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η κύρια συνεισφορά της εργασίας έγκειται στη διεύρυνση της περιορισμένης υπάρχουσας γνώσης της LCA απόδοσης της ελαιοκαλλιέργειας στην Ελλάδα (Tsarouhas et al., 2015, Russo et al., 2016). Τα αποτελέσματα παρέχουν μια ποσοτική πληροφόρηση σχετικά με την περιβαλλοντική επίδοση του κύκλου ζωής των ελληνικών ελαιώνων και επιστημονική υποστήριξη σχετικά με τα περιβαλλοντικά οφέλη της ορθολογικής διαχείρισης της άρδευσης των καλλιεργειών. Επιπρόσθετα, η εργασία αποτελεί μια χρήσιμη βάση αναφοράς της υπάρχουσας κατάστασης σχετικά με την LCA επίδοση της ελαιοκαλλιέργειας στην Ελλάδα και τη Μεσόγειο.

3.3 Υλικά και μέθοδοι

3.3.1 Περιοχή μελέτης

Η πεδιάδα της Άρτας (Εικόνα 3.1) βρίσκεται στην βορειοδυτική πλευρά της Ελλάδας, στην περιφέρεια Ηπείρου και καλύπτει συνολική έκταση 45000 ha (Tsirogiannis et al., 2015). Το κλίμα στην περιοχή είναι

τυπικό μεσογειακό και χαρακτηρίζεται από ζεστά καλοκαίρια και βροχερούς ήπιους χειμώνες. Η μέση βροχόπτωση είναι περίπου 1100 mm (EMY, 2022) και συγκεντρώνεται κυρίως στους χειμερινούς μήνες καθιστώντας την άρδευση αναγκαία κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Δυο μεγάλοι ποταμοί διασχίζουν την πεδιάδα, ο Άραχθος και ο Λούρος, οι οποίοι αποτελούν τις κύριες πηγές νερού και άρδευσης.



Εικόνα 3.1 Χάρτης της Ελλάδας, της περιφέρειας Ηπείρου και της πεδιάδας της Άρτας στη Νοτιοδυτική Ελλάδα

Οι επικρατούσες καλλιέργειες στην περιοχή είναι τα εσπεριδοειδή, οι ελιές και τα ακτινίδια, καθώς και κάποιες αροτραίες καλλιέργειες. Οι ελαιώνες καταλαμβάνουν περίπου 5500 ha από τα οποία το 30% είναι αρδευόμενα (Tsirogiannis et al., 2015). Οι εκτάσεις επιτραπέζιας ελιάς καταλαμβάνουν 3200 ha. Η μέση πυκνότητα φύτευσης είναι 250 δένδρα ha^{-1} . Οι κύριες εισροές κατά τη διάρκεια ζωής της ελιάς αφορούν την κατανάλωση ενέργειας (ηλεκτρισμός και καύσιμα), την κατανάλωση νερού και τη χρήση χημικών προϊόντων (φυτοπροστατευτικά και λιπάσματα). Η λίπανση εφαρμόζεται αρχές του χρόνου (Ιανουάριος-Μάρτιος) και στις ξηρικές αλλά και τις αρδευόμενες καλλιέργειες. Η φυτοπροστασία εφαρμόζεται από τα τέλη της άνοιξης μέχρι τον Σεπτέμβρη για τον έλεγχο του πυρηνοτρήτη (*Prays oleae*) και το δάκου (*Dacus oleae*), καθώς και του κυκλοκόνιου (*Spilocaea oleagina*). Η ζιζανιοκτονία πραγματοποιείται κυρίως με μηχανικά μέσα (καταστροφές) και λιγότερο με χημικά. Πολλές από τις ελιές στην περιοχή είναι ξηρικές, αλλά ένα σημαντικό κομμάτι είναι αρδευόμενες. Οι μέσες υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας όπως έχουν υπολογιστεί με τη βοήθεια του εργαλείου του FAO, CropWAT (Smith, 1992) είναι περίπου 500 mm κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου, ενώ η αποτελεσματική βροχόπτωση την αντίστοιχη περίοδο είναι μικρότερη από 300 mm. Η μέση ποσότητα άρδευσης σε επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς ελαιώνες της περιοχής στη Γραμμενίτσα της Άρτας (39.184 °N, 20.981 °E) είναι 318,5 mm ανά έτος, ενώ η αντίστοιχη μέση εφαρμοζόμενη ποσότητα όπως προκύπτει από συνεντεύξεις, είναι περίπου 400 mm ανά έτος (EMY, 2022). Τα κλιματικά δεδομένα της μελέτης δίνονται στον Πίνακα 3.1

Πίνακας 3.1 Κλιματικά δεδομένα της περιοχής μελέτης (ΕΜΥ, 2022)

Μήνας	Βροχό- πτωση	Βροχε- ρές ημέρες	Min Θερμο κρασία	Max Θερμο κρασία	Μέση Θερμο κρασία	Σχετική Υγρασία	Ηλιοφά νεια	Ταχύτητα ανέμου (2 m)	ET _o
	mm	ημέρες	°C	°C	°C	%	%	m/s	mm/d
Ιαν	131	12,7	3,5	11,9	7,7	73,2	48,4	1	0,9
Φεβ	130	12,2	4,1	13,1	8,6	71,8	49,7	1,1	1,3
Μαρ	92	11,1	5,9	15,8	10,8	69,3	53,4	1	2
Απρ	74	10,9	8,7	19,4	14	68,3	57,5	1	2,9
Μαι	50	8,8	12,6	24,1	18,3	65	66,1	0,9	3,9
Ιουν	24	5,3	15,6	28,2	21,9	60,2	76,7	0,8	4,9
Ιουλ	14	3,5	18	31,1	24,5	56,9	86,8	0,8	5,4
Αυγ	18	3,5	18,1	31,1	24,6	57,7	84,4	0,8	4,9
Σεπ	44	5	15,6	28,3	21,9	62,9	75,8	0,8	3,6
Οκτ	115	9,6	11,8	21,7	16,7	68,6	62,4	0,8	2,1
Νοε	169	12,6	8	17,2	12,6	75,4	51,2	0,7	1,1
Δεκ	179	13,9	4,9	13,1	9	75,8	44,8	0,9	0,8

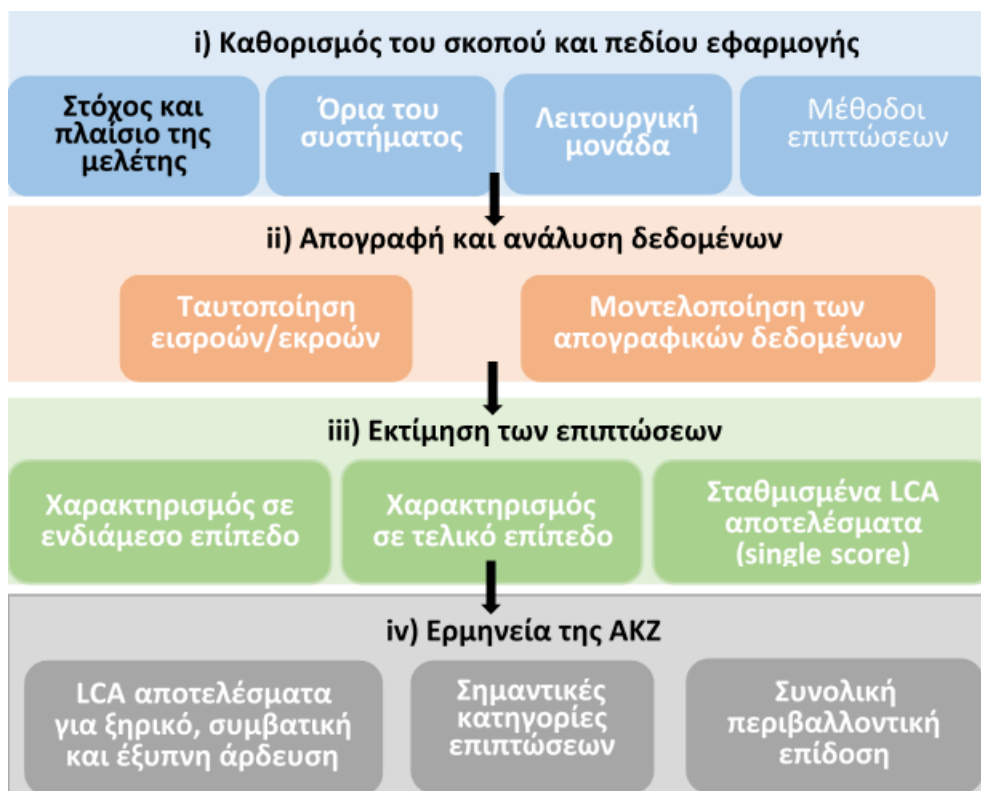
Η άρδευση πραγματοποιείται με μικροεκτοξευτήρες που λειτουργούν με πίεση 1,0-2,0 bars. Το νερό άρδευσης προέρχεται κυρίως από επιφανειακές πηγές (SW) και σε ελάχιστες περιπτώσεις από γεωτρήσεις (GW) σε μια αναλογία SW/GW: 95/5%. Ο ηλεκτρισμός είναι η κύρια πηγή ενέργειας για τη λειτουργία των αντλιών για την εξυπηρέτηση του 90% των ελαιώνων ενώ χρησιμοποιείται και πετρέλαιο. Το έδαφος στην περιοχή χαρακτηρίζεται σύμφωνα με την USDA κατάταξη εδαφών (Soil Survey Staff, 1999) ως αργιλοπηλώδες.

3.3.2 Μεθοδολογία

Η Εικόνα 3.2 αποτυπώνει τα βήματα της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η LCA βασίζεται σε τέσσερις κύριες φάσεις:

1. Καθορισμός του σκοπού και του πεδίου εφαρμογής (Goal and scope definition)
2. Απογραφή και ανάλυση δεδομένων (Life Cycle Inventory)
3. Εκτίμηση των επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment)
4. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Life Cycle Interpretation)

Η πρώτη φάση καθορίζει την έναρξη με τη δήλωση του σκοπού και του πλαισίου ανάλυσης, τον καθορισμό των λειτουργικών μονάδων και των ορίων του συστήματος, την προβλεπόμενη εφαρμογή και το κοινό (ομάδα στόχος). Τα απογραφικά δεδομένα συλλέχθηκαν χρησιμοποιώντας το πρότυπο συλλογής δεδομένων του Agricultural Life Cycle Inventory Generator (Grant et al., 2014) και μοντελοποιήθηκαν ακολουθώντας τις οδηγίες της μεθοδολογίας που έχει αναπτυχθεί για την LCA των γεωργικών προϊόντων στην Αυστραλία, AusAgLCI (Grant et al., 2014) και του World Food LCA Database - WFLDB (Nemecsek et al., 2014). Για την ανάλυση των επιπτώσεων χρησιμοποιήθηκε ανάλυση επιπτώσεων μέσου σημείου (Bulle et al., 2019). Η μεθοδολογία περιγράφεται εκτενώς στις επόμενες παραγράφους.



Εικόνα 3.2 Διάγραμμα του πλαισίου LCA της παρούσας εργασίας

3.3.3 Καθορισμός του σκοπού και του πεδίου εφαρμογής της LCA

3.3.3.1 Σκοπός

Ο σκοπός της LCA ήταν η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ξηρικών και των αρδευόμενων ελαιώνων. Επομένως μελετήθηκαν τρία σενάρια:

1^ο σενάριο: Η ξηρική καλλιέργεια η οποία χρησιμοποιήθηκε ως βάση αναφοράς και ως μάρτυρας.

2^ο σενάριο: Η συμβατική άρδευση, η άρδευση δηλαδή που εφαρμόστηκε με βάση την εμπειρία του παραγωγού και η οποία βασίστηκε στην αντίληψή του για την κατάσταση υγρασίας εδάφους και τις αντιδράσεις της καλλιέργειας. Η συγκεκριμένη αρδευτική πρακτική αντανάκλα την επικρατούσα αρδευτική πρακτική στην περιοχή. Οι ελαιοκαλλιεργητές αρδεύουν κατά το διάστημα από Ιούλιο μέχρι την έναρξη των φθινοπωρινών βροχοπτώσεων τέλη Σεπτέμβρη με αρχές Οκτωβρίου όπου συνήθως λαμβάνει χώρα και η συγκομιδή στο στάδιο της πράσινης ελιάς.

3^ο σενάριο: Η «έξυπνη» άρδευση που αναφέρεται στην άρδευση που πραγματοποιήθηκε με βάση τη συμβουλή άρδευσης που παρήγαγε το σύστημα παροχής συμβουλής άρδευσης (DSS) IRMA_SYS (Malamos et al., 2016). Το σύστημα αυτό συνδυάζει πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα μαζί με παραμέτρους της καλλιέργειας και παρέχει εξειδικευμένες στην καλλιέργεια συμβουλές άρδευσης για όλη την πεδιάδα της Άρτας από το 2015. Με την ανάλυση αυτής της αρδευτικής πρακτικής έγινε εκτίμηση της περιβαλλοντικής επίδοσης του DSS.

Στον Πίνακα 3.2 συνοψίζονται οι καλλιεργητικές εργασίες που λαμβάνουν χώρα στους ελαιώνες και αποτελούν την επικρατούσα πρακτική της περιοχής.

Πίνακας 3.2 Καλλιεργητικές εργασίες ανά εκτάριο ελαιώνα στους ελαιώνες στην πεδιάδα της Άρτας

Είδος εργασίας	Συχνότητα ανά έτος	Περίοδος εφαρμογής	Τρόπος εφαρμογής
Καλλιέργεια εδάφους	1	Απρίλιος - Μάιος	Μηχανικά (τρακτέρ)
Καταστροφέας (ζιζάνια)	4	Μάιος - Οκτώβριος	Μηχανικά
Άρδευση (μόνο για τα αρδευόμενα)	8-10	Μάιος - Οκτώβριος	Μηχανικά (αντλία)
Μεταφορά λιπασμάτων	2	Δεκέμβριος - Μάρτιος	Μηχανικά (φορτηγό)
Λίπανση	2	Δεκέμβριος - Μάρτιος	Χειρωνακτικά
Μεταφορά φυτοπροστατευτικών	2	Απρίλιος - Σεπτέμβριος	Μηχανικά (φορτηγό)
Φυτοπροστασία	5	Απρίλιος - Σεπτέμβριος	Μηχανικά (τρακτέρ)
Κλάδεμα	1	Οκτώβριος - Νοέμβριος	Χειρωνακτικά
Συγκομιδή	1	Οκτώβριος - Νοέμβριος	Χειρωνακτικά
Μεταφορά στο συσκευαστήριο	10	Οκτώβριος - Νοέμβριος	Μηχανικά

3.3.3.2 Ομάδα στόχος

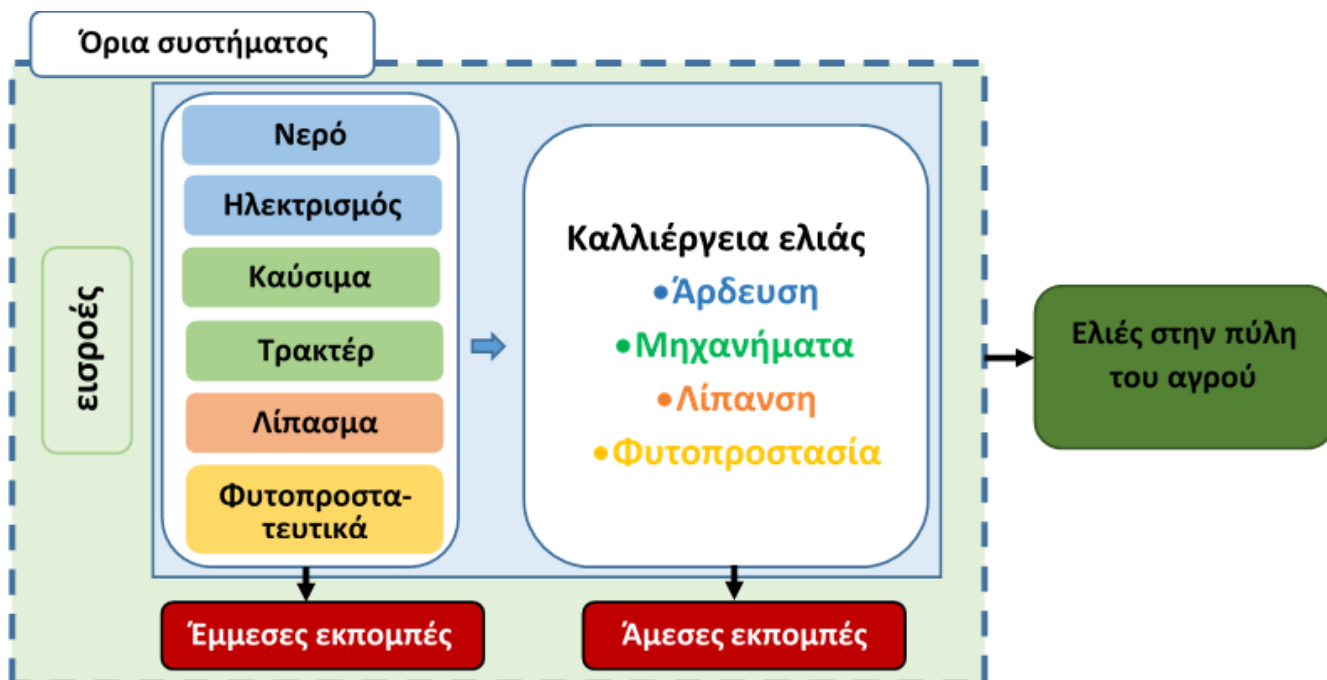
Η παρούσα LCA απευθύνεται αρχικά σε τοπικούς ενδιαφερόμενους και εμπλεκόμενους όπως για παράδειγμα οι ελαιοκαλλιέργειες και γενικά οι παραγωγοί της περιοχής, οι τοπικοί διαχειριστές της άρδευσης που είναι οι Οργανισμοί Εγγείων Βελτιώσεων (TOEB και ΓΟΕΒ), τα στελέχη της τοπικής αυτοδιοίκησης σε επίπεδο περιφερειακής ενότητας και περιφέρειας. Επιπλέον η παρούσα LCA απευθύνεται γενικότερα και σε ερευνητές LCA των γεωργικών προϊόντων.

3.3.3.3 Πεδίο εφαρμογής (Όρια συστήματος)

Το πεδίο εφαρμογής της LCA ορίστηκε από τη «γέννηση μέχρι την πύλη» (cradle-to-farm gate) (Εικόνα 3.3). Μελετήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αρδευτικών πρακτικών μέσα στα όρια του αγρού. Στην ανάλυση ελήφθησαν υπόψη οι ακόλουθες ενέργειες που σχετίζονται με την παραγωγή του ελαιόκαρπου:

1. λήψη των πρώτων υλών (πχ ορυκτά καύσιμα)
2. παραγωγή των αγρονομικών εισροών (παραγωγή λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, πετρέλαιο κτλ)
3. χρήση των αγρονομικών εισροών (νερό, λιπάσματα, καύσιμα και φυτοπροστατευτικά)
4. συντήρηση και τελική απόθεση των μηχανημάτων

Η άρδευση, τα μηχανήματα, τα λιπάσματα και τα φυτοπροστατευτικά συνδυάστηκαν για να παραχθεί το συνολικό αποτύπωμα του συστήματος παραγωγής του προϊόντος.



Εικόνα 3.3 Τα όρια του συστήματος για την LCA των συστημάτων παραγωγής επιτραπέζιας ελιάς

3.3.3.4 Λειτουργική μονάδα

Στην παρούσα LCA μελετήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος και ανά μονάδα καλλιεργούμενης έκτασης. Έτσι καθορίστηκαν δυο λειτουργικές μονάδες (FU):

- ο τόνος (t) παραγόμενου προϊόντος για τη συγκομιζόμενη ποσότητα ελαιόκαρπου στην έξοδο του χωραφιού, και
- το εκτάριο (ha) καλλιεργήσιμης γης που αφορά τον ελαιώνα

Με αυτό τον τρόπο αντιμετωπίζονται και η οικολογική επίδοση της παραγωγής, αλλά και η ένταση των επιπτώσεων της καλλιέργειας (Cerutti et al., 2014).

3.3.4 Απογραφικά Δεδομένα LCA

3.3.4.1 Εισροές

Ο Πίνακας 3.3 αναφέρει τα κύρια απογραφικά δεδομένα των καλλιεργειών. Τα απογραφικά δεδομένα της παρούσας LCA προέρχονται από δεδομένα που μετρήθηκαν στο πεδίο, δεδομένα που συλλέχθηκαν από τους παραγωγούς της περιοχής, και δεδομένα που προέκυψαν μετά από κατάλληλους υπολογισμούς.

Η παρούσα εργασία αναφέρεται σε δυο καλλιεργητικές περιόδους, το 2019 και το 2020. Τα δεδομένα αυτά συλλέχθηκαν από τους παραγωγούς που εμπλέκονται στη μελέτη. Η πυκνότητα φύτευσης των υπό μελέτη ελαιώνων ήταν 240 δένδρα ανά εκτάριο (ha). Η ηλικία των δένδρων ήταν περίπου 25-30 ετών.

Δευτερεύοντα δεδομένα αντλήθηκαν από βάσεις δεδομένων, από τη βιβλιογραφία ή προέκυψαν έπειτα από εκτιμητικές διαδικασίες χρησιμοποιώντας εξειδικευμένα μοντέλα.

Πίνακας 3.3 Απογραφικά δεδομένα για της LCA των συστημάτων ελαιοκαλλιέργειας στην πεδιάδα της Άρτας ανά εκτάριο καλλιεργούμενης έκτασης. Δίνεται ο μέσος όρος (μ.ο.) για κάθε παράμετρο καθώς και η ελάχιστη (min) και η μέγιστη τιμή (max).

Παράμετρος	Μονάδα	Ξηρικά (μ.ο.) [min - max]	Συμβατική άρδευση (μ.ο.) [min - max]	DSS άρδευση (μ.ο.) [min - max]
Παραγωγή	t/ha	5,66 [3,4 - 7,9]	11,84 [7 - 16,6]	11,23 [6,6 - 15,8]
Νερό άρδευσης	m ³ /ha	- -	3560 [2962,5 - 4155]	1953 [1885 - 2020,4]
Ηλεκτρισμός για άρδευση (Greek mix)	kWh/ha	- -	687 [802 - 571,7]	377 [363,5 - 389]
Αζωτούχος λίπανση ως N	kg/ha	135 [96 - 172,8]	135 [96 - 172,8]	135 [96 - 172,8]
Φώσφορος ως P ₂ O ₅	kg/ha	84 [48 - 120]	84 [48 - 120]	84 [48 - 120]
Καλιούχος λίπανση ως K ₂ O	kg/ha	60 [54 - 60]	60 [54 - 60]	60 [54 - 60]
Εντομοκτόνα γενικά (unspecified)	kg/ha	21,6	21,6	21,6
Πετρέλαιο - Diesel	MJ/ha	3913	3913	3913
Τρακτέρ	kg/ha	10,56	10,56	10,56
Λάδι μηχανής τρακτέρ	kg/ha	2,1	2,1	2,1
Χρήση γης (πολυετής καλλιέργεια)	m ² *a	44,16	21,1	22,3

3.3.4.2 Εκπομπές N

Οι εκπομπές που σχετίζονται με το N υπολογίστηκαν με βάση την καταγεγραμμένη χρήση λιπασμάτων, τη χρήση εξειδικευμένων μοντέλων και ακολουθώντας τις κατευθυντήριες οδηγίες της IPCC (2006).

Η αμμωνία (NH₃) υπολογίστηκε ως το 10% της εφαρμοζόμενης ποσότητας N.

Οι άμεσες εκπομπές N₂O υπολογίστηκαν ως το 1% (0,01 kg N₂O-N / kg N) και ως το 2,1 % (0,021 kg N₂O-N / kg N) της εφαρμοζόμενης ποσότητας N στους ξηρικούς και τους αρδευόμενους ελαιώνες, αντίστοιχα.

Οι εκπομπές των οξειδίων του N στον αέρα (NO_x) υπολογίστηκαν ως το 21% των άμεσων εκπομπών N₂O (Thomas Nemecsek & Kägi, 2007).

Το μέρος των συνθετικών N λιπασμάτων που εξατμίζεται ως NH₃ και NO_x ήταν 10% (kg εξατμιζόμενου N / kg εφαρμοζόμενου N).

Το μέρος του N που χάθηκε λόγω έκπλυσης θεωρήθηκε ως 0,3 (kg N / kg προστιθέμενου N).

3.3.4.3 Εκπομπές P

Στις εκπομπές φωσφόρου συμπεριλήφθηκαν η έκπλυση του φωσφόρου στα υπόγεια ύδατα, η απορροή στα επιφανειακά ύδατα και η μεταφορά στα επιφανειακά ύδατα μέσω της διάβρωσης. Αυτές

οι εκπομπές μοντελοποιήθηκαν με βάση τις διαθέσιμες κατευθυντήριες οδηγίες (Grant et al., 2014, Nemecek and Kägi, 2007).

3.3.4.4 Πετρέλαιο και φυτοπροστατευτικά

Τα δεδομένα σχετικά με τις εκπομπές από την καύση του πετρελαίου και τη χρήση των φυτοπροστατευτικών αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων Ecoinvent Database v.3.1. Τα έμμεσα απογραφικά (προφίλ εκπομπών) για τις εισροές αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων Ecoinvent Database v.3.1 (Ecoinvent, 2014).

3.3.5 Εκτίμηση επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (Life Cycle Impact Assessment)

Η ανάλυση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA) πραγματοποιήθηκε με βάση τη μέθοδο IMPACT World+, μια καινοτόμα μέθοδο που συνδυάζει το χαρακτηρισμό, την κανονικοποίηση, την εκτίμηση ζημιάς (επιπτώσεων) και τη στάθμιση των επιπτώσεων (Πίνακας 3.4).

Υπολογίστηκαν πρώτα 18 κατηγορίες επιπτώσεων μέσου σημείου – midpoint: κλιματική αλλαγή, ανθρώπινη και οικολογική τοξικότητα, σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων και ευτροφισμός, αλλά επίσης και επιπτώσεις λόγω της χρήσης νερού, εδάφους και πόρων. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι επιπτώσεις τελικού σημείου (end points) που αναφέρονται στη ζημιά στην ανθρώπινη υγεία και στη ζημιά στην ποιότητα του οικοσυστήματος. Τέλος, η εκτίμηση ενιαίου αποτελέσματος (single score) που αφορά τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενίσχυσε την ανάλυση. Οι εκτίμηση των επιπτώσεων τελικού σημείου και το ενιαίο αποτέλεσμα (single score) συμπύκνωσαν την πολυπλοκότητα των πολλαπλών δεικτών επιπτώσεων, αναγνώρισαν την αλληλεξάρτηση μεταξύ των δεικτών και επέτρεψαν την διευκόλυνση της επικοινωνίας των αποτελεσμάτων στους μη ειδικούς στην LCA. Το λογισμικό OpenLCA v.1.10.3 (Green Delta GmbH, 2021) χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή της ανάλυσης επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA).

Πραγματοποιήθηκε επίσης ανάλυση αβεβαιότητας (1000 σενάρια) με τη μέθοδο Monte Carlo για τον προσδιορισμό της επιρροής της ποιότητας των δεδομένων στα αποτελέσματα της ΑΚΖ. Οι δείκτες ποιότητας των δεδομένων (Data Quality Indicators –DQI) βασίστηκαν στον πίνακα Ecoinvent Pedigree matrix (Πίνακας 3.5).

Οι δείκτες ποιότητας δεδομένων αναφέρονται στον Πίνακα 3.5 ως (a-b-c-d-e) στα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- a. Αξιοπιστία
- b. Πληρότητα
- c. Χρονική συσχέτιση
- d. Χωρική συσχέτιση
- e. Περαιτέρω τεχνολογική συσχέτιση

Η κλίμακα παίρνει τιμές από το 1 έως το 5, όπου το 1 σημαίνει ότι για το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό τα δεδομένα είναι υψηλής ποιότητας και το 5 σημαίνει ότι η ποιότητα των δεδομένων είναι χαμηλή.

Πίνακας 3.4 Οι κατηγορίες επιπτώσεων μέσου σημείου της IMPACT World+ μεθόδου και οι συντελεστές κανονικοποίησης και στάθμισης.

Κατηγορία	Συντομογραφία	Ζημιά στην ανθρώπινη υγεία	Ζημιά στο οικοσύστημα
Κλιματική αλλαγή, μακροπρόθεσμα- Climate change, long term	CC_lt	+	+
Κλιματική αλλαγή, βραχυπρόθεσμα - Climate change, short term	CC_st	+	+
Χρήση ορυκτής και πυρηνικής ενέργειας - Fossil and nuclear energy use	FEU		
Οξίνιση υδάτων - Freshwater acidification	FA		+
Οικοτοξικότητα υδάτων - Freshwater ecotoxicity	FET		+
Ευτροφισμός υδάτων - Freshwater eutrophication	FE		+
Ανθρώπινη τοξικότητα καρκινογόνα - Human toxicity cancer	HTc	+	
Ανθρώπινη τοξικότητα μη καρκινογόνα - Human toxicity non-cancer	HTnc	+	
Ιονίζουσες ακτινοβολίες - Ionizing radiations	IR	+	
Χρήση γης, βιοποικιλότητα - Land occupation, biodiversity	LO		+
Αλλαγή χρήσης γης, βιοποικιλότητα - Land transformation, biodiversity	LT		+
Θαλάσσιος ευτροφισμός - Marine eutrophication	ME		+
Χρήση ορυκτών πόρων - Mineral resources use	MRU		
Καταστροφή της στιβάδας του όζοντος - Ozone layer depletion	OD		
Σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων - Particulate matter formation	PM	+	
Σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών παραγόντων - Photochemical oxidant formation	POF	+	
Εδαφική οξίνιση - Terrestrial acidification	TA		+
Έλλειψη νερού - Water scarcity	WS	+	+
Συντελεστής κανονικοποίησης - Normalization factor	-	13,7	0,000101
Συντελεστής στάθμισης - Weighting factor	-	5401,460	1386,139

Πίνακας 3.5 Οι δείκτες ποιότητας των δεδομένων (Data Quality Indicators - DQI) των εισροών και εκροών για την ανάλυση αβεβαιότητας.

Παράμετρος	DQI	Γεωμετρική Τυπική Απόκλιση (S.D.)
Ηλεκτρική ενέργεια	2-1-1-1-2	1,0714
N-λίπανση	2-1-1-1-2	1,0714
P-λίπανση	2-1-1-1-2	1,0714
K-λίπανση	2-1-1-1-2	1,0714
Φυτοπροστατευτικά	2-1-1-1-2	1,0714
Diesel	2-1-1-1-2	1,0714
Γεωργικός ελκυστήρας (ΓΕ)	2-1-1-1-2	1,0714
Λάδι μηχανής ΓΕ	3-1-1-1-2	1,0714
Χρήση γης	3-1-1-1-2	1,1155
Αμμωνία	3-2-1-2-2	1,1155
Υποξείδιο του αζώτου	3-2-1-2-2	1,1155
Οξείδιο του αζώτου	3-2-1-2-2	1,1155
Νιτρικά άλατα	3-2-1-2-2	1,1155
Φώσφορος	3-2-1-2-2	1,1155
Φωσφορικά άλατα	3-2-1-2-2	1,1155
Εκπομπές φυτοπροστατευτικών	3-2-1-2-2	1,1155
Εκπομπές καύσης *	3-2-1-2-2	1,1155

*Πίνακας 7.1 σελ 62 στην αναφορά Ecoinvent N°15 των Nemecek and Kägi (2007)

Για τον προσδιορισμό της πιθανότητας οι διαφορετικές μέθοδοι ερμηνείας των επιπτώσεων να οδηγούν σε διαφορετικά συμπεράσματα πραγματοποιήθηκε επιπλέον και ανάλυση ευαισθησίας. Για αυτή την ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα ReCiPe 2016 (Huijbregts et al., 2017) and Environmental Footprint (Sala et al., 2018).

3.4 Αποτελέσματα – Συζήτηση

3.4.1 Συγκριτικά αποτελέσματα των επιπτώσεων μέσου σημείου (Midpoint)

3.4.1.1 Επιπτώσεις μέσου σημείου ανα 1t παραγόμενου προϊόντος

Στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δεικτών κάθε κατηγορίας επιπτώσεων μέσου σημείου για τη λειτουργική μονάδα του 1 t παραγόμενου προϊόντος.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μεγάλη αύξηση στην παραγωγή ως αποτέλεσμα της εφαρμογής της άρδευσης στους αρδευόμενους ελαιώνες αντιστάθμισαν το αποτύπωμα στις περισσότερες κατηγορίες εκτός από αυτή της έλλειψης νερού (water scarcity) που συνδέεται με τη χρήση του μπλε νερού (νερό άρδευσης).

Παρατηρούμε λοιπόν ότι για 1 t παραγόμενου προϊόντος στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων μέσου σημείου, εκτός από αυτή της χρήσης νερού, τα ξηρικά σημειώνουν μεγαλύτερη τιμή σε σύγκριση με τα αρδευόμενα. Η παραγωγή και η χρήση του μπλε νερού στις αρδευόμενες μεταχειρίσεις ήταν μεγαλύτερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες στις ξηρικές μεταχειρίσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ξηρικές καλλιέργειες έχουν μηδενικό αποτύπωμα μπλε νερού, καθώς δεν αντλείται καθόλου νερό για άρδευση (Darré et al., 2019).

Συγκρίνοντας τις δυο αρδευόμενες μεταχειρίσεις (συμβατική και «έξυπνη») μεταξύ τους παρατηρούνται παρόμοιες τιμές με μια απόκλιση μικρότερη από το 10%. Η έξυπνη άρδευση (DSS) επέδειξε καλύτερη περιβαλλοντική επίδοση σε σύγκριση με τη συμβατική για τους δείκτες: έλλειψη νερού - water scarcity (-27%), χρήση ορυκτής και πυρηνικής ενέργειας - fossil and nuclear energy use (-13%) και τοξικότητα στον άνθρωπο - human toxicity (-8%). Για διάφορες άλλες κατηγορίες επιπτώσεων η συμβατική άρδευση επέδειξε χαμηλότερο αποτύπωμα σε σύγκριση με τη DSS άρδευση.

Οι διαφορές αυτές μεταξύ συμβατικής και «έξυπνης» άρδευσης στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος οφείλονται στις διαφορές στις συγκομιζόμενες ποσότητες μεταξύ των δυο διαφορετικών αρδευτικών πρακτικών.

Πίνακας 3.6. Αποτελέσματα της LCA για 1 t παραγόμενου προϊόντος (ελαιόκαρπος) στην πεδιάδα της Άρτας για τα ξηρικά, τη συμβατική άρδευση (Παραγωγός) και τη DSS άρδευση. Σημείωση για τη χρωματική κλίμακα: πράσινο=χαμηλή επίπτωση, πορτοκαλί = μέτρια επίπτωση και κόκκινη = υψηλή επίπτωση

Κατηγορίες επιπτώσεων	Μονάδα/t	Ξηρικό (Μάρτυρας - Αναφορά)	Άρδευση παραγωγού (Συμβατική)	DSS άρδευση (Εξυπνη)
Κλιματική αλλαγή, μακροπρόθεσμη	kg CO ₂ eq (long)	574,6	400,9	394,5
Κλιματική αλλαγή, βραχυπρόθεσμη	kg CO ₂ eq (short)	588,6	409,7	402,9
Χρήση ορυκτής και πυρηνικής ενέργειας	MJ deprived	2632,6	2045,4	1783,6
Οξίνιση υδάτων	kg SO ₂ eq	6,80 x 10 ⁻⁶	4,13 x 10 ⁻⁶	3,95 x 10 ⁻⁶
Οικοτοξικότητα υδάτων	CTUe	29,236,1	14,744,78	15,193,4
Ευτροφισμός υδάτων	kg PO ₄ P-lim eq	5,31 x 10 ⁻²	2,56 x 10 ⁻²	2,69 x 10 ⁻²
Καρκινογόνος άνθρωπο-τοξικότητα	CTUh	4,64 x 10 ⁻⁷	3,04 x 10 ⁻⁷	2,82 x 10 ⁻⁷
Ανθρώπινη τοξικότητα μη καρκινογόνα	CTUh	2,52 x 10 ⁻⁵	1,66 x 10 ⁻⁵	1,53 x 10 ⁻⁵
Ιονίζουσες ακτινοβολίες	Bq C-14 eq	3237,54	1919,20	1848,3
Χρήση γης, βιοποικιλότητα	m ² arable land eq. yr	46,3	22,25	23,43
Αλλαγή χρήσης γης, βιοποικιλότητα	m ² arable land eq	0,22	0,11	0,114
Ευτροφισμός θαλασσίων οικοσυστημάτων	kg N N-lim eq	0,258	0,127	0,132
Χρήση ορυκτών πόρων	kg deprived	3,2	1,59	1,65
Καταστροφή της στιβάδας του όζοντος	kg CFC-11 eq	1,14 x 10 ⁻⁴	5,98 x 10 ⁻⁵	6,05 x 10 ⁻⁵
Σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων	kg PM _{2,5} eq	0,323	0,155	0,163
Σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών παραγόντων	kg NMVOC eq	2,01	1,112	1,121
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO ₂ eq	1,64 x 10 ⁻²	8,55 x 10 ⁻³	8,70 x 10 ⁻³
Έλλειψη νερού	m ³ world eq	9084,66	26,131,18	17,196,30

3.4.1.2 Επιπτώσεις μέσου σημείου ανα 1ha καλλιεργούμενης έκτασης

Στον Πίνακα 3.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δεικτών κάθε κατηγορίας επιπτώσεων μέσου σημείου για τη λειτουργική μονάδα του 1 ha καλλιεργούμενης έκτασης.

Οι διαφορές στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανάμεσα στους αρδευόμενους και τους ξηρικούς οφείλονται κυρίως στη λειτουργική μονάδα (Ben Abdallah et al., 2021, Darré et al., 2019, Figueiredo et al., 2017, Todoronić et al., 2018). Όταν η λειτουργική μονάδα ήταν το 1 ha οι αρδευόμενοι ελαιώνες επέδειξαν υψηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε όλες τις κατηγορίες, καθώς αυτές απαιτούν μεγαλύτερη χρήση των εισροών σε ό,τι έχει να κάνει με το νερό και την ενέργεια.

Το παραπάνω εύρημα συνάδει με τα αντίστοιχα προηγούμενων σχετικών εργασιών (Ben Abdallah et al., 2021, Pergola et al., 2013). Προφανώς, για 1 ha, η έξυπνη άρδευση έχει μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σύγκριση με τη συμβατική άρδευση λόγω της μικρότερης έντασης των εισροών (συγκεκριμένα μικρότερη ποσότητα νερού άρδευσης). Τα ευρήματα της παρούσας εργασίας

ενισχύουν τη σημασία της εξέτασης πολλαπλών λειτουργικών μονάδων έτσι ώστε να παρέχεται καλύτερη κατανόηση των οφελών και των αντισταθμίσεων των πρακτικών στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Πίνακας 3.7 Αποτελέσματα της LCA για 1 ha καλλιεργήσιμης έκτασης (ελαιώνας) στην πεδιάδα της Άρτας για τα ξηρικά, τη συμβατική άρδευση (Παραγωγός) και τη DSS άρδευση. Σημείωση για τη χρωματική κλίμακα: πράσινο=χαμηλή επίπτωση, πορτοκαλί = μέτρια επίπτωση και κόκκινη = υψηλή επίπτωση.

Κατηγορίες επιπτώσεων	Μονάδα/ha	Ξηρικό (Μάρτυρας - Αναφορά)	Άρδευση παραγωγού (Συμβατική)	DSS άρδευση (Εξυπνη)
Κλιματική αλλαγή, μακροπρόθεσμη	kg CO ₂ eq (long)	3252,2	4747,09	4426,15
Κλιματική αλλαγή, βραχυπρόθεσμη	kg CO ₂ eq (short)	3331,5	4851,33	4520,30
Χρήση ορυκτής και πυρηνικής ενέργειας	MJ deprived	14900,5	24217,75	20011,88
Οξίνιση υδάτων	kg SO ₂ eq	3,85 x10 ⁻⁵	4,89 x 10 ⁻⁵	4,43 x 10 ⁻⁵
Οικοτοξικότητα υδάτων	CTUe	165476,5	174578,17	170469,62
Ευτροφισμός υδάτων	kg PO ₄ P-lim eq	0,301	0,304	0,302
Καρκινογόνος ανθρωπο-τοξικότητα	CTUh	2,62 x 10 ⁻⁶	3,60 x 10 ⁻⁶	3,16 x 10 ⁻⁶
Ανθρώπινη τοξικότητα μη καρκινογόνα	CTUh	1,42 x 10 ⁻⁴	1,96 x 10 ⁻⁴	1,72 x 10 ⁻⁴
Ιονίζουσες ακτινοβολίες	Bq C-14 eq	18324,502	22723,270	20737,646
Χρήση γης, βιοποικιλότητα	m ² arable land eq .yr	262,2	263,4	262,9
Αλλαγή χρήσης γης, βιοποικιλότητα	m ² arable land eq	1,26	1,31	1,28
Ευτροφισμός θαλασσίων οικοσυστημάτων	kg N N-lim eq	1,46	1,50	1,49
Χρήση ορυκτών πόρων	kg deprived	18,21	18,79	18,53
Καταστροφή της στιβάδας του όζοντος	kg CFC-11 eq	6,44 x 10 ⁻⁴	7,08 x 10 ⁻⁴	6,79 x 10 ⁻⁴
Σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων	kg PM2.5 eq	1,83	1,83	1,83
Σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών παραγόντων	kg NMVOC eq	11,38	13,17	12,58
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO ₂ eq	0,093	0,101	0,098
Έλλειψη νερού	m ³ world eq	51419,16	277937,89	192942,53

3.4.1.3 Σύγκριση με αποτελέσματα αντίστοιχων εργασιών

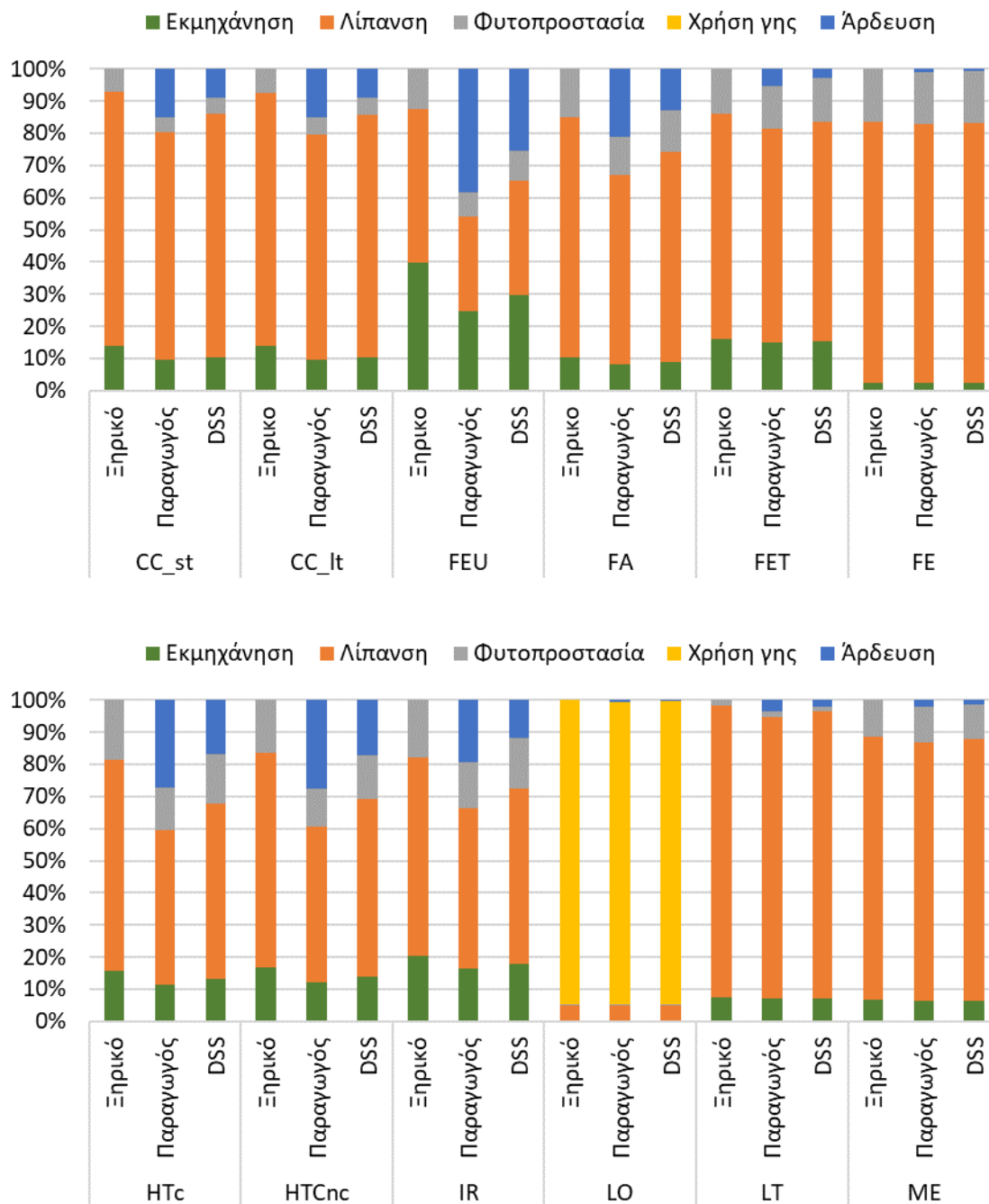
Στην παρούσα ενότητα εργασίας έγινε μια προσπάθεια να συγκριθούν τα αποτελέσματα των επιπτώσεων σε επίπεδο μέσου σημείου με άλλες αντίστοιχες εργασίες, καθώς η προσέγγιση του μέσου σημείου είναι πολύ διαδεδομένη. Παρ' όλ' αυτά, οι τιμές κάθε εργασίας δε μπορούν να συγκριθούν άμεσα, καθώς η κάθε μια χρησιμοποιεί διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA methods). Ωστόσο, ήταν ένα χρήσιμο βήμα για την ανάπτυξη μιας βασικής συγκριτικής πληροφορίας. Οι Pergola et al. (2013) υπολόγισαν την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη με σημείο αναφοράς τον 1 t ελιάς στην Ιταλία ως 110 και 80 kg CO₂ eq για τα ξηρικά και τα αρδευόμενα συστήματα, αντίστοιχα. Ο ευτροφισμός ήταν αντίστοιχα 0,0595 και 0,0494 kg PO₄³ P-lim eq, ενώ η οξίνιση ήταν 0,43 και 0,63 kg SO₂ eq, αντίστοιχα. Οι Romero-Gómez et al. (2017) συγκρίνοντας πρακτικές ελαιοκαλλιέργειας στην Ισπανία βρήκανε ότι ο δείκτης για την κλιματική αλλαγή στα ξηρικά

και τα συμβατικά αρδευόμενα για έναν τόνο προϊόντος ήταν 277 kg CO₂ eq and 260 kg CO₂ eq, αντίστοιχα. Η τιμή του δείκτη για τον ευτροφισμό ήταν 0,052 και 0,0548 kg PO₄³P-lim eq, ενώ για την οξίνιση υπολογίστηκε ως 3,27 και 2,88 molc H⁺ eq, αντίστοιχα. Οι Ben Abdallah et al. (2021), συγκρίνοντας ξηρικούς και συμβατικά αρδευόμενους ελαιώνες στην Τυνησία, υπολόγισαν για 1 t παραγόμενου προϊόντος τις ακόλουθες τιμές για διάφορους δείκτες: κλιματική αλλαγή, 630,9 και 420,8 kg CO₂ eq, ευτροφισμός, 0,09 και 0,128 kg PO₄³P-lim eq, οξίνιση, 4,35 και 6,72 molc H⁺ eq. Οι Fernández-Lobato et al. (2021) υπολόγισαν για ένα τόνο ελαιόλαδου την τιμή του δείκτη για τη κλιματική αλλαγή ίση με 239 kg CO₂ eq, την καταστροφή της στιβάδας του όζοντος 1,78 x 10⁻⁴ E kg CFC-11 eq, το σχηματισμό αιωρούμενων σωματιδίων 1,65 kg PM_{2,5} eq, τον ευτροφισμό 0,574 kg PO₄³P-lim eq και την έλλειψη νερού 52,9 m³ νερού eq. Οι επιπτώσεις ποικίλουν ανάμεσα στις διάφορες εργασίες και ανάμεσα στα διάφορα καλλιεργητικά συστήματα όπως προκύπτει από τη σχετική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας. Οι Russo et al. (2016) συνέκριναν την περιβαλλοντική επίδοση διάφορων συστημάτων καλλιέργειας σε ευρωπαϊκό επίπεδο και σημείωσαν ότι η περιβαλλοντική επίδοση της ελαιοκαλλιέργειας στην Ελλάδα ήταν καλύτερη στις 14 από τις 16 κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

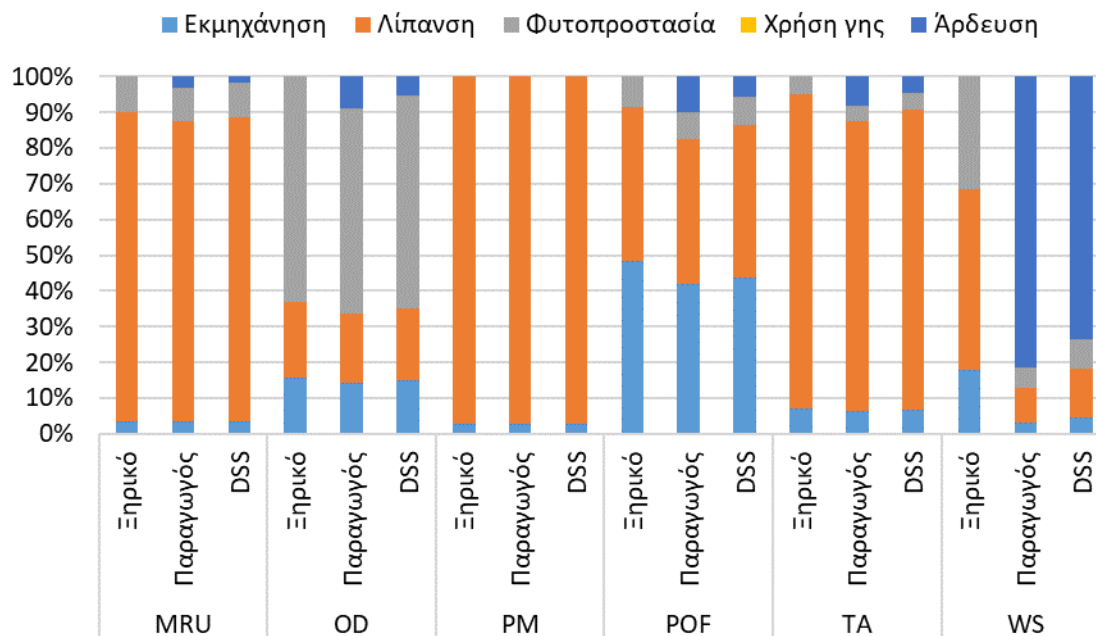
3.4.2 Κυρίες κατηγορίες επιπτώσεων

Το Διάγραμμα 3.1 δείχνει τη συμμετοχή της κάθε κατηγορίας επιπτώσεων στη συνολική περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Στο επίπεδο του μέσου σημείου τα ευρήματα της παρούσας εργασίας επιβεβαιώνουν τα αντίστοιχα σχετικών LCA εργασιών που αφορούν την ελαιοκαλλιέργεια (Romero-Gómez et al., 2017, Ben Abdallah et al., 2021) σε ό,τι αφορά την αναγνώριση των κύριων περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των hotspots. Η άρδευση και η λίπανση ήταν οι αγρονομικές πρακτικές που συνεισέφεραν περισσότερο στις περισσότερες κατηγορίες. Στην περίπτωση της συμβατικής άρδευσης οι επιπτώσεις της άρδευσης κυμάνθηκαν από 0,018% (χρήση γης) μέχρι 83,3% (χρήση νερού). Στην περίπτωση της άρδευσης με βάση τις συμβουλές του DSS («έξυπνη» άρδευση) οι επιπτώσεις της άρδευσης κυμάνθηκαν από 0,01% (χρήση γης) μέχρι 73,3% (χρήση νερού). Παρατηρήθηκε ότι η κατανάλωση ενέργειας για την άρδευση είχε μεγαλύτερη συμμετοχή στους δείκτες ορυκτή και πυρηνική ενέργεια, ιονίζουσα ακτινοβολία, και τοξικότητα ανθρώπου. Η άρδευση είχε μεγαλύτερη συνεισφορά στην κατανάλωση μπλε νερού και άρα στο δείκτη έλλειψης νερού. Οι εκπομπές στον αγρό όπως αμμωνία και υποξείδιο το αζώτου είχαν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην οξίνιση σωματιδίων, στον ευτροφισμό στα θαλάσσια συστήματα και στην κλιματική αλλαγή. Οι εκπομπές των φυτοπροστατευτικών οδήγησαν σε τοξικότητες και καταστροφή της στιβάδας του όζοντος.



Διάγραμμα 3.1 Συμμετοχή των κυριων κατηγοριων επιπτώσεων στις κατηγοριες ενδιάμεσων επιπτώσεων για τα ξηρικά, τη συμβατική άρδευση (Παραγωγός) και τη DSS άρδευση (DSS). Σημείωση: CC = κλιματική αλλαγή, FEU = χρήση ορυκτής και πυρηνικής ενέργειας, FA = οξίνιση υδάτων, FET = τοξικότητα υδάτων, FE = ευτροφισμός υδάτων, HTc = καρκινογόνος ανθρωπο-τοξικότητα, HTCnc = μη καρκινογόνος ανθρωπο-τοξικότητα, IR = ιονίζουσα ακτινοβολία, LO = χρήση γης, LT = αλλαγή χρήσης γης, ME = ευτροφισμός θαλάσσιου οικοσυστήματος

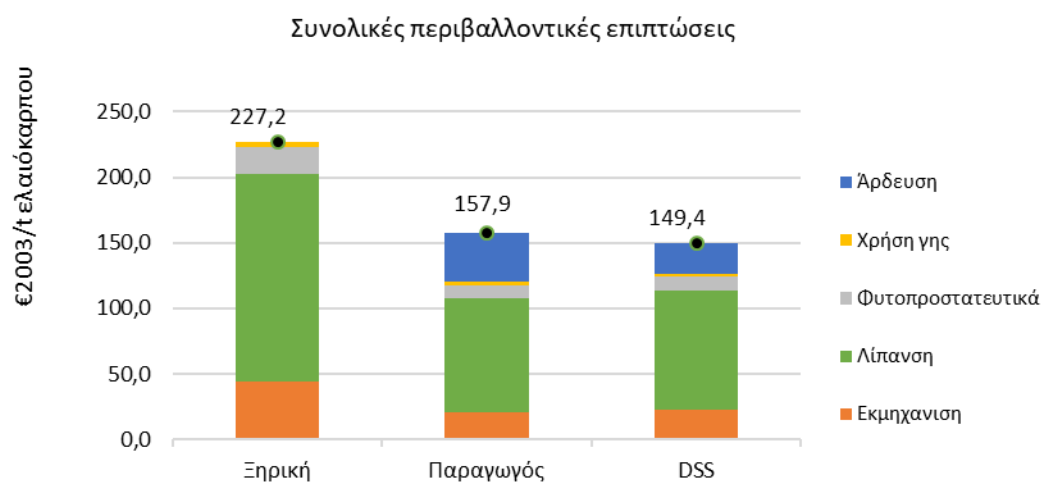
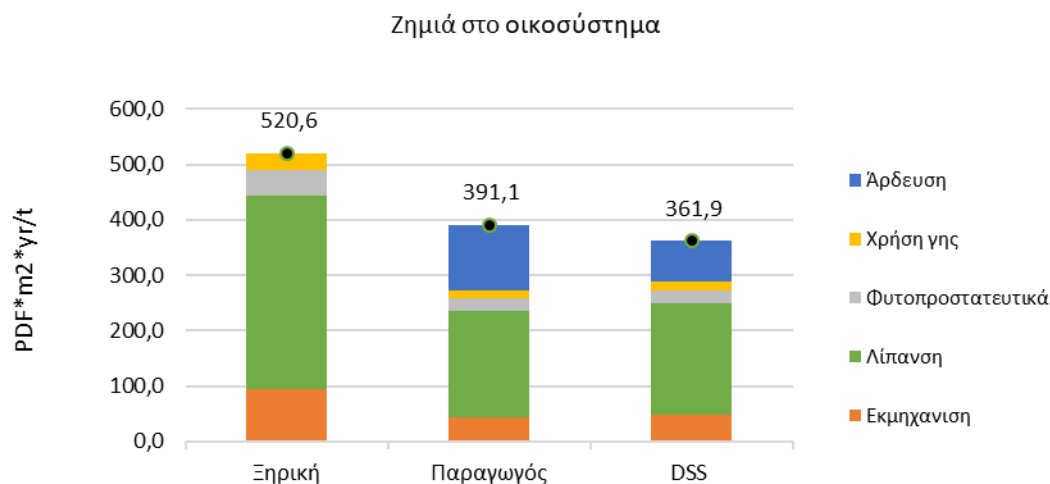
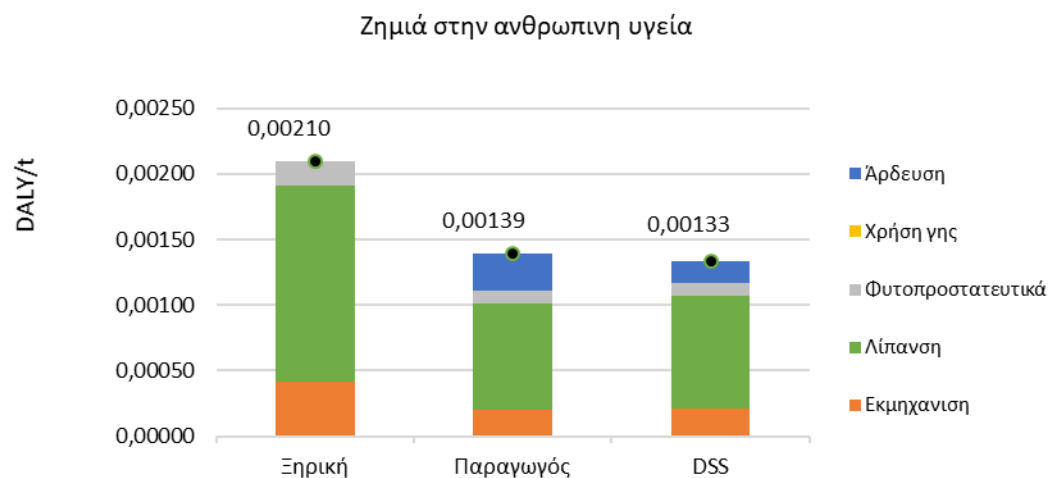


Διάγραμμα 3.1 (συνέχεια) Συμμετοχή των κυριων κατηγοριών επιπτώσεων στις κατηγορίες ενδιάμεσων επιπτώσεων για τα ξηρικά, τη συμβατική άρδευση (Παραγωγός) και τη DSS άρδευση (DSS). Σημείωση: MRU = χρήση ορυκτών πόρων, OD = καταστροφή σιθιάδας όζοντος, PM = αιωρούμενα σωματίδια, POF = σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών παραγόντων, TA = οξίνιση χερσαίου οικοσυστήματος, WS = έλλειψη νερού.

3.4.3 Επιπτώσεις τελικού σημείου και συνολική περιβαλλοντική επίπτωση

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της LCA διευρύνθηκε και στο τελικό σημείο καθώς και στη στάθμιση με την ανάλυση ενός ενιαίου αποτελέσματος – single score- τη συνολική περιβαλλοντική επίπτωση (Διάγραμμα 3.2), παρέχοντας έτσι μια επιπρόσθετη βάση για την καλύτερη κατανόηση των αντισταθμίσεων (trade-offs) μεταξύ των καλλιεργητικών συστημάτων και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Θα πρέπει να επαναληφθεί σε αυτό το σημείο ότι το μεγαλύτερο αποτέλεσμα (μεγαλύτερη τιμή) σημαίνει και μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της καλλιέργειας.

Θεωρώντας ως λειτουργική μονάδα τον ένα τόνο (1 t) παραγόμενου προϊόντος είναι εμφανές ότι τα αρδευόμενα συστήματα είναι περισσότερο φιλοπεριβαλλοντικά σε σύγκριση με τα ξηρικά λόγω της υψηλότερης παραγωγής των πρώτων. Το επίπεδο των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία κυμάνθηκε από 0,0013 DALY/t για τα αρδευόμενα με βάση το DSS έως 0,0021 DALY/t για τα ξηρικά. Το επίπεδο των επιπτώσεων στην ποιότητα του οικοσυστήματος κυμάνθηκε από 361,9 PDF·m²·yr/t για την άρδευση με βάση το DSS έως 520,6 PDF·m²·yr/t για τα ξηρικά. Η τελική επίπτωση ως ενιαίο αποτέλεσμα για ένα τόνο ελαιόκαρπου στην πύλη του χωραφίου ήταν 228,3 Euro2003 για τα ξηρικά, 158,4 Euro2003 για τα συμβατικά αρδευόμενα (με βάση την εμπειρία του παραγωγού) και 149,9, Euro2003 για τα έξυπνα αρδευόμενα (με βάση τη συμβουλή του DSS).



Διάγραμμα 3.2 Οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, το οικοσύστημα και οι συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ελαιοκαλλιέργειας για τα ξηρικά τη συμβατική άρδευση (Παραγωγός) και τη DSS άρδευση (DSS).

Τα τελικά αποτελέσματα επιδεικνύουν ότι η έξυπνη άρδευση με βάση το DSS παρήγαγε τη χαμηλότερη περιβαλλοντική επίπτωση από πλευράς επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία, την ποιότητα του οικοσυστήματος και τις συνολική περιβαλλοντική επίπτωση.

Όταν εστιάζουμε μόνο στις επιπτώσεις της άρδευσης, η εφαρμογή του έξυπνου συστήματος άρδευσης (DSS) προκάλεσε 42,2% λιγότερες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και 37,5% στην ποιότητα του οικοσυστήματος σε σχέση με την άρδευση παραγωγού. Η τελική επίπτωση θα μπορούσε να μειωθεί κατά 15,2 Euro2003/t ή 40,01%. Συνολικά, η DSS άρδευση θα μπορούσε να μειώσει τις συνολικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής του προϊόντος κατά 5,3% για 1 t προϊόντος και 10,4% για ένα ha καλλιεργήσιμης έκτασης σε σύγκριση με τη συμβατική άρδευση.

Τα οφέλη περιορίστηκαν λόγω της χαμηλότερης παραγωγής των DSS συστημάτων σε σύγκριση με τα συμβατικά αρδευόμενα, καθώς επίσης και από τη χρήση των λιπασμάτων που ήταν ίδια στα δυο συστήματα και η οποία είχε την υψηλότερη συμμετοχή στις επιπτώσεις στην LCA (Διάγραμμα 3.2). Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η βελτίωση της εφαρμογής λίπανσης θα έπρεπε να είναι ο κύριος στόχος για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων της LCA στην ελαιοκαλλιέργεια. Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για την περίπτωση των ξηρικών ελαιώνων.

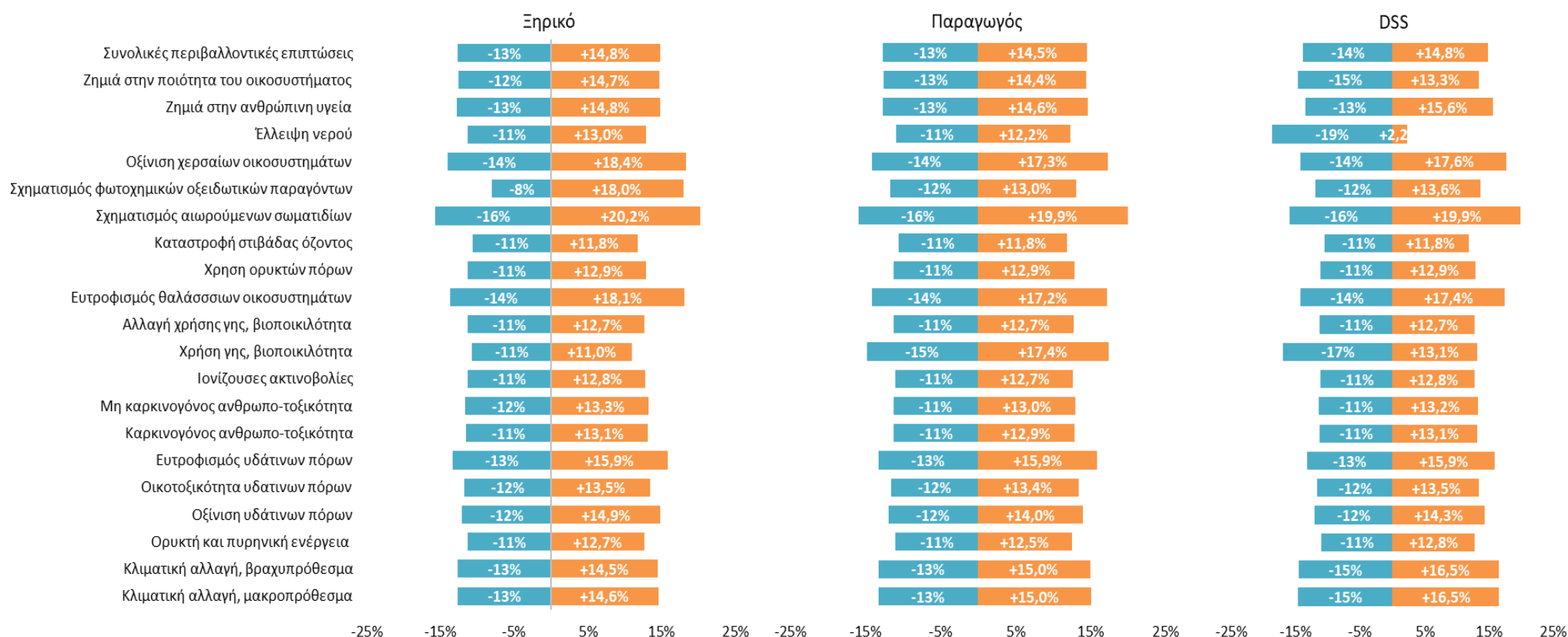
Αναλύοντας τις επιπτώσεις όταν η λειτουργική μονάδα είναι το 1 ha ελαιώνα (Πίνακας 3.8) το ξηρικό σύστημα καλλιέργειας έχει τη χαμηλότερη περιβαλλοντική επίδραση. Με βάση τα σταθμισμένα αποτελέσματα, η κλιματική αλλαγή, ο σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων, η οξίνιση και η έλλειψη νερού (water scarcity) ήταν οι κατηγορίες όπου σημειώθηκαν οι μεγαλύτερες επιπτώσεις και συνεισέφεραν περισσότερο στο αποτύπωμα LCA.

3.4.4 Ανάλυση αβεβαιότητας

Η ανάλυση Monte Carlo (Διάγραμμα 3.3) έδειξε ότι η αβεβαιότητα ήταν σχετικά χαμηλή για τις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων με ένα εύρος διακύμανσης 10-20%. Ο Πίνακας 3.9 παρουσιάζει τα αριθμητικά αποτελέσματα της ανάλυσης αβεβαιότητας με τη μέθοδο της εξομοίωσης Monte Carlo. Η ανάλυση αβεβαιότητας δείχνει ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις θα μπορούσαν να είναι περίπου 18% χαμηλότερες για τη φωτοχημική οξίνιση και 20% υψηλότερες για το σχηματισμό αιωρούμενων σωματιδίων.

Πίνακας 3.8 Αποτελέσματα των δεικτών επιπτώσεων τελικού σημείου και ενιαίο αποτέλεσμα (single scores) για 1 t παραγόμενου ελαιόκαρπου και 1 ha καλλιεργήσιμης έκτασης ελαιώνα στην πεδιάδα της Άρτας για τα ξηρικά, τη συμβατική άρδευση (Παραγωγός) και τη DSS άρδευση (DSS).

Παράγοντες επιπτώσεων	Μονάδα	Ξηρικό	Παραγωγός	DSS
Ζημιά στην ανθρώπινη υγεία ανά 1 t ελαιόκαρπου				
Εκμηχάνιση	DALY	$4,18 \times 10^{-4}$	$2,00 \times 10^{-4}$	$2,11 \times 10^{-4}$
Λίπανση	DALY	$1,47 \times 10^{-3}$	$8,13 \times 10^{-4}$	$8,58 \times 10^{-4}$
Φυτοπροστασία	DALY	$1,93 \times 10^{-4}$	$9,24 \times 10^{-5}$	$9,75 \times 10^{-5}$
Χρήση γης	DALY	-	-	-
Άρδευση	DALY	0,00	$2,89 \times 10^{-4}$	$1,67 \times 10^{-4}$
Ζημιά στην ανθρώπινη υγεία ανά 1 ha ελαιώνα				
Εκμηχάνιση	DALY	$2,37 \times 10^{-3}$	$2,37 \times 10^{-3}$	$2,37 \times 10^{-3}$
Λίπανση	DALY	$8,35 \times 10^{-3}$	$9,63 \times 10^{-3}$	$9,63 \times 10^{-3}$
Φυτοπροστασία	DALY	$1,09 \times 10^{-3}$	$1,09 \times 10^{-3}$	$1,09 \times 10^{-3}$
Χρήση γης	DALY	-	-	-
Άρδευση	DALY	0,00	$3,42 \times 10^{-3}$	$1,88 \times 10^{-3}$
Ζημιά στο οικοσύστημα ανά 1 t ελαιόκαρπου				
Εκμηχάνιση	PDF.m ² .yr	93,2	44,6	47,0
Λίπανση	PDF.m ² .yr	349,9	191,3	201,9
Φυτοπροστασία	PDF.m ² .yr	46,7	22,3	23,6
Χρήση γης	PDF.m ² .yr	30,7	14,7	15,5
Άρδευση	PDF.m ² .yr	-	118,2	73,9
Ζημιά στο οικοσύστημα ανά 1 ha ελαιώνα				
Εκμηχάνιση	PDF.m ² .yr	527,7	527,7	527,7
Λίπανση	PDF.m ² .yr	1980,7	2265,1	2265,1
Φυτοπροστασία	PDF.m ² .yr	264,5	264,5	264,5
Χρήση γης	PDF.m ² .yr	173,7	173,7	173,7
Άρδευση	PDF.m ² .yr	-	1399,7	829,5
Συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά 1 t ελαιόκαρπου				
Εκμηχάνιση	EURO2003	44,0	21,03	22,19
Λίπανση	EURO2003	158,1	86,96	91,76
Φυτοπροστασία	EURO2003	20,9	9,97	10,52
Χρήση γης	EURO2003	4,3	2,05	2,17
Άρδευση	EURO2003	-	37,92	22,72
Συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά 1 ha ελαιώνα				
Εκμηχάνιση	EURO2003	248,9	248,9	248,9
Λίπανση	EURO2003	894,8	1029,6	1029,6
Φυτοπροστασία	EURO2003	118,0	118,0	118,0
Χρήση γης	EURO2003	24,3	24,3	24,3
Άρδευση	EURO2003	-	449,0	255,0



Διάγραμμα 3.3 Τα αποτελέσματα της Monte Carlo ανάλυση αβεβαιότητας για κάθε κατηγορία επιπτώσεων της IW+ μεθόδου για τα διαφορετικά συστήματα ελαιοκαλλιέργειας.

Πίνακας 3.9 Αποτελέσματα της ανάλυσης αβεβαιότητας με τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo.

Κατηγορίες επιπτώσεων	Μονάδα/t	Ξηρικό		Άρδευση Παραγωγού		DSS Άρδευση	
		5%	95%	5%	95%	5%	95%
Κλιματική αλλαγή, μακροπρόθεσμα	kg CO ₂ eq (long)	501,7	658,4	347,6	461,1	336,8	459,7
Κλιματική αλλαγή, βραχυπρόθεσμα	kg CO ₂ eq (short)	514,1	674,2	355,4	471,0	344,2	469,2
Ορυκτή και πυρηνική ενέργεια	MJ deprived	2334,8	2967,1	1820,5	2301,4	1586,3	2011,6
Οξίνιση υδάτινων πόρων	kg SO ₂ eq	5,98 x 10 ⁻⁶	7,80 x 10 ⁻⁶	3,64 x 10 ⁻⁶	4,71 x 10 ⁻⁶	3,47 x 10 ⁻⁶	4,51 x 10 ⁻⁶
Οικοτοξικότητα υδατινων πόρων	CTUe	25817,3	33174,8	13029,8	16721,5	13422,8	17238,2
Ευτροφισμός υδάτινων πόρων	kg PO ₄ P-lim eq	0,046	0,06159	0,022	0,02971	0,023	0,03123
Καρκινογόνος ανθρωπο- τοξικότητα	CTUh	4,10E-07	5,24 x 10 ⁻⁷	2,70 x 10 ⁻⁷	3,43 x 10 ⁻⁷	2,50 x 10 ⁻⁷	3,18 x 10 ⁻⁷
Μη καρκινογόνος άνθρωπο-τοξικότητα	CTUh	2,22 x 10 ⁻⁵	2,85 x 10 ⁻⁵	1,47 x 10 ⁻⁵	1,87 x 10 ⁻⁵	1,36 x 10 ⁻⁵	1,74 x 10 ⁻⁵
Ιονίζουσες ακτινοβολίες	Bq C-14 eq	2874,0	3650,7	1706,5	2162,1	1642,7	2084,7
Χρήση γης, βιοποικιλότητα	m ² arable land eq .yr	41,36	51,4	18,94	26,1	19,43	26,5
Αλλαγή χρήσης γης, βιοποικιλότητα	m ² arable land eq	0,197	0,25	0,098	0,12	0,102	0,13
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων	kg N N-lim eq	0,222	0,30	0,109	0,15	0,114	0,16
Χρήση ορυκτών πόρων	kg deprived	2,855	3,6	1,409	1,8	1,466	1,9
Καταστροφή στιβάδας όζοντος	kg CFC-11 eq	1,02 x 10 ⁻⁴	1,27 x 10 ⁻⁴	5,35 x 10 ⁻⁵	0,0	5,41 x 10 ⁻⁵	6,77 x 10 ⁻⁵
Σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων	kg PM2.5 eq	0,272	0,4	0,130	0,2	0,137	0,2
Σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών παραγόντων	kg NMVOC eq	1,849	2,4	0,983	1,3	0,988	1,3
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO ₂ eq	1,41 x 10 ⁻²	1,94 x 10 ⁻²	7,34 x 10 ⁻³	1,00 x 10 ⁻²	7,45 x 10 ⁻³	1,02 x 10 ⁻²
Έλλειψη νερού	m ³ world eq	8064,491	10,261,2	20,897,163	26,349,0	13,980,649	17,576,5
Ζημιά στην ανθρώπινη υγεία	DALY	1,82 x 10 ⁻³	2,39 x 10 ⁻³	1,22 x 10 ⁻³	1,60 x 10 ⁻³	1,15 x 10 ⁻³	1,54 x 10 ⁻³
Ζημιά στην ποιότητα του οικοσυστήματος	PDF.m2.yr	455,6	597,3	342,0	447,3	308,9	410,2
Συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις	EURO2003	198,4	260,8	137,9	180,9	128,6	171,5

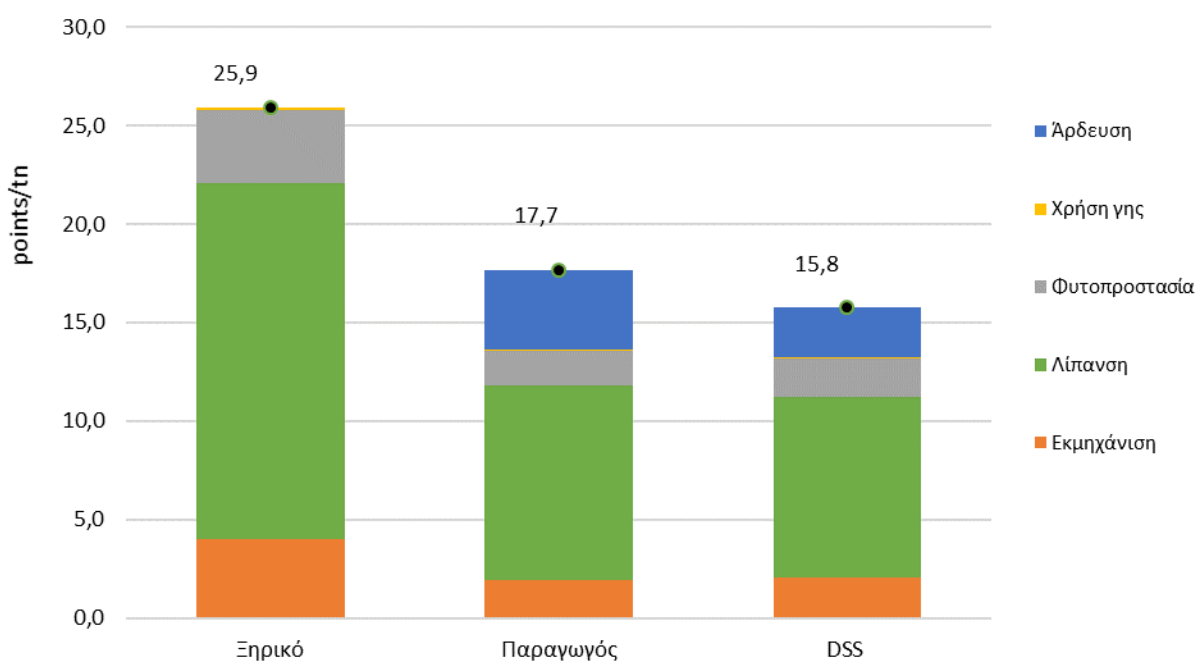
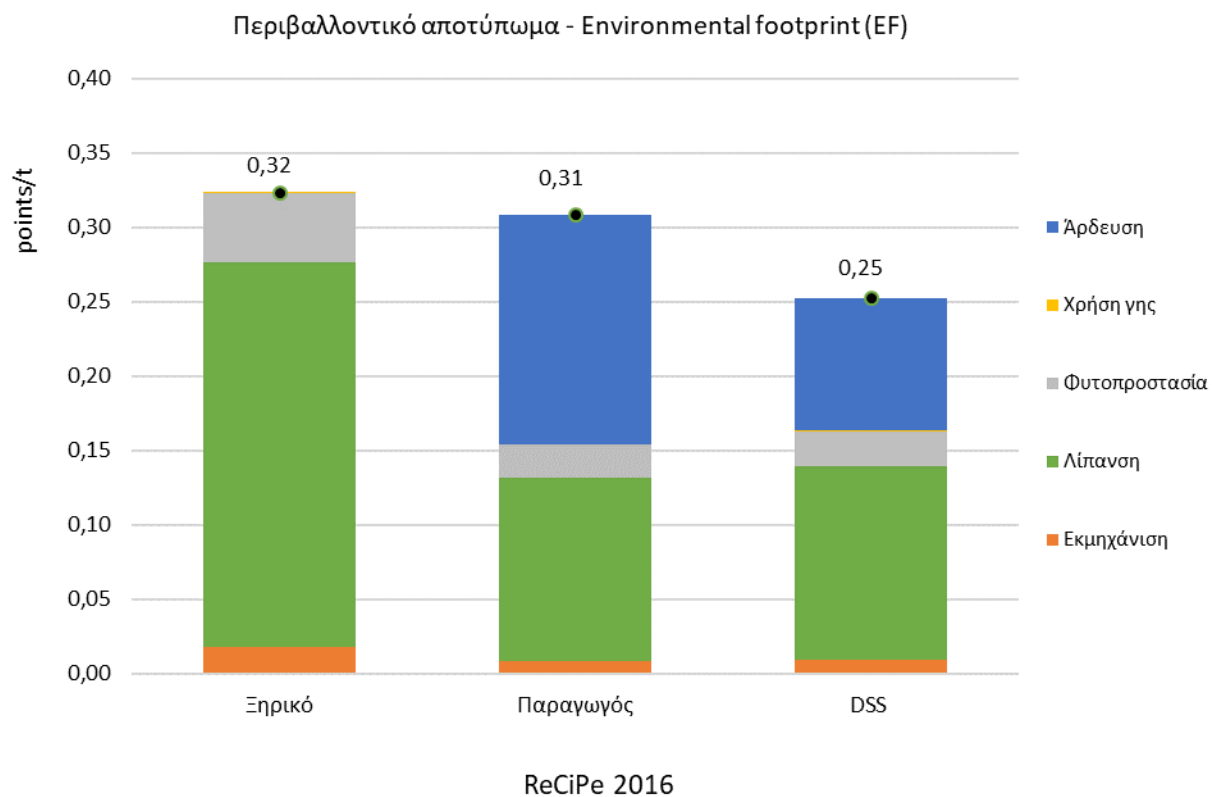
3.4.5 Ανάλυση ευαισθησίας της μεθόδου LCA

Πέρα από τη μέθοδο Impact World+, οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις υπολογίστηκαν με βάση τη μέθοδο ReCiPe 2016 (Huijbregts et al., 2017) και του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος (Environmental Footprint – EF) (Sala et al., 2018) για την επικύρωση της αξιοπιστίας των παραπάνω αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα ως ενιαίο αποτέλεσμα (single score) φαίνονται στο Διάγραμμα 3.4 και συνοψίζονται στον Πίνακα 3.10 και στον Πίνακα 3.11.

Στο μέσο σημείο, σημειώθηκε μια παρόμοια τάση με τα αποτελέσματα της IMPACTWorld+, επιβεβαιώνοντας ότι οι αρδευόμενες καλλιέργειες έχουν χαμηλότερο αποτύπωμα για ένα τόνο παραγόμενου ελαιόκαρπου και υψηλότερο για ένα εκτάριο ελαιώνα. Όπως αναμενόταν οι συνεισφορές στο συνολικό αποτύπωμα διαφέρουν ανάλογα τη μέθοδο. Ωστόσο, τα συνολικά αποτελέσματα και από τη βασική ανάλυση αλλά και την ανάλυση ευαισθησίας επιβεβαιώνουν ότι η DSS άρδευση είναι η πρακτική με τη χαμηλότερη περιβαλλοντική επίπτωση.

Τα συνολικά οφέλη από την άρδευση βάση DSS σε σύγκριση με τη συμβατική άρδευση για 1 t προϊόντος ήταν διαφορετικά ανάμεσα στις μεθόδους 5,3% (IMPACTWorld+), 10,7% (ReCiPe 2016), και 18,1% (EF μέθοδος). Σε επίπεδο καλλιεργούμενης έκτασης (1 ha), τα οφέλη αυτά γίνονται 10, 4% (IMPACTWorld+), 17% (ReCiPe 2016), and 22,6% (EF μέθοδος).

Σε όλες τις μεθόδους τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η λίπανση παραμένει η μεγαλύτερη πηγή περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η μέθοδος του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος παρέχει υψηλότερα οφέλη, καθώς δίνει έμφαση περισσότερο στην κατηγορία επιπτώσεων χρήσης νερού και άρα και στην άρδευση. Η μέθοδος ReCiPe 2016 επιβεβαιώνει ότι η λίπανση είναι η κύρια συνεισφορά με πιο σημαντικές τις κατηγορίες επιπτώσεων: σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων, θέρμανση πλανήτη, και τοξικότητα ανθρώπου.



Διάγραμμα 3.4 Η συνεισφορά των επί μέρους διαδικασιών στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ελαιοκαλλιέργειας ως ενιαίο αποτέλεσμα (single score) εφαρμόζοντας τις μεθόδους LCA EF 3.0 και ReCiPe 2016.

Πίνακας 3.10 Τα αποτελέσματα της LCA με τη μέθοδο ReCiPe 2016l.

Κατηγορία επιπτώσεων	Μονάδα / ha	Ξηρικό	Άρδευση Παραγωγού	DSS Άρδευση
Σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων - Fine particulate matter formation	kg PM2,5 eq	1,24	0,74	0,72
Έλλειψη ορυκτών πόρων - Fossil resource scarcity	kg oil eq	87,92	66,23	61,51
Οικοτοξικότητα υδάτων - Freshwater eco-toxicity	kg 1,4-DCB eq	27,94	18,32	17,32
Ευτροφισμός υδάτων - Freshwater eutrophication	kg P eq	0,19	0,24	0,18
Αύξηση θερμοκρασίας πλανήτη - Global warming	kg CO ₂ eq	398,89	327,74	246,10
Καρκινογόνος ανθρωπο-τοξικότητα - Τοξικότητα Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB eq	8,20	10,64	8,27
Μη καρκινογόνος ανθρωπο-τοξικότητα - Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB eq	540,80	395,60	359,67
Ιονίζουσα ακτινοβολία - Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	22,56	14,56	14,05
Χρήση γης - Land use	m ² a crop eq	5,60	3,28	3,31
Τοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστημάτων - Marine eco-toxicity	kg 1,4-DCB eq	20,13	16,53	14,48
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων - Marine eutrophication	kg N eq	2,20	1,12	1,17
Έλλειψη πορων - Mineral resource scarcity	kg Cu eq	4,00	1,97	2,09
Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία - Ozone formation, human health	kg NOx eq	1,29	0,76	0,72
Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα - Ozone formation, terrestrial ecosystems	kg NOx eq	1,31	0,77	0,73
Καταστροφή στιβάδας όζοντος στη στρατόσφαιρα - Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	5,73 x 10 ⁻³	5,23 x 10 ⁻³	2,80 x 10 ⁻³
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων - Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	6,16	3,30	3,38
Τοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων - Terrestrial eco-toxicity	kg 1,4-DCB	989,15	589,35	580,90
Κατανάλωση νερού - Water consumption	m ³ consumed	7,09	214,18	127,96
Ανθρώπινη υγεία - Human health	DALY	1,41 x 10 ⁻³	9,47 x 10 ⁻⁴	8,49 x 10 ⁻⁴
Οικοσυστήματα - Ecosystems	species.yr	3,54 x 10 ⁻⁶	2,86 x 10 ⁻⁶	2,39 x 10 ⁻⁶
Πόροι - Resources	USD2013	33,20	19,89	20,22
Ενιαίο αποτέλεσμα - Single score	point (pt)	25,93	17,69	15,78

Πίνακας 3.11 Τα αποτελέσματα LCA με τη μέθοδο του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος (EF).

Κατηγορία επιπτώσεων	Μονάδα / ha	Ξηρικό	Άρδευση Παραγωγού	DSS Άρδευση
Οξίνιση - Acidification	mol H+ eq	12,2	6,0	6,3
Κλιματική αλλαγή - Climate change	kg CO2 eq	584,2	315,7	316,2
Οικοτοξικότητα, ύδατα - Ecotoxicity, freshwater	CTUe	24803,8	12084,6	12665,4
Ευτροφισμός, ύδατα - Eutrophication, freshwater	kg P eq	0,68	0,33	0,35
Ευτροφισμός, θαλάσσια οικοσυστήματα - Eutrophication, marine	kg N eq	52,70	25,44	26,78
Ευτροφισμός χερσαία οικοσυστήματα - Eutrophication, terrestrial	mol N eq	9,47	4,77	4,92
Καρκινογόνος ανθρωπο-τοξικότητα - Human toxicity, cancer	CTUh	$1,03 \times 10^{-6}$	$5,04 \times 10^{-7}$	$5,28 \times 10^{-7}$
Μη καρκινογόνος ανθρωπο-τοξικότητα - Human toxicity, non-cancer	CTUh	$7,79 \times 10^{-6}$	$3,85 \times 10^{-6}$	$4,01 \times 10^{-6}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία - Ionizing radiation	kBq U-235 eq	30,548	20,75	18,99
Χρήση γης - Land use	Pt	3798,629	2146,09	1957,21
Καταστροφή στιβάδας όζοντος - Ozone depletion	kg CFC11 eq	$1,10 \times 10^{-4}$	$5,79 \times 10^{-5}$	$5,86 \times 10^{-5}$
Αιωρούμενα σωματίδια - Particulate matter	disease inc.	0,000	0,00	0,00
Φωτοχημικό όζον - Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	1,984	1,03	1,05
Χρήση ορυκτών πόρων - Resource use, fossils	MJ	4172,067	2516,58	2408,72
Χρήση ορυκτών πόρων και μετάλλων - Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	$2,46 \times 10^{-3}$	$1,19 \times 10^{-3}$	$1,25 \times 10^{-3}$
Χρήση νερού - Water use	m ³ depriv.	22909,296	31260,28	23352,64
Ενιαίο αποτέλεσμα - Single score	Point	0,32	0,308	0,252

3.5 Συμπεράσματα

Η παρούσα ενότητα εργασίας αποτελεί μια από τις λίγες μελέτες LCA που έχουν διεξαχθεί έως σήμερα για την καλλιέργεια επιτραπέζιας ελιάς στην Ελλάδα. Πέρα από την παροχή αριθμητικής πληροφορίας σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιδράσεις της ελαιοκαλλιέργειας, η LCA παρείχε καλύτερη κατανόηση των οφελών που προκύπτουν από την αξιοποίηση συστημάτων παροχής συμβουλής άρδευσης (DSS). Τα αποτελέσματα αναλύθηκαν σε δυο επίπεδα με βάση δυο λειτουργικές μονάδες: την ποσότητα του παραγόμενου προϊόντος αντικατοπτρίζοντας έτσι την παραγωγικότητα του κάθε συστήματος καλλιέργειας και την καλλιεργούμενη έκταση αντικατοπτρίζοντας την ένταση της παραγωγής. Οι αυξημένες ποσότητες τελικού προϊόντος ως αποτέλεσμα της εφαρμογής άρδευσης αντισταθμίζουν την αύξηση στο αποτύπωμα που συνδέεται με τις αυξημένες εισροές σε σύγκριση με τα ξηρικά συστήματα καλλιέργειας. Αυτό επιβεβαίωσε ότι τα συστήματα υψηλής παραγωγής μειώνουν το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με τα χαμηλής παραγωγής καλλιεργητικά συστήματα.

Από την άλλη πλευρά οι αρδευόμενοι ελαιώνες είναι πιο πιθανό να αυξήσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά μονάδα καλλιεργούμενης έκτασης. Η άρδευση με βάση το DSS σε σύγκριση με τη συμβατική άρδευση επέτρεψε τη σημαντική μείωση στη χρήση νερού και ηλεκτρικής ενέργειας κατά περίπου 42,1%. Αυτό μείωσε τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αρδευτικής διαδικασίας κατά 40% ανά μονάδα προϊόντος και κατά 43% ανά μονάδα έκτασης καλλιέργειας. Τα περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση του DSS στην άρδευση μειώθηκαν δραστικά όταν ελήφθησαν υπόψη όλες οι καλλιεργητικές διαδικασίες, καθώς η λίπανση ήταν αυτή που είχε τη μεγαλύτερη συνεισφορά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Γενικότερα, η παρούσα LCA έδειξε ότι η συνολική περιβαλλοντική επίδραση θα μπορούσε να μειωθεί κατά 5,3% ανά 1 t προϊόντος και 10,4% ανά 1 ha αν υιοθετηθούν οι έξυπνες καλλιεργητικές πρακτικές άρδευσης. Η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε ότι τα οφέλη θα μπορούσαν να είναι μεγαλύτερα. Αυτό τονίζει τα υποσχόμενα οφέλη της DSS άρδευσης η οποία μπορεί να μειώσει την ένταση των επιπτώσεων και να αυξήσει την απόδοση λόγω της αποτελεσματικότερης διαχείρισης των εισροών. Για να ενισχυθούν περισσότερο τα περιβαλλοντικά οφέλη, θα πρέπει να εστιάσουμε στην ανάπτυξη DSS συστημάτων που να βελτιώνουν την άρδευση αλλά και τη λίπανση. Τέλος, θα πρέπει να διεξαχθούν περαιτέρω μελέτες για να αναλυθεί η βιωσιμότητα των έξυπνων τεχνολογιών λαμβάνοντας υπόψη οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιδράσεις.

4 Κεφάλαιο 4^ο: Εκτίμηση της Ανάπτυξης, Φυσιολογικής Κατάστασης και Υδατικού Αποτυπώματος δενδρυλλίων ελιάς ποικιλίας Κονσερβολιάς Άρτας αρδευόμενες με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα

4.1 Περίληψη

Στην παρούσα εργασία ελέγχθηκε η καταλληλότητα των εναλλακτικών πηγών νερού για την άρδευση δενδρυλλίων ελιάς (*Olea europaea* L. 'Konservolea') και εκτιμήθηκε με τη χρήση περιβαλλοντικού δείκτη η βιωσιμότητα της εφαρμογής τους στα φυτώρια της Άρτας (ΒΔ Ελλάδα). Αρχικά αξιολογήθηκαν οι επιδράσεις των επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων στην ανάπτυξη και τη φυσιολογική κατάσταση των φυτών και συγκρίθηκε η επίδοσή τους με την αντίστοιχη των φυτών που αρδεύτηκαν με «καθαρό» νερό (νερό δικτύου) και των φυτών των οποίων το εδαφικό υπόστρωμα εμπλουτίστηκε με ζεόλιθο. Οι μετρήσεις ανάπτυξης αφορούσαν την αύξηση του ύψους, του αριθμού των φύλλων, της διαμέτρου του βλαστού και της βιομάζας, ενώ για την αξιολόγηση της φυσιολογικής κατάστασης των φυτών προσδιορίστηκαν οι συγκεντρώσεις των χρωστικών χλωροφύλλη α, χλωροφύλλη β, ολική χλωροφύλλη και καροτενοειδή, καθώς και δυο δείκτες καταπόνησης, η συγκέντρωση των ολικών φαινολικών και της προλίνης. Επιπλέον προσδιορίστηκαν στα φυτά (φυλλα και ρίζες) που δέχτηκαν τις διαφορετικές μεταχειρίσεις και στο εδαφικό υπόστρωμά τους η συγκέντρωση των μακρο και μικρο-θρεπτικών στοιχείων.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα φυτά που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα για τις περισσότερες παραμέτρους που μετρήθηκαν επέδειξαν καλύτερη επίδοση σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Δεν παρατηρήθηκε κάποια επιβλαβής επίδραση από την εφαρμογή του εναλλακτικού νερού, ενώ ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των ολικών φαινολικών και της προλίνης επιβεβαίωσε ότι η άρδευση με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα δεν επέφερε κάποια καταπόνηση στα φυτά.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε το Υδατικό Αποτύπωμα (WF) για τις δυο διαφορετικές πηγές νερού άρδευσης (καθαρό νερό από επιφανειακά ύδατα και επεξεργασμένα αστικά απόβλητα) εισάγοντας το διαχωρισμό του μπλε νερού με βάση την πηγή προέλευσής του έτσι ώστε να εξεταστεί η πιθανότητα της ελαχιστοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μέσω του περιορισμού της χρήσης των επιφανειακών υδάτινων πόρων. Η ανάλυση του υδατικού αποτυπώματος έδειξε ότι η εφαρμογή των εναλλακτικών πηγών άρδευσης αποτελεί σημαντικό μέτρο εξοικονόμησης μπλε νερού.

Τέλος υπολογίστηκε το WF σε δενδρύλλια ελιάς που αναπτύσσονται σε τοπικά φυτώρια, όπου εφαρμόζεται η συνήθης αρδευτική πρακτική της περιοχής, για να δοθεί μια πραγματική τάξη μεγέθους της συνεισφοράς των εναλλακτικών πηγών άρδευσης στην εξοικονόμηση και προστασία των υδάτινων πόρων της περιοχής. Η επικρατούσα αρδευτική πρακτική στα φυτώρια της περιοχής έδωσε ένα υδατικό αποτύπωμα δεκαπλάσιο του αντίστοιχου που υπολογίστηκε για τα δενδρύλλια του πειράματος, υπογραμμίζοντας την ανάγκη εισαγωγής και υιοθέτησης νέων, βιώσιμων πρακτικών άρδευσης στην περιοχή.

Με βάση τα ευρήματα της παρούσας εργασίας η εφαρμογή των επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων για την άρδευση θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε δενδρύλλια Κονσερβολιάς, τουλάχιστον για μικρή περίοδο της ανάπτυξής τους, ως μια ασφαλής και βιώσιμη εναλλακτική μέθοδος εξοικονόμησης και προστασίας των επιφανειακών υδάτινων πόρων.

4.2 Εισαγωγή

4.2.1 Ελαιοκαλλιέργεια επιτραπέζιες ελιές Άρτα Ελλάδα

Στην Ελλάδα, την τρίτη ελαιοπαραγωγό χώρα στον κόσμο μετά την Ισπανία και την Ιταλία, οι ελαιώνες καλύπτουν μια έκταση περίπου 1 εκατομμυρίου εκταρίων και παράγονται περισσότεροι από 2,8 εκατομμύρια τόνοι ελαιοκάρπου ετησίως (FAO, 2022b). Σε ό,τι αφορά τις επιτραπέζιες ελιές, η Ελλάδα είναι η δεύτερη παγκοσμίως παραγωγός χώρα μετά την Ισπανία. Το 2020 η εγχώρια παραγωγή επιτραπέζιας ελιάς πλησίασε τους 230000 τόνους (IOC, 2022), ενώ το 2021 η εξαγωγή ποσότητα ήταν περίπου 80000 (IOC, 2022). Μια από τις τρεις πιο σημαντικές επιτραπέζιες ποικιλίες ελιάς στην Ελλάδα, σε επίπεδο παραγωγής και εξαγωγών, είναι η Κονσερβολιά (*Olea europaea* L. 'Konservolea'). Απαντάται στην κεντρική ζώνη της Ελλάδας στις περιοχές της Θεσσαλίας, της Φθιώτιδας, της Αιτωλοακαρνανίας και της Ηπείρου. Στην πεδιάδα της Άρτας αποτελεί την κυρίαρχη ποικιλία επιτραπέζιας ελιάς και η ετήσια παραγωγή στην περιοχή συνεισφέρει κατά 8% στη συνολική παραγωγή της επιτραπέζιας ελιάς στην Ελλάδα. Στην περιοχή της Άρτας η έκταση των ελαιώνων αυξήθηκε τα τελευταία 12 χρόνια κατά 6,2%.

Η αυξανόμενη ζήτηση των ελαιοκομικών προϊόντων τις τελευταίες δεκαετίες είναι ο κύριος λόγος επέκτασης της ελαιοκαλλιέργειας στην Ελλάδα και στην περιοχή της Άρτας. Ως επί το πλείστο τα φυτώρια της περιοχής προμηθεύουν με νέα δενδρύλλια Κονσερβολιάς τους τοπικούς ελαιοπαραγωγούς για την εγκατάσταση των νέων ελαιώνων. Τα δενδρύλλια παράγονται με εμβολιασμό σε υποκείμενο αγριελιάς και διατηρούνται σε φυτώρια ανοικτά ή υπό κάλυψη τουλάχιστον ένα έτος μέχρι να μεταφυτευθούν στον αγρό. Η άρδευση στα φυτώρια αυτά πραγματοποιείται κυρίως με τη μέθοδο της πλημμύρας, μια πολύ υδροβόρα μέθοδο κατά την οποία το έδαφος του φυτωρίου γεμίζει με νερό μέχρι το ύψος των 15 περίπου cm και η περίσσεια νερού απορρίπτεται στον περιβάλλοντα χώρο μετά το πέρας της άρδευσης. Με δεδομένη την παγκόσμια πίεση στους υδάτινους πόρους τέτοια μη βιώσιμα αρδευτικά μοντέλα είναι ανάγκη να αντικατασταθούν από άλλες πρακτικές περισσότερο φιλο-περιβαλλοντικές, οι οποίες με γνώμονα τη διατήρηση της ποιότητας και της ποσότητας των υφιστάμενων υδάτινων πόρων θα πρέπει να προσανατολίζονται σε μια πιο ορθολογική διαχείρισή τους ή/και στην αντικατάστασή τους από εναλλακτικές πηγές άρδευσης.

4.2.2 Χρήση επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων για άρδευση

Η πρακτική της εφαρμογής επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων ως εναλλακτική πηγή νερού σε άνυδρες περιοχές έχει τις ρίζες της στην αρχαιότητα (Singh, 2021), ενώ το πρώτο οργανωμένο εγχείρημα στο σύγχρονο κόσμο καταγράφεται στην Καλιφόρνια στις αρχές του 19^{ου} αιώνα. Από τότε έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων αποβλήτων σε πολλά επίπεδα όπως το νομικό πλαίσιο, η υγιεινή, οι διαδικασίες επεξεργασίας και εξυγίανσης, η μεταφορά, κτλ. Σήμερα, με βάση τα δεδομένα του Παγκόσμιου Οργανισμού Τροφίμων και Γεωργίας (Food and Agriculture Organization, FAO) εφαρμόζονται $6773 \times 10^9 \text{ m}^3$

επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων για την άρδευση 4277×10^3 Ha καλλιεργήσιμης γης παγκοσμίως (FAO, 2022a).

Η εφαρμογή επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων για αρδευτικούς σκοπούς έχει ισχυρούς υποστηρικτές ανάμεσα στους φορείς πολιτικού σχεδιασμού αλλά και τους επιστήμονες παγκοσμίως, καθώς όχι μόνο δίνει τη δυνατότητα της ασφαλούς αντικατάστασης των επιφανειακών και υπογείων υδάτων αλλά σε πολλές περιπτώσεις ενισχύει την ανάπτυξη και παραγωγή των καλλιεργειών. Παρ' όλα αυτά όμως υπάρχει σκεπτικισμός σχετικά με τη χρήση του ο οποίος αφορά κυρίως τη δημόσια υγεία και τις επιδράσεις του στο σύμπλεγμα έδαφος-νερό-φυτό. Στις επόμενες παραγράφους παρατίθενται οι επιδράσεις της εφαρμογής των επεξεργασμένων λυμάτων για την άρδευση καλλιεργειών στο έδαφος, τα φυτά, το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

4.2.2.1 Έδαφος

4.2.2.1.1 Θρεπτικά συστατικά

Είναι μεγάλο το πλήθος των ερευνητικών εργασιών που αποδεικνύουν ότι τα επεξεργασμένα απόβλητα περιέχουν σημαντικές ποσότητες μακρο- και μικρο-στοιχείων τα οποία εμπλουτίζουν το έδαφος με την άρδευση και είναι διαθέσιμα για πρόσληψη από τα φυτά (Ofori et al., 2021, Hashem and Qi, 2021, Singh, 2021). Λόγω της σύνθεσής τους, τα επεξεργασμένα απόβλητα αποτελούν σημαντική πηγή αζώτου, φωσφόρου, καλίου και ιχνοστοιχείων, όπως ψευδάργυρος, σίδηρος, μαγγάνιο και χαλκός, ενώ παράλληλα διευκολύνουν την προσρόφηση των θρεπτικών αυτών από τα φυτά (Vergine et al., 2017a, Seleiman et al., 2021, Shtull-Trauring et al., 2022). Τα επεξεργασμένα απόβλητα μπορούν να εφαρμοστούν ως λίπασμα μειώνοντας έτσι τις ποσότητες συνθετικών λιπασμάτων που απαιτείται να χορηγηθούν στην καλλιέργεια αποφεύγοντας έτσι την επιπλέον περιβαλλοντική ρύπανση. Επιπρόσθετα χρησιμοποιώντας μέρος των επεξεργασμένων αποβλήτων που διαφορετικά θα κατέληγαν στους υδατικούς αποδέκτες μειώνει τη ρύπανση και τον ευτροφισμό που αυτή η πρακτική συνεπάγεται.

Από την άλλη πλευρά, η υψηλή συγκέντρωση κατιόντων ή ανιόντων στα επεξεργασμένα αστικά απόβλητα αυξάνουν την αλατότητα του εδάφους που θεωρείται σημαντική απειλή για την ανάπτυξη και υγεία των φυτών (Vergine et al., 2017). Η περίσσεια αλάτων στο ριζόστρωμα αυξάνει την ωσμωτική καταπόνηση των φυτών με αποτέλεσμα τη μείωση της ανάπτυξής τους η ακόμα και την ξήρανσή τους (Ofori et al., 2021). Όταν η παρουσία των θρεπτικών στο έδαφος ξεπερνάει ένα συγκεκριμένο για κάθε καλλιέργεια όριο, προκαλούνται φυτοτοξικότητες (Hashem & Qi, 2021). Η συσσώρευση αλάτων στο έδαφος, λόγω της μακροχρόνιας εφαρμογής των επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων, υποβαθμίζει τη δομή του και επηρεάζει αρνητικά τις υδραυλικές ιδιότητές του (Bedbabis et al., 2014, Tunc and Sahin, 2015). Η συσσώρευση νατρίου και διττανθρακικών ιόντων και το αυξημένο pH επηρεάζουν το βαθμό διήθησης, την υδραυλική αγωγιμότητα και την υδατοϊκανότητα του εδάφους (Elfanssi, Ouazzani, & Mandi, 2018).

4.2.2.1.2 Οργανική ουσία

Τα επεξεργασμένα αστικά απόβλητα περιέχουν υψηλότερη ποσότητα οργανικής ουσίας σε σύγκριση με άλλες πηγές νερού (Becerra-Castro et al., 2015, Farhadkhani et al., 2018), με αποτέλεσμα η εφαρμογή τους στο έδαφος να βελτιώνει την ποιότητα του εδάφους μέσω της βελτίωσης της συνοχής και της σταθερότητάς του, την προστασία από φαινόμενα οξίνισης, αλλά

και την ενίσχυση της ανακύκλωσης και διαθεσιμότητας των θρεπτικών συστατικών (Murphy, 2015). Ως τροφή των μικροοργανισμών που δραστηριοποιούνται στο έδαφος, ο οργανικός άνθρακας βελτιώνει τη σταθερότητα του εδάφους μέσω της ενέργειας που παρέχει στους μικροοργανισμούς ώστε να σχηματίζουν εδαφικά συσσωματώματα. Αυτό σε συνδυασμό με το πορώδες του εδάφους προάγει τον αερισμό του αλλά και τη διήθηση του νερού σε αυτό εξασφαλίζοντας καλές συνθήκες ανάπτυξης των φυτών αλλά και προστασία από φαινόμενα λιμνάζοντος νερού στον αγρό σε περίπτωση ισχυρών βροχοπτώσεων (Ofori et al., 2021).

4.2.2.1.3 Πληθυσμοί μικροβίων

Η άρδευση με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα επηρεάζει τον πληθυσμό και την ποικιλομορφία των μικροοργανισμών στο έδαφος καθώς και τη δραστηριότητά τους. Πολλοί ερευνητές παρατήρησαν αύξηση του πληθυσμού των μικροοργανισμών και της ποικιλομορφίας τους με την εισαγωγή νέων ειδών (Farhadkhani et al., 2018, Guedes et al., 2022) έπειτα από άρδευση με επεξεργασμένα απόβλητα. Αυτό αποδίδεται στην αυξημένη περιεκτικότητα των επεξεργασμένων αποβλήτων σε οργανική ουσία όπως συμπεραίνεται από την ταυτόχρονη αύξηση της διυδρογονάνσης που αποτελεί γενικά ενδεικτική παράμετρο της βιολογικής οξειδωσης της οργανικής ουσίας (Frenk et al., 2014, Becerra-Castro et al., 2015) και τις αλλαγές στη χημεία του εδάφους και τη φυσιολογία των φυτών που προκαλεί η εφαρμογή αυτού του τύπου των υδάτων (Zolti et al., 2019, Guedes et al., 2022). Επιπλέον, παρατηρήθηκε αύξηση της δραστηριότητας των μικροοργανισμών (Becerra-Castro et al., 2015) όπως συμπεραίνεται από την αύξηση της δραστηριότητας κάποιων ενζύμων (φωσφατάση, κυτταρινάση κτλ.) (Frenk et al., 2014). Λαμβάνοντας υπόψη το ρόλο των μικροβίων στο έδαφος, η εφαρμογή επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων προάγει τη γονιμότητα των εδαφών και την ανάπτυξη των φυτών (Dang et al., 2019). Επιπρόσθετα τα επεξεργασμένα απόβλητα μπορεί να περιέχουν ωφέλιμα βακτήρια που δρουν ως παράγοντες αποκατάστασης των εδαφών από ρυπαντές όπως εντομοκτόνα, βαρέα μέταλλα, αντιβιοτικά, κ.τ.λ. (Becerra-Castro et al., 2015).

Από την άλλη κάποιοι ερευνητές έχουν παρατηρήσει είτε μείωση του πληθυσμού και της δραστηριότητας των μικροοργανισμών στο έδαφος έπειτα από άρδευση με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα (Kavikcioglu, 2012) είτε καμία επίδραση (Becerra-Castro et al., 2015, Ibekwe et al., 2018, Guedes et al., 2022). Αυτή η μείωση εξηγείται με το γεγονός ότι πέρα από οργανική ουσία και θρεπτικά συστατικά τα επεξεργασμένα απόβλητα περιέχουν και σημαντικούς ρυπαντές όπως τα βαρέα μέταλλα η παρουσία των οποίων μπορεί να δράσει ανασχετικά στην αύξηση του πληθυσμού και της δραστηριότητας των μικροοργανισμών στο έδαφος (Becerra-Castro et al., 2015). Η αύξηση και ο εμπλουτισμός του μικροβιακού πληθυσμού δεν συνδέονται πάντα με θετικές επιπτώσεις καθώς μπορεί να αλλάξουν τη δομή του εδάφους επηρεάζοντας τις ιδιότητές του όπως τη μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας (Becerra-Castro et al., 2015). Επιπλέον η είσοδος στο έδαφος μέσω της άρδευσης με επεξεργασμένα απόβλητα επιβλαβών μικροοργανισμών ή οργανισμών ανθεκτικών σε αντιμικροβιακά ή αντιβιοτικά προκαλεί ανησυχία σχετικά με τη δημόσια υγεία (Kamprouris et al., 2021).

4.2.2.2 Φυτό

4.2.2.2.1 Ανάπτυξη

Η παρουσία θρεπτικών συστατικών σε υψηλότερες συγκεντρώσεις και η αυξημένη οργανική ουσία στα επεξεργασμένα απόβλητα σε σύγκριση με τα επιφανειακά ή υπόγεια ύδατα,

εμπλουτίζει τα εδάφη και προάγει τη γονιμότητά τους ενισχύοντας έτσι την ανάπτυξη των φυτών και τις τελικές τους αποδόσεις. Τα θρεπτικά συστατικά που περιέχονται στα επεξεργασμένα αστικά απόβλητα προέρχονται από τον ίδιο τον άνθρωπο καθώς και τα προϊόντα που χρησιμοποιεί. Πέρα από την αναμενομένη αμμωνία που αποτελεί κύριο προϊόν της μεταβολικής δραστηριότητας των ανθρώπων, στα επεξεργασμένα απόβλητα περιέχονται ποσότητες φωσφόρου, καλίου και βορίου ως συστατικά των απορρυπαντικών που χρησιμοποιεί καθημερινά. Η περιεκτικότητα σε N, P, και K των αστικών αποβλήτων έπεται από δευτερογενή επεξεργασία κυμαίνεται από 20 έως 60 mg L⁻¹, 6 έως 15 mg L⁻¹ και 10 έως 30 mg L⁻¹, αντίστοιχα (Hashem & Qi, 2021).

Σε πληθώρα εργασιών έπεται από την ενδελεχή ανασκόπηση των Ofori et al. (2021), Singh et al. (2021), Hashem and Qi (2021) και Lyu et al. (2022) σημειώνεται η αύξηση στη βιομάζα, στην ταχύτητα ανάπτυξης και την τελική παραγωγή καλλιέργειών που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα. Η θετική αυτή επίδραση οφείλεται στην άμεση διαθεσιμότητα και προσρόφηση των θρεπτικών που εξασφαλίζουν τα επεξεργασμένα απόβλητα (Vergine et al., 2017).

Η διευκόλυνση που προσφέρουν τα επεξεργασμένα απόβλητα στην απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών οφείλεται στο γεγονός ότι τα θρεπτικά στοιχεία περιέχονται σε αυτά όχι με τη μορφή ουδέτερων στοιχείων αλλά με τη μορφή ιόντων. Έτσι το άζωτο βρίσκεται με τη μορφή νιτρικών και αμμωνίας, ο φώσφορος με τη μορφή φωσφορικών και το κάλιο με τη μορφή ιόντων καλίου, μορφές οι οποίες μπορούν να προσροφηθούν εύκολα και άμεσα από τα φυτά (Ofori et al., 2021).

Υπάρχουν όμως και κάποιες εργασίες οι οποίες αναφέρουν ότι δεν παρατηρήθηκε διαφορά στην ανάπτυξη ή την τελική παραγωγή των φυτών που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα σε σύγκριση με αυτά που αρδεύτηκαν με καθαρό νερό (Vergine et al., 2017) ούτε αύξηση του περιεχομένου του εδάφους σε μακρο-στοιχεία (Hashem & Qi, 2021). Αυτό συνδέεται με τη σύνθεση των επεξεργασμένων αποβλήτων και το χρόνο εφαρμογής της άρδευσης με αυτά (Wang, Li, & Li, 2017).

4.2.2.2.2 Τοξικότητες

Η επάρκεια θρεπτικών συστατικών είναι ευνοϊκή για την ανάπτυξη των φυτών, η περίσσεια όμως αυτών οδηγεί σε φαινόμενα τοξικότητας που αναστέλλουν την ανάπτυξη των φυτών ή οδηγούν μέχρι και στο θάνατό τους. Τα επεξεργασμένα απόβλητα είναι δυνατόν να περιέχουν σε μεγαλύτερες του επιτρεπτού ορίου για κάποιες καλλιέργειες συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων με αποτέλεσμα να έχουν παρατηρηθεί φαινόμενα τοξικότητας (Hashem & Qi, 2021). Η αυξημένη ποσότητα μακρο-στοιχείων απαραίτητων για την ανάπτυξη των φυτών, ανακόπτει τη φυσιολογική ανάπτυξη των φυτών. Έτσι περίσσεια αζώτου οδηγεί σε καθυστερημένη ωρίμανση και αδύναμους βλαστούς, η περίσσεια φωσφόρου παρεμποδίζει την πρόσληψη ψευδαργύρου και η περίσσεια καλίου μειώνει την πρόσληψη μαγνησίου (Ofori et al., 2021).

Στα επεξεργασμένα απόβλητα χαλκός, νικέλιο, ψευδάργυρος και σίδηρος είναι τα πιο συχνά απαντώμενα μικρο-στοιχεία (Becerra-Castro et al., 2015), αλλά και μόλυβδος και κάδμιο επίσης συναντώνται συχνά σε μεγάλες συγκεντρώσεις (Hashem & Qi, 2021). Η περίσσεια των βαρέων μετάλλων στο νερό άρδευσης ή στο έδαφος ζημιώνει άμεσα και έμμεσα την ανάπτυξη των φυτών. Ο μόλυβδος και το κάδμιο σε υψηλές συγκεντρώσεις εμποδίζουν την ανάπτυξη των φυτών και εμπλέκονται σε φυσιολογικές διεργασίες τους εμποδίζοντας το μεταβολισμό τους

(Gatta et al., 2018, Hashem and Qi, 2021). Η αυξημένη προσρόφηση ψευδαργύρου προκαλεί φτωχή βλάστηση, χλώρωση των φύλλων και ξήρανση των παλαιότερων φύλλων (Hashem & Qi, 2021). Οι υψηλές συγκεντρώσεις βορίου επηρεάζουν τον πληθυσμό των μικροοργανισμών στο έδαφος και τις φυσιολογικές τους διεργασίες (Becerra-Castro et al., 2015). Η πρόσληψη των βαρέων μετάλλων γίνεται κυρίως από το έδαφος και η μεταφορά τους εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους, την περιεχόμενη οργανική ουσία, το εδαφικό pH, την προσροφητική ικανότητα, καθώς και άλλες χημικές και φυσικές ιδιότητες του εδάφους (Hashem & Qi, 2021). Στα φυτά τα βαρέα μέταλλα αποθηκεύονται περισσότερο στα φύλλα παρά στους καρπούς (Gatta et al., 2018). Η επίδραση των υψηλών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων στη δημόσια υγεία περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.2.4

4.2.2.3 Περιβάλλον

Η εφαρμογή επεξεργασμένων αποβλήτων για την άρδευση των καλλιεργειών μειώνει την άντληση νερού από επιφανειακές ή υπόγειες πηγές συντελώντας έτσι στη διατήρηση των αποθεμάτων γλυκού νερού και μειώνοντας την πίεση που αυτά δέχονται σε παγκόσμιο επίπεδο. Αυτό αποτελεί το κύριο περιβαλλοντικό πλεονέκτημα της επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων αποβλήτων στην άρδευση. Σε πολλές περιοχές που παρουσιάζουν έντονο πρόβλημα λειψυδρίας όπως το Ισραήλ, η Κίνα ή η Αυστραλία η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αποβλήτων αποτελεί συνήθη πρακτική (Ofori et al., 2021) αντισταθμίζοντας τις επιπτώσεις παρατεταμένων περιόδων ξηρασίας. Στο Ισραήλ συγκεκριμένα το 80% των επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων χρησιμοποιείται για την άρδευση των καλλιεργειών (Angelakis & Snyder, 2015).

Λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητάς τους σε θρεπτικά στοιχεία σε σύγκριση με άλλες πηγές νερού τα επεξεργασμένα αστικά απόβλητα μπορούν να μειώσουν ή και να αντικαταστήσουν σε κάποιες περιπτώσεις τη λίπανση όταν εφαρμόζονται ως πηγή άρδευσης στις καλλιέργειες. Εάν λάβουμε υπόψη το βαθμό επιβάρυνσης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων από την έκλυση των λιπασμάτων αντιλαμβανόμαστε το περιβαλλοντικό κέρδος που προκύπτει από την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων αποβλήτων (Ofori et al., 2021). Από την άλλη, εάν μέρος των αστικών αποβλήτων που θα απορρίπτονταν σε φυσικούς υδάτινους αποδέκτες χρησιμοποιηθεί έπειτα από επεξεργασία στις καλλιέργειες, τότε μειώνεται το φορτίο των ρυπαντών που ελευθερώνεται στο περιβάλλον (Ofori et al., 2021).

4.2.2.4 Δημόσια υγεία

Ο έντονος σκεπτικισμός που συναντά η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων στη γεωργία συνδέεται με τη δημόσια υγεία. Τα αστικά απόβλητα, εάν δεν υποστούν κατάλληλη και επαρκή επεξεργασία, περιέχουν παθογόνους μικροοργανισμούς, βαρέα μέταλλα, αναδυόμενους ρύπους (φαρμακευτικά κ.τ.λ.) και άλλες τοξικές ουσίες, οι οποίες συσσωρεύονται όχι μόνο στο έδαφος αλλά και στα εδάφιμα μέρη των φυτών (Mok et al., 2014, Deng et al., 2019, Lyu et al., 2022).

Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί που περιέχονται στα αστικά απόβλητα που δεν έχουν υποστεί επεξεργασία είναι κυρίως τα είδη *Salmonella* spp., *Escherichia coli*, *Legionella* spp νηματοειδείς του εντέρου και ιοί κυρίως αδεονοϊοί. Αυτά τα είδη μπορούν να υπάρχουν ακόμα και σε επεξεργασμένα αστικά απόβλητα εάν η επεξεργασία δεν είναι επαρκής (εάν για παράδειγμα δε συμπεριλαμβάνονται τεχνικές απολύμανσης στην επεξεργασία). Παρόλο που υπάρχουν

κανονισμοί και νομοθεσίες που διέπουν την επεξεργασία των αστικών αποβλήτων στις διάφορες χώρες, η συμμόρφωση σε αυτούς δεν είναι πάντα αυτονόητη. Οι Gatta et al. (2018) και οι Libutti et al. (2018) ανέφεραν υψηλές συγκεντρώσεις εντεροβακτηρίων και *E. coli* στα αστικά απόβλητα που δέχονται δευτερογενή επεξεργασία στην Ιταλία. Παρόμοιες αναφορές υπάρχουν και σε άλλες χώρες (Ofori et al., 2021). Πολλά ενδοφυτικά βακτήρια όπως αυτά του γένους *Staphylococcus* και αυτά της οικογένειας *Enterobacteriaceae* μπορούν να αποικίσουν και τον άνθρωπο (Becerra-Castro et al., 2015). Ο δρόμος εισόδου των παθογόνων αυτών είναι μέσω της κατανάλωσης ωμών λαχανικών ή καρπών των οποίων η επιφάνεια έχει έρθει σε επαφή με τα επεξεργασμένα απόβλητα (Becerra-Castro et al., 2015). Αυτό σημαίνει ότι ο τρόπος εφαρμογής των επεξεργασμένων αποβλήτων έχει μεγάλη σημασία στη μετάδοση των παθογόνων. Φυτά που αρδεύονται με υπόγειο σύστημα άρδευσης έχουν πολύ μικρότερη πιθανότητα να είναι επιμολυσμένα με παθογόνους μικροοργανισμούς σε σύγκριση με αυτά που αρδεύονται επιφανειακά και μάλιστα με τεχνητή βροχή ή μικρο-εκτοξευτήρες. Εδώ θα πρέπει να προσθέσουμε και την ύπαρξη στα αστικά απόβλητα των ανθεκτικών στα αντιβιοτικά βακτηρίων και γονιδίων τα οποία η άρδευση αποτελεί μέσο διάδοσής τους (Kamprouris et al., 2021) και μάλιστα ταχέως τα τελευταία χρόνια (Becerra-Castro et al., 2015).

Πέρα από τους παθογόνους μικροοργανισμούς τα αστικά απόβλητα περιέχουν όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως και υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων τα οποία συνδέονται με βλάβες σε ιστούς και στα κόκκαλα, με νεφρική ανεπάρκεια, με οστεοπόρωση, με καρκίνο του αίματος και των πνευμόνων, με μεταβολικές διαταραχές και αναιμία (Gatta et al., 2018). Παράλληλα η επιμόλυνση με φαρμακευτικές ουσίες ή άλλους αναδυόμενους ρύπους συνιστούν επίσης σημαντική απειλή για τη δημόσια υγεία (Deng et al., 2019).

Επιπρόσθετα του κινδύνου που προκύπτει από την κατανάλωση καρπών ή λαχανικών που έχουν δεχθεί επεξεργασμένα απόβλητα θα πρέπει να αναφερθεί και ο κίνδυνος από την απευθείας έκθεση των ανθρώπων που διαχειρίζονται αυτού του είδους τα νερά όπως είναι οι αγρότες αλλά και οι εργαζόμενοι στο δίκτυο επεξεργασίας και μεταφοράς αστικών αποβλήτων (Lonigro et al., 2016).

Έχοντας τα παραπάνω υπόψιν έχει αναπτυχθεί ένα σχετικό νομοθετικό και κανονιστικό πλαίσιο σε επίπεδο χωρών ή περιφερειών για την προστασία της δημόσιας υγείας. Στην Καλιφόρνια που αποτελεί και την πρώτη περιοχή που οργανωμένα επαναχρησιμοποιούνται τα επεξεργασμένα λύματα ήδη από τα αρχές του προηγούμενου αιώνα έχουν συνταχθεί τα «Κριτήρια Επαναχρησιμοποίησης Νερού» τα οποία αποτέλεσαν και τη βάση για την ανάπτυξη σχετικών οδηγιών ή νόμων στον υπόλοιπο κόσμο. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής η Εταιρεία Περιβαλλοντικής Προστασίας (Environmental Protection Agency, EPA) έχει εκδώσει οδηγίες για την επαναχρησιμοποίηση του συγκεκριμένου νερού. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (World Health Organization, WHO) διευκρινίζει τις προϋποθέσεις επαναχρησιμοποίησης των υδάτων στις οδηγίες για την ασφαλή χρήση των αστικών αποβλήτων και του Γκρίζου Νερού. Ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας (FAO) ήδη από το 1992 έχει περιγράψει στο FAO Paper 46 τις προϋποθέσεις εφαρμογής επεξεργασμένων αποβλήτων για την άρδευση (Pescod, 1992). Στην Ευρωπαϊκή Ένωση αναπτύχθηκε η οδηγία 2020/741 για τις ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας για την επαναχρησιμοποίηση των αστικών αποβλήτων, η οποία θέτει τα κοινά όρια για την επαναχρησιμοποίηση των αστικών αποβλήτων μεταξύ των χωρών της ΕΕ.

4.2.2.5 Κόστος εφαρμογής

Ένα επιπλέον στοιχείο που αξίζει να αναφερθεί είναι το κατά πόσο είναι οικονομικά εφικτή η εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων άρδευσης με επεξεργασμένα απόβλητα, καθώς απαιτούνται τεράστιες επενδύσεις για την επεξεργασία αλλά και μεταφορά τους (Giannoccaro et al., 2019). Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση οι Verlicchi et al. (2012) θεωρούν ότι το κόστος άντλησης και μεταφοράς του νερού για απόρριψη από το σημείο επεξεργασίας στον υδάτινο αποδέκτη είναι ψηλότερο από το αντίστοιχο κόστος μεταφοράς στις καλλιέργειες για επαναχρησιμοποίηση εάν αυτές είναι πιο κοντά. Γενικότερα δεδομένης της όλο και αυξανόμενης πίεσης στα παγκόσμια υδατικά αποθέματα, τα περιβαλλοντικά οφέλη από την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων μπορούν να αντισταθμίσουν το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας τέτοιων έργων.

4.2.2.6 Διαχείριση των αρνητικών επιπτώσεων της εφαρμογής των επεξεργασμένων αποβλήτων

Η κυριότερη αρνητική επίπτωση στο σύμπλεγμα έδαφος-νερό-φυτό που προκύπτει από την εφαρμογή των επεξεργασμένων αποβλήτων για άρδευση αφορά την αύξηση της αλατότητας του εδάφους. Η σοβαρότητα των αρνητικών επιπτώσεων αυτών συνδέεται άμεσα με τη σύνθεση των υδάτων αυτών (και πιο συγκεκριμένα την περιεκτικότητά τους σε θρεπτικά συστατικά), τη συχνότητα άρδευσης, τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του εδάφους, αλλά και τα χαρακτηριστικά των φυτών και την αντοχή τους στην αλατότητα (Ofori et al., 2021). Οι επιπτώσεις αυτές μπορούν να μετριαστούν ή ακόμα να εξαλειφθούν ένα εφαρμοστεί ένα εξειδικευμένο στις συνθήκες και την καλλιέργεια σχέδιο. Αυτό θα πρέπει να περιλαμβάνει επιλογή ανθεκτικών στην αλατότητα ειδών, αραίωση των επεξεργασμένων αποβλήτων με καθαρό νερό, έκπλυση δηλαδή άρδευση αποκλειστικά με καθαρό νερό ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου και προσαρμογή της εφαρμοζόμενης ποσότητας άρδευσης.

Σε ό,τι αφορά τα παθογόνα, που αποτελεί σημαντική ανησυχία για τη δημόσια υγεία, η κύρια δράση που προάγει την ασφαλή χρήση των επεξεργασμένων αποβλήτων είναι η κατάλληλη επεξεργασία που περιλαμβάνει μεθόδους εξυγίανσης για τη συμμόρφωση με τις σχετικές νομοθετικές απαιτήσεις. Η Ευρωπαϊκή οδηγία 2020/741 περιλαμβάνει και τους ενδεικνυόμενους τρόπους εφαρμογής της άρδευσης με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα. Έτσι τα εδάφιμα μέρη των καλλιεργειών που αρδεύονται με επεξεργασμένα απόβλητα επουδενί δεν πρέπει να έρχονται σε επαφή με αυτά. Στις περιπτώσεις αυτές τα επιτρεπόμενα συστήματα άρδευσης περιορίζονται μόνο στη στάγδην άρδευση επιφανειακή ή υπόγεια. Η επαρκής και ορθή επεξεργασία εξασφαλίζει επίσης την απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων ή τη συγκράτηση της συγκέντρωσής τους σε επιτρεπόμενα από τη νομοθεσία όρια. Προς το παρόν δεν υπάρχουν ακόμα όρια για τους αναδεδόμενους ρύπους (φαρμακευτικά κ.τ.λ.).

4.2.3 Δείκτες καταπόνησης φυτών

Η ξηρασία και η αλατότητα προκαλούν υπερβολική συγκέντρωση αλάτων στο έδαφος η οποία είτε άμεσα (λόγω της αλατότητας) είτε έμμεσα (λόγω της απώλειας νερού) καταλήγει σε ωσμωτική καταπόνηση. Ως αποτέλεσμα, το δυναμικό στο εδαφικό νερό μειώνεται σταδιακά με αποτέλεσμα να εμποδίζει και να σταματά τελικά τη ροή του νερού από το έδαφος στο εσωτερικό των ριζών. Η καταπόνηση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα το κλείσιμο των στομάτων, τη μείωση του ρυθμού φωτοσύνθεσης και την παρεμπόδιση της ανάπτυξης (Dar et al., 2015). Μέσα στο κύτταρο

οδηγεί στην αύξηση της παραγωγής των δραστικών μορφών οξυγόνου (Reactive Oxygen Species –ROS), όπως τα ανιόντα του σουπεροξειδίου (O_2^-), το υπεροξείδιο του υδρογόνου (H_2O_2), μονοατομικό οξυγόνο (O) και υδροξυλικές ρίζες (OH). Αυτές οι μορφές οξυγόνου προκαλούν υπεροξείδωση των λιπιδίων, καταστροφή των μεμβρανών, αποδόμηση των πρωτεϊνών, λύση του DNA και σε ακραίες περιπτώσεις κυτταρικό θάνατο (Kumar et al., 2020).

Οι φαινολικές ουσίες που είναι δευτερογενείς μεταβολίτες παίζουν κομβικό ρόλο στην άμυνα του φυτού, καθώς κατέχουν σημαντικές αντιοξειδωτικές ιδιότητες οι οποίες πρακτικά βοηθούν το φυτό να «καθαρίσει» τις ανωτέρω ROS (Varela et al., 2016, Kumar et al., 2020a). Συνεργιστικά με τις φαινολικές ουσίες λειτουργούν και οι προλίνες, αμινοξέα τα οποία είτε με την ωσμωλυτική δράση τους είτε με την ενίσχυση της δράσης των αντιοξειδωτικών κυττάρων προστατεύουν το φυτό από τις επιπτώσεις των ROS (Hayat et al., 2012).

Επομένως, η παρουσία των φαινολικών και τις προλίνες στο φυτό σημαίνει ότι αυτό υφίσταται κάποια βιοτική ή αβιοτική καταπόνηση και καθώς η συγκέντρωσή τους συνδέεται με την ένταση της καταπόνησης (Petridis et al., 2012) ο προσδιορισμός τους αποτελεί δείκτη της καταπόνησης των φυτών.

4.2.4 Χρήση ζεόλιθου

Οι ζεόλιθοι είναι ενυδατωμένα αργιλοπυριτικά υλικά τα οποία λόγω της δομής τους επιδεικνύουν υψηλή απορροφητική ικανότητα. Οι ζεόλιθοι αντιπροσωπεύουν ένα ευρύ φάσμα αργιλοπυριτικών υλικών φυσικής προέλευσης. Υπάρχουν πάνω από 40 είδη φυσικών ζεολίθων με τους κλινοπτιλολίτες να είναι οι πιο συχνοί (De Smedt et al., 2015), είναι όμως δυνατόν να παρασκευαστούν ζεόλιθοι και συνθετικά (Fukasawa et al., 2018). Η δομή τους θεωρείται ως ένα ανόργανο πολυμερές με βασική δομική ένωση το SiO_4^{4-} και το τετραεδρικό AlO_4^{5-} που συνδέονται με όλα τα άτομα οξυγόνου. Όταν κάποια Si_4^+ αντικατασταθούν από Al_3^+ , τότε φορτίζεται αρνητικά και κάνει δεσμούς με κατιόντα (De Smedt et al., 2015). Οι ζεόλιθοι χαρακτηρίζονται από την ευκολία συγκράτησης και απελευθέρωσης νερού και την ανταλλαγή κατιόντων (Jarosz et al., 2022). Στη γεωργία εφαρμόζονται στο έδαφος βελτιώνοντας τις φυσικές, χημικές και βιολογικές του ιδιότητες. Τα τελευταία χρόνια συνιστάται η εφαρμογή τους στο έδαφος λόγω της ικανότητάς τους να αποθηκεύουν νερό και επίσης να προσλαμβάνουν και να αποθηκεύουν θρεπτικά στοιχεία και να τα απελευθερώνουν αργά στο εδαφικό διάλυμα (Lopes et al., 2022)

4.2.5 Υδατικό αποτύπωμα

Ανάμεσα σε πολλά αποτελεσματικά εργαλεία που μπορούν να ενσωματωθούν σε σχέδια ορθολογικής άρδευσης, τα περισσότερα από τα οποία εστιάζουν στη διαχείριση της εδαφικής υγρασίας, το Υδατικό Αποτύπωμα (Water Footprint, WF) χρησιμοποιείται ευρέως κυρίως ως δείκτης της κατανάλωσης και ρύπανσης των υδάτων κατά τη διάρκεια των καλλιεργητικών διεργασιών. Το WF είναι ένα μέτρο της επίδρασης μιας διαδικασίας στην ποσότητα και ποιότητα των υδάτινων πόρων. Υπολογίζεται ως το άθροισμα τριών συστατικών, το πράσινο και μπλε WF, που αντίστοιχα, αναφέρονται στην κατανάλωση του νερού της βροχής και των επιφανειακών και υπόγειων υδάτινων πόρων, και του γκρίζου WF που αποτελεί τη θεωρητική ποσοτικοποίηση της ρύπανσης που προκαλεί μια διαδικασία στους υδάτινους αποδέκτες (Hoekstra et al., 2011). Σε μια καλλιεργητική διαδικασία το WF συνδέει την κατανάλωση του νερού μόνο με την ποσότητα που καλύπτει τις υδατικές ανάγκες του φυτού και όχι του συνολικού νερού που εφαρμόζεται

θεωρώντας ότι η περίσσεια νερού δε μπορεί να θεωρηθεί ότι «χάνεται», εφόσον επιστρέφει στην υδρολογική λεκάνη και δεν μεταφέρεται σε άλλη ή στη θάλασσα.

Η ανάλυση του WF περιλαμβάνει τέσσερα στάδια:

1. τον καθορισμό του σκοπού και του πλαισίου ανάλυσης του WF
2. τον υπολογισμό του WF
3. την ανάλυση βιωσιμότητας του WF και
4. τον καθορισμό των δράσεων.

Η ολοκληρωμένη ανάλυση του WF εντοπίζει τα κρίσιμα σημεία (hotspots) της χρήσης και ρύπανσης του νερού κατά τη διάρκεια μιας παραγωγικής διαδικασίας και οι δράσεις προς τη μείωση του WF μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για το σχεδιασμό μιας στρατηγικής ορθολογικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων σε συγκεκριμένο επίπεδο αναφοράς. Επομένως παρόλο που τις τελευταίες δεκαετίες έχει υπολογιστεί το WF για πολλά προϊόντα και διαδικασίες και είναι διαθέσιμα πολλά σχετικά σετ δεδομένων, δεν έχει τόση σημασία να εστιάσουμε στην απόλυτη αριθμητική τιμή του WF αλλά στη βιωσιμότητά του αναλύοντας τα συστατικά του αποτυπώματος και λαμβάνοντας υπόψη τους διαθέσιμους ανανεώσιμους υδατικούς πόρους της περιοχής αναφοράς (μελέτης).

Με βάση τη μεθοδολογία υπολογισμού του WF (Hoekstra et al., 2011) τα επεξεργασμένα απόβλητα συμπεριλαμβάνονται στο μπλε WF. Σύμφωνα με τον Dr. Rick Hogeboom, διευθυντή του WFN (προσωπική επικοινωνία, 16 Σεπτεμβρίου 2021), η λογική πίσω από τον υπολογισμό του WF είναι να μετρήσουμε πόσο νερό καταναλώνει μια δραστηριότητα, αδιαφορώντας για την πηγή αυτού του νερού εφόσον δεν εμπίπτει στη βασική διάκριση (πράσινο, μπλε και γκρίζο). Το μπλε WF θα είναι το ίδιο είτε το νερό προέρχεται από επιφανειακά ύδατα είτε από υπόγεια είτε από επεξεργασμένα απόβλητα κ.τ.λ. Ιδιαίτερη αναφορά στην πηγή του μπλε νερού μπορεί να γίνει στο στάδιο της ανάλυσης της βιωσιμότητας του WF. Οι Fridman et al. (2021) θεωρούν ότι η έλλειψη αυτής της διάκρισης με βάση την πηγή του νερού, οδηγεί από τη μία σε υπερεκτίμηση της ποσότητας κατανάλωσης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, και από την άλλη σε απώλεια πληροφορίας και σε μη αξιοποίηση σημαντικών δεδομένων που σχετίζονται είτε με την ενέργεια που δαπανάται για την απόκτηση των υδάτων αυτών είτε με τους επιπλέον κινδύνους που εισάγει η χρήση τους. Για το λόγο αυτό προτείνουν μια επέκταση του μπλε WF που να συμπεριλαμβάνει διακριτά την εκάστοτε πηγή του νερού (αφαλατωμένα ύδατα, επεξεργασμένα απόβλητα, βρόχινο νερό από συλλογή, κ.τ.λ.).

4.3 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας ενότητας εργασίας ήταν να γίνει η εκτίμηση της ανάπτυξης και της φυσιολογικής κατάστασης δενδρυλλίων ελιάς Κονσερβολιάς που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα. Με τη βοήθεια του υπολογισμού και της ανάλυσης του Υδατικού Αποτυπώματος (WF) δενδρυλλίων ελιάς Κονσερβολιάς που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα επιχειρήθηκε να γίνει εκτίμηση της βιωσιμότητας της χρήσης της εναλλακτικής αυτής πηγής άρδευσης. Η ανάλυση και διάκριση των συστατικών του μπλε υδατικού αποτυπώματος με βάση την πηγή προέλευσής τους είχε σκοπό να προσδιορίσει το περιβαλλοντικό κέρδος από την εφαρμογή των επεξεργασμένων αποβλήτων. Τέλος, η πρωτόλεια εκτίμηση του υδατικού αποτυπώματος των δενδρυλλίων ελιάς που αρδεύτηκαν με

την πρακτική των τοπικών φυτωρίων Κονσερβολιάς αποσκοπούσε στην απόδοση της τάξης μεγέθους της εξοικονόμησης επιφανειακών και υπογείων υδάτων μέσω της εφαρμογής εναλλακτικών πηγών άρδευσης στην περιοχή.

4.4 Υλικά και μέθοδοι

4.4.1 Πειραματική περιοχή και περίοδος

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε γυάλινο θερμοκήπιο με προσανατολισμό Δ-Α, στις εγκαταστάσεις της Πανεπιστημιούπολης του τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων στους Κωστακικούς Άρτας (39°0.7'N, 20°56'E, υψόμετρο 5 m).

Το κλίμα στην περιοχή είναι τυπικό μεσογειακό με βροχερούς χειμώνες και ζεστά και ξηρά καλοκαίρια. Η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 17,2 °C και η μέση ετήσια βροχόπτωση 1084 mm, η οποία συγκεντρώνεται κυρίως τους χειμερινούς μήνες.

Πραγματοποιήθηκε ένα προκαταρκτικό πείραμα την περίοδο από τον Μάη μέχρι τον Νοέμβρη 2019 ώστε να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της ανάπτυξης και της αντίδρασης των φυτών, ενώ το κύριο πείραμα πραγματοποιήθηκε από τον Μάη μέχρι τον Νοέμβρη του 2020.

4.4.2 Φυτικό Υλικό και πειραματικές συνθήκες

Το φυτικό πειραματικό υλικό συνιστούσαν 50 συνολικά νεαρά δενδρύλλια Κονσερβολιάς (*Olea europaea* L. – 'Konservolea') συνοδευόμενα από το πιστοποιητικό φυτοϋγείας τους. Τα δενδρύλλια ήταν μονόκλωνα και είχαν ένα μέσο ύψος περίπου 70 cm. Τα δενδρύλλια ήταν εμβολιασμένα σε υποκείμενο από σπορόφυτο αγριελιάς. Τα φυτά μεταφυτεύθηκαν σε γλάστρες 3 L. Το έδαφος πλήρωσης της κάθε γλάστρας λήφθηκε από την περιοχή και έπειτα από ανάλυση μηχανικής σύστασης που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εδαφολογίας του τμήματος προσδιορίστηκε ως αμμοπηλώδες. Η άρδευση πραγματοποιήθηκε με σύστημα μικρό-άρδευσης, όπου η παροχή των σταλακτών ήταν 4 L h⁻¹. Για την εφαρμογή της πλήρους λίπανσης ακολουθήθηκε η πρακτική της περιοχής και κάθε φυτό δέχθηκε 1,5 g λιπάσματος του τύπου 20-20-20. Μετά τη μεταφύτευση τα δενδρύλλια έμειναν σε σκιερό μέρος για ενάμιση μήνα. Κατά τη διάρκεια της περιόδου εγκλιματισμού τα φυτά αρδεύτηκαν με νερό δικτύου. Στη συνέχεια μεταφέρθηκαν στο θερμοκήπιο ώστε να προστατεύονται από τη βροχή και να μην επηρεαστεί το πείραμα (Εικόνα 4.1). Η μέση μηνιαία ελάχιστη θερμοκρασία στο θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου κυμάνθηκε από 15 έως 22,7 °C, ενώ η μέση μηνιαία μέγιστη θερμοκρασία κυμάνθηκε από 35,6 και 44,6 °C. Η μέση μηνιαία σχετική υγρασία έλαβε τιμές από 29% έως 78% και η μέση μηνιαία ακτινοβολία κυμάνθηκε από 4,7 έως 56 W m⁻²

4.4.3 Μεταχειρίσεις

Μετά την εγκατάστασή τους στο θερμοκήπιο τα φυτά δέχθηκαν τις ακόλουθες μεταχειρίσεις

1. Άρδευση με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα και εφαρμογή της πλήρους ποσότητας λίπανσης (Treated Waste Water -TWW)
2. Άρδευση με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα και εφαρμογή της μισής ποσότητας λίπανσης (Treated Waste Water and ½ Fertiliser - TWW1/2F)
3. Άρδευση με νερό δικτύου και εφαρμογή της πλήρους ποσότητας λίπανσης (Tap Water - TaW)

4. Άρδευση με το 75% της πλήρους ποσότητας άρδευσης και εφαρμογή της πλήρους ποσότητας λίπανσης (75% Tap Water - TaW75%)
5. Άρδευση με νερό δικτύου και προσθήκη 10% (v/v) ζεολίθου στο υπόστρωμα και εφαρμογή πλήρους ποσότητας λίπανσης (Zeolite)

Κάθε μεταχείριση περιελάμβανε δέκα επαναλήψεις (δέκα δενδρύλλια).



Εικόνα 4.1 Στιγμιότυπα από την πειραματική εγκατάσταση στο θερμοκήπιο

4.4.4 Πηγές νερού άρδευσης

Η προμήθεια του νερού δικτύου έγινε από την ΔΕΥΑ Άρτας, ενώ των επεξεργασμένων απόβλητων από τη Μονάδα Επεξεργασίας Αστικών Αποβλήτων του Δήμου Αρταίων, όπου τα αστικά λύματα υπόκεινται σε τριτογενή επεξεργασία. Η συλλογή των επεξεργασμένων λυμάτων για την άρδευση των δενδρυλλίων γινόταν την ίδια μέρα της άρδευσης. Οι χημικές ιδιότητες των δυο ειδών νερών παρατίθενται στον Πίνακα 4.1

Πίνακας 4.1 Χημικά χαρακτηριστικά των δυο ειδών νερού που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα, νερό δικτύου (TaW), και επεξεργασμένα αστικά απόβλητα (TWW).

Παράμετρος	Νερό δικτύου (TaW)	Επεξεργασμένα αστικά απόβλητα (TWW)
pH	7,63	7,53
EC (dS m ⁻¹)	0,58	1,02
NO ₃ ⁻ (mg l ⁻¹)	0,00	12,30
NH ₄ ⁺ (mg l ⁻¹)	0,00	0,21
K ⁺ (mg L ⁻¹)	0,95	20,7
PO ₄ ⁻³ (mg L ⁻¹)	0,00	8,99
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	76	80,78
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	15,6	11,6
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	18,4	86
HCO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	218	269
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	28	68
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	76	98,9

4.4.5 Υδατικές ανάγκες και πρόγραμμα άρδευσης

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου όλα τα φυτά αρδεύτηκαν με βάση τις πραγματικές τους ανάγκες όπως καθορίζονται από τις τιμές της εξατμισοδιαπνοής. Η διαδικασία καθορισμού των υδατικών αναγκών κάθε φυτού και επομένως της δόσης άρδευσης είχε ως εξής: μετά από μια άρδευση (και την απομάκρυνση της περίσσειας νερού μετά την άρδευση) νωρίς το πρωί ζυγίζοταν η γλάστρα και σημειωνόταν το βάρος. Την επόμενη μέρα την ίδια ώρα με τη μέτρηση της προηγούμενης μέρας ζυγίζοταν ξανά η ίδια γλάστρα και η διαφορά στην τιμή του βάρους αποτελούσε την τιμή της ποσότητας του νερού που κατανάλωσε το φυτό (εξατμισοδιαπνοή). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβανόταν δυο φορές την εβδομάδα για όλη την πειραματική περίοδο και οι ζυγίσεις έγιναν σε ζυγαριά μοντέλου 60000 G SCS (Persica, Dietikon, CH). Για τις μεταχειρίσεις με επεξεργασμένα απόβλητα η άρδευση μια φορά το μήνα γινόταν με νερό δικτύου ώστε να αποφευχθεί η συγκέντρωση αλάτων. Στον Πίνακα 4.2 παρατίθενται οι συνολικές μηνιαίες ποσότητες που δέχτηκε κάθε φυτό κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου.

Πίνακας 4.2 Συνολική μηνιαία ποσότητα άρδευσης που εφαρμόστηκε σε κάθε φυτό κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου.

	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος
Νερό ανά φυτό (mL)	820	3700	4800	3500	2450	700
75% νερό ανά φυτό (mL)	615	2775	3600	2625	1838	525

4.4.6 Μετρήσεις

4.4.6.1 Μετρήσεις ανάπτυξης φυτών

4.4.6.1.1 Ύψος, αριθμός φύλλων, διάμετρος βλαστού

Οι μετρήσεις ανάπτυξης των φυτών πραγματοποιήθηκαν σε μηνιαία βάση. Μετρήθηκε το ύψος του κύριου βλαστού (ΚΒ) από το ύψος 10 cm από τη σημείου εμβολιασμού μέχρι την κορυφή του φυτού. Μετρήθηκε επίσης το μήκος των πλευρικών βλαστών (ΠΒ) από το σημείο σύμφυσης του πλευρικού βλαστού στον κύριο βλαστό μέχρι την άκρη του πλευρικού βλαστού. Η αύξηση στο ύψος κάθε φυτού υπολογίστηκε ως η εκατοστιαία αύξηση του αθροίσματος του ύψους και του μήκους όλων των βλαστών (κεντρικού και πλευρικών) με βάση την εξίσωση 4.1:

4.1

$$\% \text{Υψος} = 100 \times \frac{(\text{Υψος } KB_{\text{τελικό}} + \sum \text{Υψος } PB_{\text{τελικό}}) - (\text{Υψος } KB_{\text{αρχικό}} + \sum \text{Υψος } PB_{\text{αρχικό}})}{(\text{Υψος } KB_{\text{αρχικό}} + \sum \text{Υψος } PB_{\text{αρχικό}})}$$

Αντίστοιχα, μετρήθηκε και ο αριθμός των φύλλων του κεντρικού βλαστού και των πλάγιων βλαστών κάθε φυτού και υπολογίστηκε η εκατοστιαία αύξηση στον αριθμό των φύλλων με βάση την εξίσωση 4.2:

4.2

$$\% \text{Φύλλα} = 100 \times \frac{(\text{Φύλλα } KB_{\text{τελικό}} + \sum \text{Φύλλα } PB_{\text{τελικό}}) - (\text{Φύλλα } KB_{\text{αρχικό}} + \sum \text{Φύλλα } PB_{\text{αρχικό}})}{(\text{Φύλλα } KB_{\text{αρχικό}} + \sum \text{Φύλλα } PB_{\text{αρχικό}})}$$

Η διάμετρος του βλαστού μετρήθηκε 10 cm πάνω από το σημείο εμβολιασμού και η αύξηση στη διάμετρο του βλαστού κάθε φυτού υπολογίστηκε ως η εκατοστιαία μεταβολή στη διάμετρο του βλαστού στην αρχή και το τέλος του πειράματος με βάση την εξίσωση 4.3:

4.3

$$\% \text{Διάμετρος Βλαστού} = 100 \times \frac{(\text{Διάμετρος } KB_{\text{τελική}}) - (\text{Διάμετρος } KB_{\text{αρχική}})}{(\text{Διάμετρος } KB_{\text{αρχική}})}$$

4.4.6.1.2 Βιομάζα

Η φυτική βιομάζα μετρήθηκε στο τέλος του πειράματος. Συλλέχθηκαν τα φύλλα, οι βλαστοί και οι ρίζες από κάθε φυτό, πλύθηκαν με απιονισμένο νερό και τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα στους 70 °C για 48 h ώστε να ληφθεί το ξηρό βάρος των ιστών κάθε φυτού.

4.4.6.1.3 Φυλλική επιφάνεια

Μετά τη συλλογή των φύλλων κάθε φυτού και πριν την τοποθέτησή τους στον ξηραντήρα μετρήθηκε η φυλλική επιφάνεια του κάθε φυτού με το όργανο μέτρησης φυλλικής επιφάνειας μοντέλο AM 300 (ADC Bioscientific Ltd.).

4.4.6.2 *Μετρήσεις φυσιολογικής κατάστασης φυτών*

Η φυσιολογική κατάσταση των φυτών εκτιμήθηκε μέσω του προσδιορισμού της περιεχομένης στα φύλλα των φυτών συγκέντρωσης χρωστικών (χλωροφύλλη α και β και καροτενοειδή), ολικών φαινολικών συστατικών και προλίνης.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος έγιναν δυο δειγματοληψίες για τον προσδιορισμό των χρωστικών, των ολικών φαινολικών και της προλίνης. Η πρώτη πραγματοποιήθηκε στα μέσα της πειραματικής περιόδου (27/8/2020) και η δεύτερη στο τέλος του πειράματος (9/11/2020). Σκοπός της ενδιάμεσης δειγματοληψίας ήταν να προσδιοριστεί η απόκριση των φυτών σε κατάσταση έντονης θερμικής καταπόνησης λόγω των ακραίων συνθηκών θερμοκρασίας που επικρατούσαν εκείνη την περίοδο έτσι ώστε να εκτιμηθούν, εάν υπήρχαν, οι επιδράσεις των διαφορετικών μεταχειρίσεων. Κατά τη διάρκεια της πρώτης δειγματοληψίας στις 27/8/2020 η μέγιστη θερμοκρασία στο θερμοκήπιο έφτανε περίπου τους 50 °C, και η ηλιακή ακτινοβολία τα 56 W m⁻².

4.4.6.2.1 *Μέτρηση περιεχομένου ολικής Χλωροφύλλης και Καροτενοειδών*

Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των χρωστικών στα φύλλα των δενδρυλλίων συλλέχθηκαν τρία καλά ανεπτυγμένα φύλλα από το ίδιο σημείο κάθε φυτού, ξεπλύθηκαν με απιονισμένο νερό και αφέθηκαν να στεγνώσουν φυσικά. Στη συνέχεια ακολούθησε η διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 2.6.1.10 της παρούσας εργασίας.

4.4.6.2.2 *Μέτρηση περιεχομένου Ολικών Φαινολικών*

Για τον προσδιορισμό του περιεχομένου των ολικών φαινολικών σε κάθε δειγματοληψία συλλέχθηκαν τρία καλά ανεπτυγμένα φύλλα από το ίδιο σημείο κάθε φυτού, ξεπλύθηκαν με απιονισμένο νερό και αφέθηκαν να στεγνώσουν φυσικά. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα στους 50 °C για 48 h και ακολούθησε η διαδικασία όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.6.1.12 της παρούσας εργασίας.

4.4.6.2.3 *Μέτρηση περιεχομένου Προλίνης*

Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης της προλίνης στα φύλλα των δενδρυλλίων πραγματοποιήθηκε συλλέχθηκαν τρία καλά ανεπτυγμένα φύλλα από το ίδιο σημείο κάθε δενδρυλλίου, ξεπλύθηκαν με απιονισμένο νερό και αφέθηκαν να στεγνώσουν φυσικά. Ακολούθησε η διαδικασία προσδιορισμού της περιεχόμενης στα φύλλα ποσότητας προλίνης σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην παράγραφο 2.6.1.13 της παρούσας εργασίας.

4.4.6.3 *Συγκέντρωση μακρο- και μικροστοιχείων στο έδαφος και στους φυτικούς ιστούς*

Τα μακρο- και μικρο-στοιχεία προσδιορίστηκαν στο εδαφικό υπόστρωμα των φυτών, στα φύλλα και στις ρίζες. Πιο συγκεκριμένα στο έδαφος προσδιορίστηκαν το ολικό CaCO₃, η οργανική ουσία, τα νιτρικά ιόντα (N-NO₃-), το ανταλλάξιμο ιόντα Na⁺ και το ανταλλάξιμο Ca, ενώ στο έδαφος και τους φυτικούς ιστούς προσδιορίστηκαν το ολικό άζωτο (N), ο φώσφορος (P), το κάλιο (K), το μαγνήσιο (Mg), ο σίδηρος (Fe), ο ψευδάργυρος (Zn), το μαγγάνιο (Mn), ο χαλκός (Cu) και το βόριο (B).

Για τον προσδιορισμό των μακρο και μικρο-στοιχείων στο υπόστρωμα κάθε δενδρυλλίου μετά την εξαγωγή των φυτών, το έδαφος κάθε γλάστρας αεροξηράνθηκε και στη συνέχεια κάθε δείγμα πέρασε από κόσκινο 2 mm. Το ολικό άζωτο (N) προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Kjeldahl

(Bremner & Mulvaney, 1982). Η οργανική ουσία προσδιορίστηκε με βάση την παραλλαγή της μεθόδου των Walkley-Black (Nelson & Sommers, 1982), το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) προσδιορίστηκε μέσω της πίεσης που δημιουργείται σε κλειστό δοχείο, στην αντίδραση με HCl (Barouchas, 2014; Love, 2017), τα ανταλλάξιμα (Ca, Mg, K) προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο του οξικού αμμωνίου (NH_4OAc - 1N, pH 7) (Thomas, 2015), με χρήση φλογοφωτόμετρου (ELICO, CL-378) (Ca, K) και ατομικής απορρόφησης (Shimadzu Model AA-6800) σε φλόγα αέρα-ακετυλενίου (Mg). Ο προσδιορισμός του B με τη μέθοδο της αζωμεθίνης (Gestring & Soltanpour, 1981). Ο διαθέσιμος P προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Olsen (Murphy and Riley, 1962). Τα ιχνοστοιχεία Fe, Zn, Mn, Cu προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο του DTPA (Lindsay and Norvell, 1978) με χρήση ατομικής απορρόφησης (Shimadzu Model AA-6800) σε φλόγα αέρα-ακετυλενίου.

Για τον προσδιορισμό των μάκρο και μικρο-στοιχείων στους φυτικούς ιστούς (φύλλα και ρίζες) αφού διαχωρίστηκαν οι ιστοί σε φύλλα και βλαστούς, τα δείγματα ξεπλύθηκαν με απιονισμένο νερό και αφέθηκαν να στεγνώσουν φυσικά. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα στους 70 °C για 48 ώρες. Ακολούθησε άλεση σε μύλο (μοντέλο Polymix MFA, KINEMATICA, CH.) με διάμετρο πόρων στο κόκκινο 2 mm. Το ολικό άζωτο (N) προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Kjeldahl (Horneck and Miller, 1998). Για τον προσδιορισμό των υπολοίπων στοιχείων έγινε καύση ποσότητας 0,5 g από κάθε αλεσμένο δείγμα σε φούρνο υψηλών θερμοκρασιών στους 550 °C για 6 ώρες. Στη συνέχεια η σταχτή διαλύθηκε σε 3 mL HCl 6 N και το διάλυμα αραιώθηκε με απιονισμένο νερό στα 50 mL. Ο προσδιορισμός του B με τη μέθοδο της αζωμεθίνης (Gestring and Soltanpour, 1981). Ο προσδιορισμός των Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, Cu έγινε στην ατομική απορρόφηση (Shimadzu AA-6800) σε φλόγα αέρα-ακετυλενίου. Η συγκέντρωση καλίου (K) προσδιορίστηκε με φλογοφωτόμετρο (ELICO, CL-378). Ο ολικός φώσφορος (P) προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Murphy και Riley (1962) σε φασματοφωτόμετρο (SHIMADZU UV/VIS 1800 Spectrophotometer) στα 880 nm.

4.4.7 Στατιστική ανάλυση

Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό SPSS v. 20.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA). Για τον προσδιορισμό των σημαντικών διαφορών των μέσων όρων μεταξύ των διαφορετικών μεταχειρίσεων εφαρμόστηκε η Univariate ANOVA και το τεστ Tukey HSD σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05 ($p \leq 0.05$)

4.4.8 Υπολογισμός Υδατικού Αποτύπωματος

Στην παρούσα εργασία υπολογίστηκε το υδατικό αποτύπωμα των φυτών στα οποία εφαρμόστηκε άρδευση με επεξεργασμένα νερά (μεταχείριση TWW) και συγκρίθηκε με το αντίστοιχο υδατικό αποτύπωμα που υπολογίστηκε για τα δενδρύλλια που αρδεύτηκαν με νερό δικτύου (μεταχείριση TaW). Το WF υπολογίστηκε με βάση τη μεθοδολογία των (Hoekstra et al., 2011), η οποία περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 1.3.2 της παρούσας εργασίας.

Με βάση τη μεθοδολογία το υδατικό αποτύπωμα υπολογίζεται ως το άθροισμα των τριών συστατικών του πράσινο, μπλε και γκρι WF σύμφωνα με την εξίσωση 4.4:

4.4

$$WF_{tot} = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{grey}$$

Καθώς τα δενδρύλλια διατηρήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος στο θερμοκήπιο, προστατευμένα δηλαδή από τη βροχή, το WF_{green} θεωρείται μηδενικό, καθώς δεν δέχθηκαν νερό βροχής.

Η κατανάλωση νερού στην παρούσα εργασία αφορά μόνο το νερό άρδευσης το οποίο προέρχεται από δυο διαφορετικές πηγές, το νερό του δικτύου που ορίζουμε ως μπλε νερό (blue water) και του υδατικού αποτύπωμα ως WF_{blue} και το νερό που προκύπτει έπειτα από την επεξεργασία των αστικών λυμάτων και το οποίο ορίζουμε στην παρούσα εργασία ως μαύρο νερό (black water) και το αντίστοιχο υδατικό αποτύπωμα ως WF_{black} .

Για τον υπολογισμό του γκρίζου WF θεωρούμε την ποσότητα λιπάσματος που επιμολύνει το περιβάλλον (επιφανειακά ή υπόγεια ύδατα) το μέρος εκείνο που εκπλύνεται κατά την εφαρμογή. Στη συγκεκριμένη εργασία όλα τα φυτά αρδεύτηκαν με βάση τις πραγματικές τους ανάγκες (εξατμισοδιαπνοή). Με αυτό τον τρόπο δεν έλαβε χώρα κάποια απορροή κατά τη διάρκεια των αρδεύσεων, επομένως δεν υπήρξε έκπλυση λιπάσματος και άρα θεωρούμε και το WF_{grey} ως μηδενικό.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία υπολογισμού του WF εάν ένα γεωργικό προϊόν είναι μετρήσιμο η λειτουργική μονάδα μπορεί να θεωρηθεί το τεμάχιο του προϊόντος (Hoekstra et al., 2011). Στην παρούσα εργασία ως λειτουργική μονάδα θεωρήθηκε το ένα δενδρύλλιο Κονσερβολιάς.

4.4.9 Υπολογισμός Υδατικού Αποτυπώματος στο τοπικό Φυτώριο

Το υδατικό αποτύπωμα των δενδρυλλίων στα τοπικά φυτώρια υπολογίστηκε με βάση τα δεδομένα που παρείχαν οι ιδιοκτήτες των φυτωρίων στην περιοχή. Η άρδευση στα υπό μελέτη φυτώρια πραγματοποιήθηκε με την τυπική μέθοδο της περιοχής όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.1 της παρούσας εργασίας. Το δάπεδο του φυτωρίου πλημμυρίζει με νερό μέχρι το ύψος των 15 cm και η περίσσεια νερού μετά το πέρας της άρδευσης απορρίπτεται στον περιβάλλοντα χώρο. Τα δενδρύλλια φυλάσσονται στο φυτώριο περίπου ένα χρόνο μέχρι να μεταφτευθούν στην οριστική τους θέση στον αγρό. Οι φυτωριούχοι της περιοχής παρείχαν δεδομένα που αφορούν τις διαστάσεις των θερμοκηπίων, το πλήθος των αρδεύσεων σε ετήσια βάση, το πλήθος των φυτών που αρδεύονται και την ποσότητα εφαρμοζόμενης λίπανσης σε αυτά.

4.5 Αποτελέσματα – Συζήτηση

4.5.1 Ανάπτυξη φυτών

Για τα περισσότερα χαρακτηριστικά ανάπτυξης που μετρήθηκαν η επίδοση των φυτών που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα ήταν ισάξια αν όχι καλύτερη με αυτή των φυτών που αρδεύτηκαν με καθαρό νερό (δικτύου) (Πίνακας 4.3).

Η αύξηση στο ύψος των φυτών δεν παρουσίασε σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων που αφορούν την άρδευση με επεξεργασμένα απόβλητα, την άρδευση με καθαρό νερό και την προσθήκη ζεόλιθου στο υπόστρωμα και κυμάνθηκε από 35,8 % έως 39,3% με τα φυτά της μεταχείρισης με ζεόλιθο να επιδεικνύουν τη μεγαλύτερη αύξηση.

Η αύξηση στη διάμετρο του βλαστού των φυτών που αρδεύτηκαν με τα επεξεργασμένα απόβλητα (μεταχειρίσεις TWW και TWW1/2F) ήταν κατά 21% και 39% υψηλότερη από την αντίστοιχη των φυτών που δέχτηκαν νερό άρδευσης από το δίκτυο ύδρευσης. Τα φυτά που

περιείχαν στο υπόστρωμά τους ζεόλιθο σημείωσαν παρόμοια αύξηση στη διάμετρο του βλαστού με την αντίστοιχη των μεταχειρίσεων με επεξεργασμένα απόβλητα.

Σε ό,τι αφορά το πλήθος των φύλλων φάνηκε ότι η άρδευση με νερό δικτύου και η εφαρμογή ζεόλιθου στο υπόστρωμα προήγαγε την έκπτυξη νέων φύλλων, καθώς και τα φυτά και των δυο αυτών μεταχειρίσεων επέδειξαν την υψηλότερη αύξηση αριθμού φύλλων (69,2% και 68,3% αντίστοιχα).

Από την άλλη όμως η άρδευση με επεξεργασμένα απόβλητα προήγαγε την αύξηση στο μέγεθος των φύλλων, καθώς τα φυτά αυτής της μεταχείρισης είχαν κατά 6% και 8% μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια σε σύγκριση με την αντίστοιχη των φυτών των μεταχειρίσεων με καθαρό νερό και ζεόλιθο.

Η συνολική βιομάζα των φυτών (υπέργεια και υπόγεια) δε διέφερε σημαντικά μεταξύ των μεταχειρίσεων TWW, TaW και Zeolite (Πίνακας 4.3). Τα φυτά που αρδεύτηκαν με το 75% της ποσότητας νερού, καθώς και τα φυτά που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα απόβλητα και δέχτηκαν μισή ποσότητα λίπανσης, είχαν τη μικρότερη συνολική βιομάζα.

Η εφαρμογή των επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων για την άρδευση διάφορων καλλιεργειών αύξησε την ανάπτυξή τους και αυτό αποδίδεται κυρίως στην αυξημένη περιεκτικότητα των εναλλακτικών αυτών υδάτων σε θρεπτικά στοιχεία καθώς και στη διευκόλυνση που εξασφαλίζουν στην προσρόφηση των θρεπτικών από τα φυτά (Ofori et al., 2021, Hashem and Qi, 2021). Μελέτες σε ελαιόδενδρα έδειξαν θετική συσχέτιση μεταξύ της άρδευσης με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα και της ανάπτυξης των φυτών (Bourazanis et al., 2016, Bedbabis and Ferrara, 2018). Έχουν αναφερθεί όμως και περιπτώσεις στις οποίες παρατηρήθηκε μείωση στην ανάπτυξη των φυτών που αποδόθηκε κυρίως στα αυξημένα επίπεδα ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) στα επεξεργασμένα απόβλητα (Bedbabis et al., 2010). Παρόλο που η οξύτητα του εδάφους δε βρέθηκε να επηρεάζει τη βλαστική ανάπτυξη και την τελική παραγωγή της ελιάς (Barouchas et al., 2021), η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους είναι καθοριστικός παράγοντας στην ανάπτυξη του ελαιόδενδρου. Οι Erel et al. (2019) παρατήρησαν ότι η ανάπτυξη της ελιάς επηρεάστηκε μετά από 8 χρόνια συνεχόμενης άρδευσης με επεξεργασμένα απόβλητα.

Στην παρούσα εργασία δεν παρατηρήθηκε κάποια επιβλαβής επίπτωση στην ανάπτυξη των φυτών στα οποία εφαρμόστηκαν τα επεξεργασμένα απόβλητα για την κάλυψη των υδατικών τους αναγκών. Απεναντίας τα φυτά που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα απόβλητα επέδειξαν παρόμοια αύξηση του ύψους, παρόμοια βιομάζα και υψηλότερη φυλλική επιφάνεια και αύξηση της διαμέτρου του βλαστού σε σύγκριση με τα φυτά που αρδεύτηκαν με καθαρό νερό (νερό δικτύου) ή στα οποία προστέθηκε ζεόλιθος στο εδαφικό τους υπόστρωμα. Η επίδραση της άρδευσης με επεξεργασμένα απόβλητα ως λίπασμα επηρεάζεται από τη σύνθεση των αποβλήτων αυτών και τις εφαρμοζόμενες ποσότητες άρδευσης (Vergine et al., 2017). Καθώς οι ελιές δεν απαιτούν μεγάλες ποσότητες νερού για να καλύψουν τις υδατικές τους ανάγκες, η επίδραση των επεξεργασμένων αποβλήτων ειδικά όταν εφαρμόζονται για μικρό χρονικό διάστημα εκφράζεται σε μικρότερη έκταση.

Πίνακας 4.3 Παράμετροι ανάπτυξης φυτών κάθε μεταχείρισης στο τέλος του πειράματος

Μεταχείριση	Αύξηση βλαστού (%)	Αύξηση διαμέτρου βλαστού (%)	Αύξηση αριθμού φύλλων (%)	Φυλλική επιφάνεια (cm ²)	Βιομάζα φυτού (g)
TaW	35,9 a ¹	16,4 c	69,2 a	583,8 b	28,6 a
TaW75%	27,7 b	10,7 d	46,7 b	519,6 d	25,9 b
TWW	35,8 a	19,9 ab	43,0 b	618,7 a	28,6 a
TWW1/2F	27,0 b	22,8 a	47,0 b	556,6 c	26,9 ab
Zeolite	39,3 a	19,5 b	68,3 a	570,0 bc	27,9 ab
Significance	***	***	***	***	***

¹Τα διαφορετικά γράμματα ανά στήλη δείχνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων *** = $p < 0.001$.

4.5.2 Φυσιολογική κατάσταση και καταπόνηση φυτών

4.5.2.1 Χρωστικές (Χλωροφύλλη α, χλωροφύλλη β, συνολική χλωροφύλλη και καροτενοειδή)

Η άρδευση με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα γενικά οδήγησε σε αύξηση των συγκεντρώσεων των χρωστικών στα φύλλα των νεαρών δενδρυλλίων Κονσερβολιάς. Πιο συγκεκριμένα, η συγκέντρωση χλωροφύλλης α, χλωροφύλλης β, συνολικής χλωροφύλλης και καροτενοειδών ήταν κατά 23%, 28%, 25% και 26% υψηλότερη αντίστοιχα σε σύγκριση με τη συγκέντρωση των χρωστικών αυτών στα φύλλα των φυτών που αρδεύτηκαν με νερό δικτύου (Πίνακας 4.4). Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι ακόμα και η μεταχείριση TWW1/2F επέδειξε σημαντική αύξηση στις εν λόγω χρωστικές. Η προσθήκη ζεόλιθου αύξησε την περιεκτικότητα στα φύλλα των δενδρυλλίων της ελιάς σε συνολική χλωροφύλλη και καροτενοειδή κατά 8% και 6%, αντίστοιχα, σε σύγκριση με τα φυτά που αρδεύτηκαν με καθαρό νερό (TaW)

Πίνακας 4.4 Περιεκτικότητα χλωροφύλλη α, χλωροφύλλη β, συνολική χλωροφύλλη και καροτενοειδή στα φύλλα των δενδρυλλίων ελιάς των διαφορετικών μεταχειρίσεων στο τέλος του πειράματος.

Μεταχείριση	Χλωροφύλλη α (mg g ⁻¹ νωπού φύλλου)	Χλωροφύλλη β (mg g ⁻¹ νωπού φύλλου)	Συνολική χλωροφύλλη (mg g ⁻¹ νωπού φύλλου)	Καροτενοειδή (mg g ⁻¹ νωπού φύλλου)
TaW	1,16 b ¹	0,41 b	1,57 c	0,31 c
TaW75%	1,23 b	0,45 b	1,68 bc	0,35 b
TWW	1,43 a	0,52 a	1,95 a	0,39 a
TWW1/2F	1,42 a	0,51 a	1,92 a	0,38 a
Zeolite	1,24 b	0,45 b	1,70 b	0,33 bc
Significance	***	***	***	***

¹Τα διαφορετικά γράμματα ανά στήλη δείχνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων *** = $p < 0.001$

Η φωτοσύνθεση είναι ο μηχανισμός παραγωγής τροφής/ενέργειας στα φυτά και η συγκέντρωση χλωροφυλλών διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο στην αντίδραση. Η χλωροφύλλη συνίσταται στο μεγαλύτερο μέρος της από άζωτο, επομένως η ανεπάρκεια του αζώτου στο φυτά μειώνει την περιεκτικότητα των φύλλων τους σε χλωροφύλλη (και μειώνει σημαντικά την κύρια πρωτεΐνη των σκοτεινών αντιδράσεων της φωτοσύνθεσης -RUBISCO) περιορίζοντας έτσι την ανάπτυξή τους και υποβαθμίζοντας τη φυσιολογική τους κατάσταση (Ofori et al., 2021, Hashem and Qi, 2021, Singh, 2021). Τα επεξεργασμένα αστικά απόβλητα είναι πλούσια σε άζωτο και άλλα μικροστοιχεία που εμπλέκονται στη σύνθεση της χλωροφύλλης, επομένως η εφαρμογή των εναλλακτικών αυτών υδάτων αυξάνει την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη και ενισχύει τη φυσιολογική δραστηριότητα. Στην παρούσα εργασία παρατηρήθηκε αύξηση στη συγκέντρωση των χρωστικών (χλωροφύλλες και καροτενοειδή) στα φύλλα των δενδρυλλίων της ελιάς που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα απόβλητα το οποίο συμφωνεί με ευρήματα άλλων αντίστοιχων εργασιών (Ben Hassena et al., 2018, Al-Suhaibani et al., 2021, Alvarez-Holguin et al., 2022).

4.5.2.2 Δείκτες καταπόνησης (Ολικά φαινολικά και Προλίνη)

Στο τέλος του πειράματος τα φυτά των περισσότερων μεταχειρίσεων δε σημείωσαν διαφορές στη συγκέντρωση ολικών φαινολικών στα φύλλα τους. Έχει ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι στην ενδιάμεση δειγματοληψία στις 27/8/2020 η περιεκτικότητα των ολικών φαινολικών στα φύλλα των φυτών της μεταχείρισης TWW1/2F και του ζεόλιθου ήταν η υψηλότερη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, πιθανώς ως αποτέλεσμα της θερμικής καταπόνησης που υφίσταντο εκείνη την περίοδο αυτά τα φυτά, αλλά και του ανταγωνισμού του ζεόλιθου για τα διαθέσιμα στο έδαφος θρεπτικά (παρατηρήσεις από δημοσίευτα αποτελέσματα των Εργ. Εδαφολογίας και Δενδροκομίας του Π.Θ.). Αντίθετα, την ίδια περίοδο τα φυτά που δέχτηκαν νερό δικτύου ή επεξεργασμένα απόβλητα είχαν παρόμοια περιεκτικότητα ολικών φαινολικών στα φύλλα τους.

Οι φαινόλες εκφράζονται σε αυξημένες συγκεντρώσεις όταν το φυτό υφίσταται κάποια βιοτική ή αβιοτική καταπόνηση (Petridis et al., 2012, Varela et al., 2016, Tekaya et al., 2016, Arji et al., 2021). Η άρδευση με επεξεργασμένα απόβλητα μπορεί να αυξήσει την αλατότητα του εδάφους, επάγοντας έτσι ωσμωτικό στρες στα φυτά και άρα αυξάνοντας το περιεχόμενο σε αυτά των μεταβολιτών καταπόνησης (Ahmadipor et al., 2018, Mechri et al., 2020). Στην παρούσα εργασία η άρδευση με επεξεργασμένα λύματα μείωσε τη συγκέντρωση των ολικών φαινολικών στα φύλλα γεγονός που υποδεικνύει ότι η εφαρμογή αυτών των υδάτων δεν προκάλεσε κάποια αβιοτική καταπόνηση στα φυτά. Ανάλογη παρατήρηση έκαναν και οι Tekaya et al. (2016) οι οποίοι επίσης παρατήρησαν μείωση της συγκέντρωσης των ολικών φαινολών στα φύλλα φυτών που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα απόβλητα σε σύγκριση με άλλες μεταχειρίσεις που προήγαγαν υδατική καταπόνηση.

Πίνακας 4.5 Συγκέντρωση των ολικών φαινολών στα φύλλα των δενδρυλλίων ελιάς των διαφορετικών μεταχειρίσεων στο τέλος τους πειράματος και κατά την ενδιάμεση δειγματοληψία)

Μεταχείριση	Ολικά φαινολικά - τέλος πειράματος (mg g ⁻¹ ξηρού φύλλου)	Ολικά φαινολικά - ενδιάμεση δειγματοληψία (mg g ⁻¹ ξηρού φύλλου)
TaW	39,5 a ¹	36,3 c
TaW75%	32,7 b	35,7 c
TWW	33,1 b	35,1 c
TWW1/2F	32,6 b	49,5 a
Zeolite	33,9 b	43,5 b
Significance	***	***

¹Τα διαφορετικά γράμματα ανά στήλη δείχνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων *** = p < 0.001

Στο τέλος του πειράματος η συγκέντρωση προλίνης δε διέφερε σημαντικά στα φύλλα των φυτών που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα απόβλητα και αυτών που δέχτηκαν νερό δικτύου (Πίνακας 4.6). Τα φυτά της μεταχείρισης TWW1/2F σημείωσαν την υψηλότερη συγκέντρωση προλίνης στα φύλλα τους. Κατά τη διάρκεια της ενδιάμεσης δειγματοληψίας η χαμηλότερη συγκέντρωση προλίνης προσδιορίστηκε στα φύλλα των φυτών της μεταχείρισης που δέχτηκαν νερό δικτύου, ενώ η υψηλότερη στα φύλλα των φυτών της TWW1/2F.

Συσσώρευση προλίνης έχει αναφερθεί σε περιπτώσεις νεαρών δενδρυλλίων ελιάς που υφίσταντο υδατική καταπόνηση (Petridis et al., 2012, Ahmadipor et al., 2018, Arji et al., 2021). Καθώς στην παρούσα εργασία δε σημειώθηκε αύξηση στη συγκέντρωση της προλίνης στα φύλλα των φυτών που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα λύματα, συμπεραίνουμε ότι αυτή η πηγή άρδευσης δεν επέφερε κάποια επιπλέον καταπόνηση στα συγκεκριμένα φυτά.

Πίνακας 4.6 Συγκέντρωση προλίνης στα φύλλα των δενδρυλλίων ελιάς των διαφορετικών μεταχειρίσεων στο τέλος τους πειράματος και κατά την ενδιάμεση δειγματοληψία

Μεταχείριση	Προλίνη τέλος πειράματος (mg 100 g ⁻¹ νωπού φύλλου)	Προλίνη ενδιάμεση δειγματοληψία (mg 100 g ⁻¹ νωπού φύλλου)
TaW	4,8 ab ¹	4,6 c
TaW75%	4,5 b	5,0 bc
TWW	5,0 ab	5,3 ab
TWW1/2F	5,5 a	5,9 a
Zeolite	5,2 ab	4,8 bc
Significance	***	***

¹Τα διαφορετικά γράμματα ανά στήλη δείχνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων *** = p < 0.001

4.5.3 Συγκέντρωση μακρό- και μικρό-στοιχείων στο έδαφος και στους φυτικούς ιστούς

4.5.3.1 Έδαφος

Το περιεχόμενο του εδάφους σε ολικό CaCO_3 δε διαφοροποιήθηκε μεταξύ των μεταχειρίσεων με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα και νερό δικτύου. Η οργανική ουσία στο έδαφος που δέχτηκε άρδευση με επεξεργασμένα απόβλητα ήταν μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις εκτός της μεταχείρισης με νερό δικτύου, που ήταν παρόμοια. Έχει ενδιαφέρον η παρατήρηση ότι η συγκέντρωση των νιτρικών ήταν ψηλότερη στο έδαφος των φυτών που αρδεύτηκαν με νερό δικτύου σε σύγκριση με την αντίστοιχη συγκέντρωση στο έδαφος των υπόλοιπων μεταχειρίσεων. Αυτό υποδηλώνει ότι η συγκέντρωση των νιτρικών στο νερό δικτύου στην περίοδο της δειγματοληψίας ήταν αυξημένη, παρόλο που δεν ανιχνεύτηκε αυτό κατά τη χημική ανάλυσή του στην αρχή του πειράματος (Πίνακας 4.1). Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στις αρχές Νοεμβρίου τότε που έχουν ξεκινήσει οι φθινοπωρινές βροχές και αναμένεται να λαμβάνει χώρα η έκπλυση των λιπασμάτων που εφαρμόζονται στην πεδιάδα της Άρτας. Το έδαφος που εμπλουτίστηκε με ζεόλιθο και αυτό που αρδεύτηκε με επεξεργασμένα απόβλητα περιείχε μεγαλύτερες ποσότητες ανταλλάξιμου Na και Ca (Πίνακας 4.7).

Σε ό,τι αφορά τα μακρό-στοιχεία στο τέλος του πειράματος, δεν παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων στη συγκέντρωση του ολικού N. Η συγκέντρωση του P ήταν μεγαλύτερη στο εδαφικό υπόστρωμα που δέχτηκε επεξεργασμένα απόβλητα. Η μεταχείριση με ζεόλιθο έδειξε να περιέχει σημαντικά μεγαλύτερη ποσότητα καλίου (K), ενώ τα στοιχεία Mg, Fe, Zn, Mn και B ανιχνεύτηκαν σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στο έδαφος των φυτών που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα απόβλητα. Η συγκέντρωση του χαλκού (Cu) ήταν μεγαλύτερη στη μεταχείριση με νερό δικτύου (Πίνακας 4.8).

Στη βιβλιογραφία (Hashem and Qi, 2021, Singh, 2021, Ofori et al., 2021) γενικά αναφέρεται ότι η άρδευση με επεξεργασμένα απόβλητα εμπλουτίζει το έδαφος σε οργανική ουσία, θρεπτικά και βαρέα μέταλλα.

Στην παρούσα εργασία η οργανική ουσία και κάποια από τα ιχνοστοιχεία που μετρήθηκαν φάνηκε να περιέχονται στο έδαφος που αρδεύτηκε με επεξεργασμένα απόβλητα σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, κάποια άλλα όμως όχι. Κάτι αντίστοιχο παρατήρησαν και οι De Las Heras και Mañas (2020) σε ελαιώνες στην Ισπανία. Για παράδειγμα στη συγκεκριμένη εργασία η συγκέντρωση P αλλά και Zn, Mg και Mn ήταν υψηλότερη στο έδαφος των τεμαχίων που αρδεύτηκαν με νερό δικτύου παρά στο έδαφος αυτών που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα απόβλητα. Κάτι αντίστοιχο είχαν παρατηρήσει παλαιότερα και οι Galavi et al. (2010). Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην παραλλακτικότητα στη χημική σύνθεση του νερού δικτύου ανά περιοχή, αλλά και ανά περίοδο του χρόνου, καθώς και στην αντίστοιχη των επεξεργασμένων αποβλήτων. Μπορεί όμως να επηρεαστεί και από τη χρήση των θρεπτικών από τα φυτά.

4.5.3.2 Συγκέντρωση μακρό- και μικρό-στοιχείων στα φύλλα

Η άρδευση με επεξεργασμένα απόβλητα δε φαίνεται να αύξησε σημαντικά την περιεκτικότητα σε μακρό-στοιχεία στα φύλλα των δενδρυλλίων της ελιάς (Πίνακας 4.9), κάτι που δε συμφωνεί με τα ευρήματα αντίστοιχων εργασιών (Ben Hassena et al., 2018, Bedbabis and Ferrara, 2018). Αυτό πιθανώς συνδέεται με τη σύσταση των επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων και το χρόνο εφαρμογής τους (Vergine et al., 2017). Η μεταχείριση με ζεόλιθο αύξησε την περιεκτικότητα N σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Η συγκέντρωση των μικρό-στοιχείων Mg, Fe, Mn και B ήταν μεγαλύτερη στα φύλλα των φυτών που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα απόβλητα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις χωρίς όμως να διαφέρει σημαντικά για τα περισσότερα από αυτά στοιχεία από την αντίστοιχη των μεταχειρίσεων με νερό δικτύου (Πίνακας 4.9).

4.5.3.3 Συγκέντρωση μακρό- και μικρό-στοιχείων στις ρίζες

Στις ρίζες παρατηρήθηκε μεγαλύτερη συγκέντρωση αζώτου στα δενδρύλλια που δέχτηκαν επεξεργασμένα απόβλητα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Η συγκέντρωση του P και του B δε διαφοροποιήθηκε μεταξύ των μεταχειρίσεων. Στις ρίζες των φυτών που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα απόβλητα αυξήθηκε η συγκέντρωση Mg και Mn. Η συγκέντρωση Cu ήταν μεγαλύτερη στις ρίζες των φυτών που αρδεύτηκαν με νερό δικτύου. Αυτή η αυξημένη συγκέντρωση Cu παρατηρήθηκε και στο εδαφικό υπόστρωμα των φυτών αυτής της μεταχείρισης (Πίνακας 4.10). Η σύσταση των επεξεργασμένων αστικών λυμάτων επηρεάζει τις συγκεντρώσεις των μακρό-θρεπτικών και ιχνοστοιχείων στους ιστούς των φυτών που αρδεύονται με αυτά. Επίσης η χρονική διάρκεια εφαρμογής επηρεάζει την περιεκτικότητα αυτών των στοιχείων στα φυτά. Προφανώς η βραχυπρόθεσμη εφαρμογή των επεξεργασμένων υδάτων δεν αναμένεται να έχει την ίδια επίδραση με αυτή της μακροχρόνιας εφαρμογής. Οι Bedbabis και Ferrara (2018) παρατήρησαν μέχρι και 28% αύξηση στη συγκέντρωση των ιχνοστοιχείων στα φύλλα ελιάς μετά από εφαρμογή 8 ετών άρδευσης με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα.

Πίνακας 4.7 Συγκέντρωση ολικού CaCO_3 , οργανικής ουσίας και ανταλλάξιμων βάσεων στο εδαφικό υπόστρωμα των δενδρυλλίων των διαφορετικών μεταχειρίσεων

Μεταχειρίσεις	Ολικό CaCO_3 %	Οργαν. Ουσία %	N-NO_3^- mg Kg^{-1}	Ανταλ. Na mg Kg^{-1}	Ανταλ. Ca mg Kg^{-1}
TaW	18,63 ab ¹	1,20 a	99,85 a	90,0 c	1193,6 c
TaW75%	18,73 a	1,00 b	27,88 c	62,4 d	928 d
TWW	18,17 ab	1,27 a	27,37 c	214,4 b	1303,6 b
TWW1/2F	18,22 ab	1,05 b	74,80 b	201,6 b	1144 c
ZEO	17,37 b	1,07 b	28,87 c	302,4 a	3344,8 a

¹Τα διαφορετικά γράμματα ανά στήλη δείχνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων *** = $p < 0.001$

Πίνακας 4.8 Συγκέντρωση μακρό- και μικρό-στοιχείων στο εδαφικό υπόστρωμα των δενδρυλλίων κάθε μεταχείρισης

Μεταχειρίσεις	N %	P mg Kg^{-1}	K mg Kg^{-1}	Mg mg Kg^{-1}	Fe mg Kg^{-1}	Zn mg Kg^{-1}	Mn mg Kg^{-1}	Cu mg Kg^{-1}	B mg Kg^{-1}
TaW	0,016 a	5,18 b	60,8 b	122,0 a	23,96 b	1,18 b	9,85 b	1,35 a	0,91 b
TaW75%	0,016 a	4,02 c	34,0 c	68,9 c	11,69 c	1,07 b	2,54 d	0,58 c	0,92 b
TWW	0,017a	6,27 a	58,0 b	110,4 a	25,83 a	1,58 a	11,48 a	0,73 b	1,14 a
TWW1/2F	0,018 a	5,11 b	37,6 c	85,2 b	10,62 c	0,97 bc	3,65 c	0,8 b	0,92 b
ZEO	0,016 a	4,97 b	338,0 a	72,0 c	11,76 c	0,83 c	2,10 d	0,6 c	0,91 b

¹Τα διαφορετικά γράμματα ανά στήλη δείχνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων *** = $p < 0.001$

Πίνακας 4.9 Συγκέντρωση μακρό- και μικρό-στοιχείων στα φύλλα των δενδρυλλίων κάθε μεταχείρισης

Μεταχειρίσεις	N %	P mg Kg ⁻¹	K mg Kg ⁻¹	Mg mg Kg ⁻¹	Ca mg Kg ⁻¹	Fe mg Kg ⁻¹	Zn mg Kg ⁻¹	Mn mg Kg ⁻¹	Cu mg Kg ⁻¹	B mg Kg ⁻¹
TaW	1,36 b ¹	0,042 a	0,3 a	0,046 a	2,4 a	49 b	2,56 d	25 a	939,9 d	22,0 a
TaW75%	1,46 ab	0,048 a	0,3 a	0,033 b	2,3 a	17,0 c	7,14 b	2,4 c	1584,4 b	16,6 b
TWW	1,35 b	0,044 a	0,3 a	0,050 a	2,3 a	53,3 a	4,51 c	24,3 a	1355,7 c	22,3 a
TWW1/2F	1,23 c	0,040 a	0,3 a	0,031 b	2,8 a	20,2 c	9,06 a	3,7 c	1768,3 a	17,8 b
ZEO	1,54 a	0,042 a	0,3 a	0,035 b	2,4 a	20,3 d	7,14 b	6,3 b	1720,0 a	18,1 b

¹Τα διαφορετικά γράμματα ανά στήλη δείχνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων *** = p < 0.001

Πίνακας 4.10 Συγκέντρωση μακρό- και μικρό-στοιχείων στις ρίζες των δενδρυλλίων κάθε μεταχείρισης

Μεταχειρίσεις	N %	P mg Kg ⁻¹	K mg Kg ⁻¹	Mg mg Kg ⁻¹	Ca mg Kg ⁻¹	Fe mg Kg ⁻¹	Zn mg Kg ⁻¹	Mn mg Kg ⁻¹	Cu mg Kg ⁻¹	B mg Kg ⁻¹
TaW	0,83 c ¹	0,035 a	0,21 a	0,19 b	2,07 a	982,3 a	4,7 d	45,5 b	970,2 b	26,1 a
TaW75%	1,00 ab	0,037 a	0,18 b	0,18 bc	1,53 b	839,6 c	11,7 b	36,3 c	821,5 c	22,5 a
TWW	1,07 a	0,036 a	0,17 c	0,23 a	1,6 b	917,7 ab	3,3 e	52,9 a	821,8 c	24,6 a
TWW1/2F	0,92 bc	0,041 a	0,21 a	0,18 bc	1,99 a	878,9 bc	15,0 a	40,9 bc	1148,3 a	23,7 a
ZEO	1,04 ab	0,034 a	0,17 c	0,17 c	1,66 b	875,2 bc	9,4 c	41,9 b	889,6 bc	24,0 a

¹Τα διαφορετικά γράμματα ανά στήλη δείχνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων *** = p < 0.001

4.5.4 Υδατικό Αποτύπωμα (WF) δενδρυλλίων ελιάς αρδευόμενα με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα

Το Υδατικό Αποτύπωμα υπολογίστηκε στο τέλος του πειράματος για τις δυο μόνο μεταχειρίσεις που αφορούν:

- την άρδευση με νερό δικτύου (TaW) και
- την άρδευση με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα (TWW)

Το WF υπολογίστηκε ως το άθροισμα της ποσότητας νερού που εφαρμόστηκε σε κάθε φυτό ($L \text{ φυτό}^{-1}$) σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Έγινε διάκριση στο μπλε νερό ανάλογα με την πηγή προέλευσής του. Έτσι αναφέρεται το μπλε νερό για το νερό που προέρχεται από το δίκτυο ύδρευσης και μαύρο νερό για το νερό που προέρχεται από τη δημοτική μονάδα επεξεργασίας των αστικών λυμάτων. Στον Πίνακα 4.11 παρουσιάζονται οι τιμές της κατανάλωσης νερού (Crop Water Use –CWU) και τα αποτελέσματα του υπολογισμού του WF.

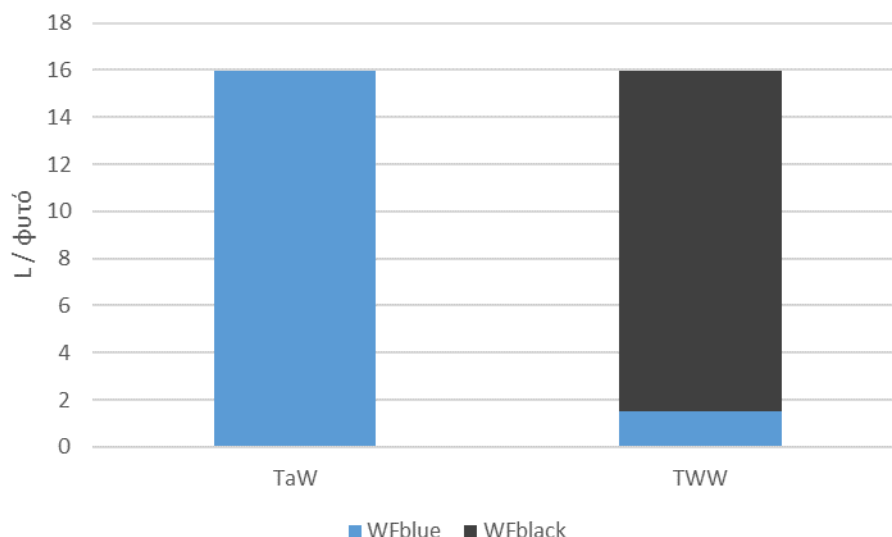
Καθώς τα φυτά διατηρήθηκαν σε όλη την πειραματική περίοδο στο θερμοκήπιο προστατευμένα από τη βροχή και καθώς επίσης η ποσότητα άρδευσης βασίστηκε στις πραγματικές τους υδατικές ανάγκες και επομένως δεν υπήρχε απορροή και άρα ούτε έκπλυση N, υπολογίστηκε μόνο το WF_{blue} . Ανάλογα με τη διάκριση στο μπλε νερό με βάση την πηγή προέλευσής τους και το WF_{blue} διακρίθηκε σε WF_{blue} και WF_{black} , αντίστοιχα (Διάγραμμα 4.1).

Τα φυτά που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα δέχτηκαν σε όλη τη διάρκεια του πειράματος μια άρδευση το μήνα με καθαρό νερό όπως γενικά προτείνεται για να αποφευχθεί η συσσώρευση αλάτων. Επομένως Το WF των φυτών που αρδεύτηκαν με τα επεξεργασμένα απόβλητα αποτελείται και από WF_{blue} και WF_{black} .

Οι Fridman et al. (2021) πρότειναν την επέκταση του WF_{blue} ώστε να περιλαμβάνει διακριτά και τις εναλλακτικές πηγές άρδευσης. Αν θεωρήσουμε ότι τα επεξεργασμένα αστικά απόβλητα απορρίπτονται στους υδάτινους αποδέκτες, η επαναχρησιμοποίησή τους στη γεωργία φαίνεται να είναι μια μεγάλη ευκαιρία για τη μείωση της άντλησης καθαρού νερού για την άρδευση.

Πίνακας 4.11 Υπολογισμός του WF των δενδρυλλίων ελιάς που αρδεύτηκαν με καθαρό νερό και με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Μεταχείριση	CWU _{blue} (L)	CWU _{black} (L)	CWU _{total} (L)	WF _{blue} (L / φυτό)	WF _{black} (L / φυτό)	WF _{total} (L / φυτό)	WF _{total} (m ³ /φυτό)
Tap	15,97	0	15,97	15,97	0	15,97	0,01597
TWW	1,50	14,47	15,97	1,5	14,47	15,97	0,01597



Διάγραμμα 4.1 Το WF των δενδρυλλίων ελιάς που αρδεύτηκαν με καθαρό νερό (TaW) και επεξεργασμένα αστικά απόβλητα (TWW), καθώς και τα συστατικά τους ανάλογα με την πηγή προέλευσης (WF_{blue} για το νερό δικτύου και WF_{black} για τα επεξεργασμένα αστικά απόβλητα).

4.5.5 Υδατικό Αποτύπωμα τοπικών φυτωρίων Κονσερβολιάς

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιχειρήθηκε ο υπολογισμός του Υδατικού Αποτυπώματος ενός δενδρυλλίου Κονσερβολιάς στο μεγαλύτερο φυτώριο της περιοχής της Άρτας.

Στον Πίνακα 4.12 παρατίθενται οι τιμές της κατανάλωσης νερού (Crop Water Use – CWU), καθώς και το WF_{blue} για ένα δενδρύλλιο ελιάς στο φυτώριο. Το αντίστοιχο WF_{grey} παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.13.

Η κατανάλωση νερού και το WF_{blue} υπολογίστηκαν επιπλέον και για το αντίστοιχο διάστημα που διεξήχθη το πείραμα στο θερμοκήπιο (από Ιούνιο μέχρι αρχές Νοέμβρη) ώστε οι τιμές των WF του πειράματος και του τοπικού φυτωρίου να είναι συγκρίσιμες. Το WF_{total} για κάθε φυτό στο τοπικό φυτώριο ανά έτος υπολογίστηκε ως $WF_{total} = WF_{blue} + WF_{grey} = 0,24 \text{ m}^3/\text{φυτό}$.

Πίνακας 4.12 Ποσότητα κατανάλωσης νερού και WF_{blue} για κάθε δενδρύλλιο ελιάς στο τοπικό φυτώριο

Περίοδος άρδευσης	Ποσότητα νερού σε κάθε άρδευση (m ³)	Αριθμός αρδεύσεων ανά περίοδο άρδευσης	Συνολική ποσότητα νερού άρδευσης ανά περίοδο άρδευσης (m ³)	Αριθμός φυτών	Ποσότητα νερού ανά φυτό για την περίοδο άρδευσης (m ³) (CWU)	WF _{blue} (m ³ /φυτό/περίοδο άρδευσης)
Ολόκληρο το έτος	27	72	1944	8000	0,243	0,243
5,5 μήνες (Ιούνιος – αρχές Νοέμβρη)	27	40	1080	8000	0,135	0,135

Πίνακας 4.13 WF_{grey} για κάθε δενδρύλλιο ελιάς στο τοπικό φυτώριο

Ποσότητα N ανά φυτό (kg)	WF_{grey} ($m^3/φυτό$)
0,000144	0,001309

Καθώς δεν υπάρχουν αντίστοιχα δεδομένα στη βιβλιογραφία, ο κύριος λόγος του υπολογισμού του υδατικού αποτυπώματος ενός δενδρυλλίου ελιάς σε τοπικό φυτώριο ήταν να δοθεί μια τάξη μεγέθους της εξοικονόμησης μπλε νερού που μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων ως εναλλακτική πηγή άρδευσης ακόμα και αν διατηρηθεί το παρόν μοντέλο άρδευσης που ακολουθούν οι τοπικοί φυτωριούχοι. Η εγκατάσταση συστήματος μικρο-άρδευσης, που επιτρέπει τη μείωση της εφαρμοζόμενης ποσότητας νερού, προφανώς επιφέρει ένα επιπλέον κόστος στον φυτωριούχο, καθώς όμως η επέκταση της ελαιοκαλλιέργειας στην περιοχή έχει αυξήσει τη ζήτηση σε δενδρύλλια Κονσερβολιάς για την εγκατάσταση νέων ελαιώνων, το μακροπρόθεσμο κόστος που θα προκύψει από την υπερ-άντληση υδατικών πόρων θα είναι μεγαλύτερο.

Όπως παρατηρήθηκε στην παρούσα εργασία το WF_{total} των τοπικών φυτωρίων ακόμα και όταν υπολογίστηκε για το αντίστοιχο διάστημα που πραγματοποιήθηκε το πείραμα ήταν 10πλάσιο από το αντίστοιχο των δενδρυλλίων του πειράματος. Αυτό βέβαια αποδίδεται στην επικρατούσα στην περιοχή αρδευτική πρακτική στα φυτώρια η οποία δε βασίζεται στις υδατικές ανάγκες των φυτών και δεν πραγματοποιείται με μεθόδους εξοικονόμησης νερού όπως είναι η μικρο-άρδευση. Η μέθοδος άρδευσης που εφαρμόζεται στα φυτώρια της περιοχής δεν είναι αποτελεσματική από πλευράς βιώσιμης διαχείρισης των υδάτινων πόρων, καθώς τεράστιες ποσότητες νερού αντλούνται για άρδευση και στη συνέχεια απορρίπτονται στο περιβάλλον. Αυτό όχι μόνο προκαλεί σημαντικές απώλειες στα υδάτινα αποθέματα αλλά επίσης αυξάνει τη διασπορά των ρύπων λόγω της έκλυσης και μεταφοράς των λιπασμάτων. Η μικρο-άρδευση πετυχαίνει την ομοιόμορφη και ακριβή εφαρμογή του νερού, ελαχιστοποιεί τις απορροές και βελτιώνει την πρόσληψη νερού και θρεπτικών καθιστώντας την πολύ αποτελεσματική μέθοδο άρδευσης (Dong, Wang, Kang, Ma, & Wan, 2022).

4.6 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία έδειξε ότι η εφαρμογή επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων για άρδευση μικρής διάρκειας σε δενδρύλλια Κονσερβολιάς είναι μια αποτελεσματική και ασφαλής εναλλακτική της άρδευσης με καθαρό νερό. Τα φυτά που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα λύματα επέδειξαν καλύτερη επίδοση στις διάφορες παραμέτρους ανάπτυξης και φυσιολογικής κατάστασης σε σύγκριση με τα φυτά που αρδεύτηκαν με νερό δικτύου ή εμπλουτίστηκε το υπόστρωμά τους με ζεόλιθο. Οι δείκτες καταπόνησης που μετρήθηκαν (συγκέντρωση ολικών φαινολών και προλίνης) έδειξαν ότι η εφαρμογή επεξεργασμένων αποβλήτων στα φυτά δεν προκάλεσε κάποια επιπλέον καταπόνηση ούτε κάποια επιβλαβή επίπτωση.

Το υδατικό αποτύπωμα που υπολογίστηκε για τα δενδρύλλια που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα απόβλητα συγκρίθηκε με το αντίστοιχο των φυτών που αρδεύτηκαν με νερό δικτύου εισάγοντας τη διάκριση του μπλε νερού με βάση την πηγή προέλευσης του νερού. Η διάκριση αυτή έδειξε το μεγάλο περιβαλλοντικό κέρδος, σε επίπεδο διασφάλισης των επιφανειακών ή αντλούμενων υπόγειων υδάτων, που μπορεί να επιτευχθεί από την αξιοποίηση των επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων για την άρδευση. Η επαναχρησιμοποίηση

επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων έδωσε τη δυνατότητα για αντικατάσταση σχεδόν του 90% της συνολικής ποσότητας καθαρού νερού που εφαρμόστηκε για την άρδευση των δενδρυλλίων.

Ο υπολογισμός του υδατικού αποτυπώματος των δενδρυλλίων Κονσερβολιάς έθεσε τη βάση για τον υπολογισμό της υδατικής κατανάλωσης των δενδρυλλίων ελιάς στην περιοχή. Η σύγκριση με το αντίστοιχο υδατικό αποτύπωμα που υπολογίστηκε για τα τοπικά φυτώρια δενδρυλλίων ελιάς έδειξε ότι η τοπική πρακτική άρδευσης οδηγεί σε δεκαπλάσια τουλάχιστον κατανάλωση νερού σε σύγκριση με την άρδευση που πραγματοποιήθηκε στο πείραμα και η οποία βασίστηκε στις πραγματικές ανάγκες των φυτών.

Λαμβάνοντας υπόψη την σχετικά υδροβόρα αρδευτική πρακτική των τοπικών φυτωρίων Κονσερβολιάς, αλλά και τα ευρήματα της παρούσας εργασίας σχετικά με την επίδραση των επεξεργασμένων αστικών λυμάτων στην ανάπτυξη και φυσιολογική κατάσταση των δενδρυλλίων ελιάς, προτείνεται τουλάχιστον η μερική αντικατάσταση του νερού άρδευσης που προέρχεται από επιφανειακές πηγές με τα επεξεργασμένα αστικά απόβλητα σε συνδυασμό με μεθόδους μικρό-άρδευσης.

5 Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα

Σε ένα πλαίσιο διαρκώς επεκτεινόμενης και εντατικοποιούμενης ελαιοκαλλιέργειας και μάλιστα σε περιοχές που τα υδατικά αποθέματα είτε υφίστανται ήδη είτε προβλέπεται να υφίστανται στο άμεσο μέλλον πίεση, η άρδευση είναι μεν αναγκαία για τη διασφάλιση της παραγωγής, όταν όμως δεν εφαρμόζεται ορθολογικά θέτει σε κίνδυνο τη βιωσιμότητα των φυσικών πόρων και κατ' επέκταση την περιβαλλοντική βιωσιμότητα της καλλιέργειας. Στην παρούσα εργασία αξιολογήθηκε η επίδραση διαφορετικών πρακτικών άρδευσης στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα της καλλιέργειας Κονσερβολιάς, μιας επιτραπέζιας ποικιλίας ελιάς που έχει σημαντικές προοπτικές για την οικονομία της περιοχής και της χώρας γενικότερα. Οι πρακτικές που αξιολογήθηκαν στην παρούσα εργασία κινήθηκαν είτε στον άξονα μείωσης της εφαρμοζόμενης ποσότητας νερού (με την υιοθέτηση πρακτικών ορθολογικής άρδευσης) είτε στον άξονα αξιοποίησης εναλλακτικών πηγών νερού ή και σε συνδυασμό και των δυο.

Στον πρώτο άξονα, κατά την αξιολόγηση τριών μοντέλων άρδευσης της ελαιοκαλλιέργειας, την ξηρική, τη συμβατική και την ορθολογική με τη χρήση DSS, το WF καθώς και η LCA λειτούργησαν συμπληρωματικά καταλήγοντας σε κάποιες κοινές διαπιστώσεις αναδεικνύοντας θέματα που ίσως γενικότερα να υποεκτιμούνται.

Το πρώτο σημείο που εντόπισαν και οι δυο μεθοδολογίες είναι το αυξημένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα των παραδοσιακών ξηρικών καλλιεργειών σε συνδυασμό με την ανεξέλεγκτη εφαρμογή προϊόντων λίπανσης και φυτοπροστασίας. Οι ξηρικές καλλιέργειες θεωρούνται ως η πιο οικονομική αρδευτική πρακτική. Εξάλλου η αύξηση των ξηρικών καλλιεργειών προτείνεται και από τους Hoekstra et al. (2011) ως λύση για τη μείωση του συνολικού πράσινου αποτυπώματος του πλανήτη. Η ανάλυση όμως του WF καθώς και η LCA στην παρούσα εργασία έδειξαν ότι αυτό για να ισχύσει απαιτεί ευνοϊκές προϋποθέσεις. Η άμεση εξάρτηση της ξηρικής ελαιοκαλλιέργειας από τις κλιματολογικές συνθήκες περιορίζει τις δυνατότητές της αλλά και τις δυνατότητες βελτίωσης της αποδοτικότητάς της. Η χαμηλότερη παραγωγή που παρατηρείται στα ξηρικά ελαιόδεντρα δεν οδηγεί απαραίτητα σε μια περιβαλλοντικά μη βιώσιμη κατάσταση αν το αποτύπωμα των καλλιεργητικών πρακτικών που δέχεται είναι μικρό. Προϋποθέτει δηλαδή ορθολογική διαχείριση όλων των εισροών και εκροών (λίπανση, φυτοπροστασία, διαχείριση ζιζανίων και κλαδευτικών) με γνώμονα είτε το μηδενισμό των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων τους (βιολογική καλλιέργεια) είτε τη σημαντική μείωση τους (ορθολογική καλλιέργεια).

Το δεύτερο κοινό σημείο των δυο μεθοδολογιών εντοπίζεται στην περίπτωση της συμβατικής άρδευσης. Οι αυξημένες αποδόσεις της συμβατικά αρδευόμενης ελαιοκαλλιέργειας δεν αντισταθμίζουν το περιβαλλοντικό κόστος, καθώς σύμφωνα με την παρατηρούμενη επικρατούσα πρακτική σχεδόν πάντα καταλήγει σε υπέρ-άρδευση. Υπέρ-άρδευση δε σημαίνει μόνο μεγαλύτερη κατανάλωση υδατικών πόρων αλλά και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας (ηλεκτρική ενέργεια ή καύσιμα) για τη άντληση του νερού, τη μεταφορά του και την εφαρμογή του.

Η εφαρμογή ορθολογικής άρδευσης με την αξιοποίηση σύγχρονων προσεγγίσεων εκτίμησης παραμέτρων του υδρολογικού ισοζυγίου, όπως τα DSS αποδείχτηκε ως η πιο φιλοπεριβαλλοντική πρακτική και με τις δύο μεθοδολογίες. Εξασφάλισε τη φυσιολογική ανάπτυξη των ελαιόδεντρων και δεν υπέβαλε τα φυτά σε κάποια υδατική καταπόνηση. Η τελική

παραγωγή ήταν μόνο οριακά μικρότερη από αυτή της συμβατικής άρδευσης, ενώ η ποιότητα των καρπών σε πολλές παραμέτρους υπερτερούσε της αντίστοιχης των καρπών που αρδεύτηκαν με βάση την εμπειρία του παραγωγού. Η αξιοποίηση συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων άρδευσης ειδικά προσαρμοσμένων στην καλλιέργεια μπορεί να διασφαλίσει την ομαλή ανάπτυξη και φυσιολογική κατάσταση των δένδρων, καθώς και ικανοποιητικές τελικές αποδόσεις σε ελαιόκαρπο που δεν υπολείπεται σε ποιότητα αυτόν της συμβατικής άρδευσης.

Το τελευταίο κοινό σημείο που ανέδειξαν οι δυο μεθοδολογίες ήταν η οριζόντια, στα τρία διαφορετικά μοντέλα άρδευσης, επίδραση της λίπανσης στην αύξηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Το αυξημένο γκρίζο WF που σημειώθηκε στους ελαιώνες της Ελλάδας σε σύγκριση με αντίστοιχους στην Ιταλία αλλά και η τιμή των σχετικών κατηγοριών επίπτωσης ενδιαμέσου σημείου της LCA υπογραμμίζουν την ανάγκη να μετακινηθούν οι ελαιοπαραγωγοί από το μοντέλο της υπέρ-λίπανσης που έχουν υιοθετήσει στο μοντέλο της ορθολογικής εφαρμογής της για να μπορέσει η καλλιέργεια Κονσερβολιάς να ελαχιστοποιήσει την περιβαλλοντική επιβάρυνση που προκαλεί.

Η Ανάλυση Κύκλου ζωής (LCA) επιβεβαίωσε τα συμπεράσματα που προέκυψαν με την ανάλυση του WF σε πιο διευρυμένο πεδίο περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Υπογράμμισε τη διαφοροποίηση των επιδράσεων ανάλογα με την εστίαση μέσω της επιλογής της λειτουργικής μονάδας. Έτσι όταν μελετήθηκαν οι επιδράσεις των τριών διαφορετικών αρδευτικών πρακτικών σε επίπεδο έκτασης το ξηρικό επέδειξε τις μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενώ αντίθετα όταν μελετήθηκαν οι επιδράσεις σε επίπεδο συγκομιδής η ξηρική καλλιέργεια σημείωσε το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Στον άξονα της εξοικονόμησης υδάτινων πόρων μέσω της αξιοποίησης των εναλλακτικών πηγών νερού στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση της άρδευσης με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα στην ανάπτυξη και τη φυσιολογική κατάσταση μονοετών δενδρυλλίων Κονσερβολιάς για χρονικό διάστημα περίπου έξι μηνών. Η εφαρμογή αυτή δε προκάλεσε κάποια επιβλαβή επίπτωση στην ανάπτυξη των φυτών. Απεναντίας τα φυτά που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα απόβλητα επέδειξαν παρόμοια αύξηση του ύψους, παρόμοια βιομάζα και υψηλότερη φιλική επιφάνεια και αύξηση της διαμέτρου του βλαστού σε σύγκριση με τα φυτά που αρδεύτηκαν με καθαρό νερό. Η συγκέντρωση των φωτοσυνθετικών χρωστικών ήταν αυξημένη σε σύγκριση με την αντίστοιχη των φυτών που αρδεύτηκαν με καθαρό νερό, ενώ οι συγκεντρώσεις των περισσότερων θρεπτικών στα φύλλα των φυτών δε διέφεραν μεταξύ των αρδευόμενων με επεξεργασμένα απόβλητα και με καθαρό νερό νεαρών ελαιόδεντρων. Οι παρόμοιες με του μάρτυρα συγκεντρώσεις των φαινολικών ουσιών αλλά και της προλίνης έδειξαν ότι τα φυτά δεν υπέστησαν κάποια υδατική καταπόνηση. Η εφαρμογή επεξεργασμένων αστικών λυμάτων για την άρδευση αποτέλεσε επομένως μια ασφαλή πρακτική εξοικονόμησης πόρων φρέσκου νερού. Η ανάλυση του WF με μια προσέγγιση διάκρισης ανάλογα με την προέλευση του νερού έδειξε το μεγάλο περιβαλλοντικό κέρδος, σε επίπεδο διασφάλισης πόρων μπλε νερού, που μπορεί να επιτευχθεί από την αξιοποίηση των επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων για την άρδευση, ενώ η σύγκριση του WF με το αντίστοιχο τοπικών φυτωρίων όπου εφαρμόζονται σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες νερού άρδευσης έδωσε το μέγεθος της διασφάλισης αυτής. Ο συνδυασμός ορθολογικής άρδευσης με εναλλακτικές πηγές νερού αποτελεί σημαντική εναλλακτική της επικρατούσας αρδευτικής πρακτικής.

Το WF και η LCA αποτελούν διακριτές μεθοδολογίες αποτύπωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων διαφόρων διεργασιών. Στην παρούσα διατριβή η εφαρμογή και των δύο μεθοδολογιών σημείωσε τις αδυναμίες και ανέδειξε τα δυνατά σημεία της κάθε αρδευτικής πρακτικής, δίνοντας τη δυνατότητα για προτάσεις δράσεων βελτίωσης της περιβαλλοντικής επίδοσής τους. Το WF έδωσε ακριβή εικόνα του μοτίβου κατανάλωσης των υδάτινων πόρων και της επίδρασης του μοτίβου αυτού στον τελικό αποδέκτη. Η LCA έδωσε ολοκληρωμένη εικόνα των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων της κάθε πρακτικής. Όταν οι δυο μεθοδολογίες εφαρμόζονται συνδυαστικά συμπληρώνουν τα κενά στην πληροφορία και μπορούν να δώσουν ευρεία και λεπτομερή αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των διάφορων πρακτικών και διεργασιών, αναβαθμίζοντας την αποτελεσματικότητά τους ως εργαλεία σχεδιασμού φιλοπεριβαλλοντικών στρατηγικών διαχείρισης των φυσικών πόρων.

Μελλοντικές προοπτικές

Η αξιοποίηση στην παρούσα εργασία δυο μεθοδολογιών αποτύπωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της καλλιέργειας Κονσερβολιάς έδειξε ότι η εξοικονόμηση νερού είτε μέσω της μείωσης της εφαρμοζόμενης ποσότητας είτε μέσω της αξιοποίησης εναλλακτικών πηγών νερού είτε και συνδυασμού και των δυο, συνιστά μια ασφαλή και αποτελεσματική πρακτική διασφάλισης των υδάτινων πόρων και μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλεί η εντατικοποιημένη ελαιοκαλλιέργεια.

Και το WF και η LCA εντόπισαν, σε επίπεδο περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τις αδυναμίες και τα δυνατά σημεία της ξηρικής καλλιέργειας, της ορθολογικής και της συμβατικής άρδευσης και έδωσαν τη βάση για την ανάπτυξη αποτελεσματικότερων μοντέλων διαχείρισης των υδάτινων πόρων με γνώμονα την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της καλλιέργειας.

Στον άξονα της μείωσης της εφαρμοζόμενης ποσότητας νερού τα ευρήματα της παρούσας εργασίας που εντόπισε τη μείωση της αποτελεσματικότητας των ξηρικών ελαιώνων λόγω της άμεσης εξάρτησής τους από της κλιματολογικές συνθήκες μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για διερεύνηση της δυνατότητας συλλογής και διατήρησης του βρόχινου νερού και αξιοποίησής του είτε για άρδευση στα κρίσιμα στάδια είτε για την πραγματοποίηση της σταδιακής εφαρμογής της λίπανσης. Η επιβεβαίωση ότι η ορθολογική άρδευση με τη βοήθεια συστήματος υποστήριξης αποφάσεων άρδευσης συνιστά την πιο φιλοπεριβαλλοντική και αποτελεσματική από πλευράς παραγωγής μέθοδο άρδευσης είναι το πρώτο βήμα στην ευρύτερη αξιοποίησή της έπειτα από τη βελτιστοποίηση της εξατομικευμένης προσαρμογής του συστήματος στην κάθε εκμετάλλευση.

Καθώς και οι δυο μεθοδολογίες (LCA και WF) ανέδειξαν τη σημαντική συμμετοχή της λίπανσης στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της καλλιέργειας της Κονσερβολιάς θα είχε ενδιαφέρον να αξιολογηθεί η επίδραση της αξιοποίησης συστημάτων παροχής συμβουλών λίπανσης ή υδρολίπανσης στα υδατικά αποθέματα και τους υδάτινους αποδέκτες ή και στο περιβάλλον γενικότερα.

Στον άξονα της αξιοποίησης εναλλακτικών πηγών νερού για την άρδευση, τα ευρήματα της παρούσας εργασίας μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για περαιτέρω διερεύνηση με την εφαρμογή του WF και της LCA της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας είτε της διεύρυνσης της

εφαρμογής σε μεγαλύτερη κλίμακα στον αγρό είτε στη διερεύνηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων εφαρμογής άλλων εναλλακτικών πηγών άρδευσης όπως τα απόβλητα ελαιουργιών.

Τέλος σε επίπεδο περιβαλλοντικών δεικτών, καθώς στην παρούσα εργασία φάνηκε η συμπληρωματική δράση των δυο μεθοδολογιών στην ολοκληρωμένη εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της καλλιέργειας της Κονσερβολιάς, θα είχε ενδιαφέρον να διερευνηθεί η συνέργεια των δυο μεθοδολογιών. Η ευρεία αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που πετυχαίνει η LCA και η ακριβής και ρεαλιστική αποτύπωση της χρήσης νερού που προσφέρει το WF μπορούν να οδηγήσουν σε πιο ολοκληρωμένα και πλήρη μοντέλα διερεύνησης της επίδρασης των διάφορων διεργασιών στους φυσικούς πόρους.

Βιβλιογραφία

- Ahmadipor, S., Arji, I., Ebadi, A., & Abdossi, V. (2018). Physiological and biochemical responses of some olive cultivars (*Olea europaea* L.) to water stress. *Cellular and Molecular Biology*, 64(15), 20–29. <https://doi.org/10.14715/cmb/2017.64.15.4>
- Al-Suhaibani, N., Seleiman, M. F., El-Hendawy, S., Abdella, K., Alotaibi, M., & Alderfasi, A. (2021). Integrative effects of treated wastewater and synthetic fertilizers on productivity, energy characteristics, and elements uptake of potential energy crops in an arid agro-ecosystem. *Agronomy*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy11112250>
- Allan, J. A. (1993). Fortunately There are Substitutes for Water, Otherwise our Hydro-Political Futures Would be Impossible. *Priorities for Water Resources Allocation and Management*, 13–26. London, UK: Overseas Development Administration
- Allan, J. A. (2002). Hydro-Peace in the Middle East: Why no Water Wars? A Case Study of the Jordan River Basin. *SAIS Review*, XXII(2), 255–272.
- Allan, J. A. (1997). “Virtual water”: a long term solution for water short Middle Eastern economies? *Paper Presented at the 1997 British Association Festival of Science. Water and Development Session: University of Leeds*, 5145(14). Leeds.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 - Crop Evapotranspiration*.
- Alvarez-Holguin, A., Sosa-Perez, G., Ponce-Garcia, O. C., Lara-Macias, C. R., Villarreal-Guerrero, F., Monzon-Burgos, C. G., & Ochoa-Rivero, J. M. (2022). The Impact of Treated Wastewater Irrigation on the Metabolism of Barley Grown in Arid and Semi-Arid Regions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph19042345>
- Amenumey, S. E., & Capel, P. D. (2014). Fertilizer consumption and energy Input for 16 crops in the United States. *Natural Resources Research*, 23, 299–309. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11053-013-9226-4>
- Angelakis, A. N., & Snyder, S. A. (2015). Wastewater treatment and reuse: Past, present, and future. *Water (Switzerland)*, 7(9), 4887–4895. <https://doi.org/10.3390/w7094887>
- Arji, I., Ahmadipour, S., Ebadi, A., & Abdosi, V. (2021). Biochemical changes of some olive (*Olea europaea* L.) cultivars under water-deficit stress. *Acta Horticulturae*, 1315(2014), 383–390. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1315.57>
- Bacenetti, J., Paleari, L., Tartarini, S., Vesely, F. M., Foi, M., Movedi, E., ... Confalonieri, R. (2020). May smart technologies reduce the environmental impact of nitrogen fertilization? A case study for paddy rice. *Science of the Total Environment*, 715. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136956>
- Balafoutis, A., Koundouras, S., Anastasiou, E., Fountas, S., & Arvanitis, K. (2017). Life Cycle Assessment of two vineyards after the application of precision viticulture techniques: A case study. *Sustainability*, 9(11), 1997. <https://doi.org/10.3390/su9111997>
- Barouchas, P. E., Vatista, P., Kalantzis, E., & Moustakas, N. K. (2021). Seasonal changes of macronutrients concentration in olive trees grown in acid and in alkaline soils. *Notulae*

- Barouchas, P. Automatic Portable and Digital Soil Calcimeter. World Intellectual Property Organization, WIPO Publication No. WO2014060782 A1, 24 April 2014.
- Barouchas, P. FOG II—A New Innovative Portable Instrument for the Total Calcium Carbonate Soil Testing. In *Proceedings of the 20th World Congress of Soil Science*, Jeju, Korea, 8–13 June 2014; pp. 4–106, AF2494. ISBN: 978-1-5108-3668-6
- Barrs, H. D., & Weatherley, P. E. (1962). A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian Journal of Biological Science*, 15(3), 413–428. <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/BI9620413>
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205–207. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Becerra-Castro, C., Lopes, A. R., Vaz-Moreira, I., Silva, E. F., Manaia, C. M., & Nunes, O. C. (2015). Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. *Environment International*, 75, 117–135. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.001>
- Bedbabis, S., Ben Rouina, B., Boukhris, M., & Ferrara, G. (2014). Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate. *Journal of Environmental Management*, 133, 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.007>
- Bedbabis, S., & Ferrara, G. (2018). Effects of long term irrigation with treated wastewater on leaf mineral element contents and oil quality in olive cv. Chemlali. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 93(2), 216–223. <https://doi.org/10.1080/14620316.2017.1354729>
- Bedbabis, S., Ferrara, G., Ben Rouina, B., & Boukhris, M. (2010). Effects of irrigation with treated wastewater on olive tree growth, yield and leaf mineral elements at short term. *Scientia Horticulturae*, 126(3), 345–350. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.07.020>
- Belaud, G., Mateos, L., Aliod, R., Buisson, M. -C., Faci, E., Gendre, S., ... Zapata, N. (2020). Irrigation and energy: Issues and challenges. *Irrigation and Drainage*, 69(S1), 177–185. <https://doi.org/10.1002/ird.2343>
- Ben Abdallah, S., Elfkih, S., Suárez-Rey, E. M., Parra-López, C., & Romero-Gámez, M. (2021). Evaluation of the environmental sustainability in the olive growing systems in Tunisia. *Journal of Cleaner Production*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124526>
- Ben Hassena, A., Zouari, M., Trabelsi, L., Khabou, W., & Zouari, N. (2018). Physiological improvements of young olive tree (*Olea europaea* L. cv. Chetoui) under short term irrigation with treated wastewater. *Agricultural Water Management*, 207(August), 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.024>
- Berbel, J., & Martínez-Dalmau, J. (2021). A simple agro-economic model for optimal farm nitrogen application under yield uncertainty. *Agronomy*, 11(6), 1107. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061107>
- Bernardi, B., Falcone, G., Stillitano, T., Benalia, S., Strano, A., Bacenetti, J., & De Luca, A. I. (2018).

- Harvesting system sustainability in Mediterranean olive cultivation. *Science of the Total Environment*, 625, 1446–1458. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.005>
- Boulay, A.-M., Hoekstra, A. Y., & Vionnet, S. (2013). Complementarities of water-focused Life Cycle Assessment and Water Footprint assessment. *Environmental Science & Technology*, 47(21), 11926–11927. <https://doi.org/10.1021/es403928f>
- Boulay, A. M., Bare, J., De Camillis, C., Döll, P., Gassert, F., Gerten, D., ... Pfister, S. (2015). Consensus building on the development of a stress-based indicator for LCA-based impact assessment of water consumption: outcome of the expert workshops. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(5), 577–583. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0869-8>
- Bourazanis, G., Roussos, P. A., Argyrokastritis, I., Kosmas, C., & Kerkides, P. (2016). Evaluation of the use of treated municipal waste water on the yield, oil quality, free fatty acids' profile and nutrient levels in olive trees cv Koroneiki in Greece. *Agricultural Water Management*, 163, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.023>
- Bouyoucos, G. J. (1936). Directions for making mechanical analysis of soils by the hydrometer method. *Soil Science*, 42, 27–40. <https://doi.org/10.1097/00010694-193609000-00007>
- Bremner, J. M., & Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen-Total. In A. Page (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties* (pp. 595–624). <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31>
- Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A. M., Bourgault, G., De Bruille, V., ... Jolliet, O. (2019). IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(9), 1653–1674. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>
- Cerutti, A. K., Beccaro, G. L., Bruun, S., Bosco, S., Donno, D., Notarnicola, B., & Bounous, G. (2014). Life cycle assessment application in the fruit sector: State of the art and recommendations for environmental declarations of fruit products. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.017>
- Charchousi, D., Tsoukala, V. K., & Papadopoulou, M. P. (2015). How evapotranspiration process may affect the estimation of water footprint indicator in agriculture? *Desalination and Water Treatment*, 53(12), 3234–3243. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.934118>
- Chartzoulakis, K. (2015). Sustainable irrigation scheduling and water quality for olives. In A. Khalid, S. Mahmood, & M. Centritto (Eds.), *Sustainable Agriculture Water Management in a Changing Environment: a Special Focus on Olive Tree* (pp. 18–24). Rawalpindi, Pakistan: Department of Environmental Sciences, PMAS-Arid Agriculture University Rawalpindi-IVALS.
- Chouchane, H., Hoekstra, A. Y., Krol, M. S., & Mekonnen, M. M. (2015). The water footprint of Tunisia from an economic perspective. *Ecological Indicators*, 52, 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.015>
- Dang, Q., Tan, W., Zhao, X., Li, D., Li, Y., Yang, T., ... Xi, B. (2019). Linking the response of soil microbial community structure in soils to long-term wastewater irrigation and soil depth. *Science of the Total Environment*, 688, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.138>

- Dar, M. I., Naikoo, M. I., Rehman, F., Khan, F. N., & Ahmad, F. (2015). Proline pccumulation in plants: Roles in stress tolerance and plant development. In N. Iqbal & R. Nazar (Eds.), *Osmolytes and Plants Acclimation to Changing Environment: Emerging Omics Technologies* (pp. 1–170). <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2616-1>
- Darré, E., Cadenazzi, M., Mazzilli, S. R., Rosas, J. F., & Picasso, V. D. (2019). Environmental impacts on water resources from summer crops in rainfed and irrigated systems. *Journal of Environmental Management*, 232, 514–522. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.090>
- De Baan, L., Alkemade, R., & Koellner, T. (2013). Land use impacts on biodiversity in LCA: A global approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(6), 1216–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0412-0>
- de Bruille, V. (2014). *Impact de l'utilisation des ressources minérales et métalliques dans un contexte cycle de vie: une approche fonctionnelle* (UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL). Retrieved from https://publications.polymtl.ca/1591/1/2014_VincentDeBruille.pdf
- De Las Heras, J., & Mañas, P. (2020). Reclaimed wastewater to irrigate olive groves and vineyards: Effects on soil properties. *Agronomy*, 10(5), 1–15. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050649>
- De Smedt, C., Someus, E., & Spanoghe, P. (2015). Potential and actual uses of zeolites in crop protection. *Pest Management Science*, 71(10), 1355–1367. <https://doi.org/10.1002/ps.3999>
- Deng, S., Yan, X., Zhu, Q., & Liao, C. (2019). The utilization of reclaimed water: Possible risks arising from waterborne contaminants. *Environmental Pollution*, 254, 113020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113020>
- Dichio, B., Palese, A. M., Montanaro, G., Xylogiannis, C., & Sofo, A. (2014). A preliminary assessment of water footprint components in a Mediterranean olive grove. *Acta Horticulturae*, 1038(2002), 671–676. <https://doi.org/10.13140/2.1.1822.5928>
- Dong, S., Wang, G., Kang, Y., Ma, Q., & Wan, S. (2022). Soil water and salinity dynamics under the improved drip-irrigation scheduling for ecological restoration in the saline area of Yellow River basin. *Agricultural Water Management*, 264(August 2021), 107255. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107255>
- Ecoinvent (2014). *Ecoinvent Database Version 3.1 Inventories*, Swiss Centre for Life Cycle. Switzerland.
- Elfanssi, S., Ouazzani, N., & Mandi, L. (2018). Soil properties and agro-physiological responses of alfalfa (*Medicago sativa* L.) irrigated by treated domestic wastewater. *Agricultural Water Management*, 202(June 2017), 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.003>
- Erel, R., Eppel, A., Yermiyahu, U., Ben-Gal, A., Levy, G., Zipori, I., ... Dag, A. (2019). Long-term irrigation with reclaimed wastewater: Implications on nutrient management, soil chemistry and olive (*Olea europaea* L.) performance. *Agricultural Water Management*, 213(October 2018), 324–335. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.033>
- 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, 216–230. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.04.003>

- European Commission (2011). ILCD handbook Recommendations for life cycle impact assessment in the European context. In *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook*. <https://doi.org/10.278/33030>
- European Commission (2022). Olive oil in the EU. Retrieved January 31, 2022, from https://agriculture.ec.europa.eu/farming/crop-productions-and-plant-based-products/olive-oil_en
- FAO (2022a). AQUASTAT Core Database. Retrieved January 31, 2022, from Food and Agriculture Organization of the United Nations. website: <https://www.fao.org/aquastat/statistics/query/index.html?lang=en>
- FAO (2022b). Food and Agriculture Data. Retrieved January 31, 2022, from Food and Agriculture Organization of the United Nations website: <https://fenix.fao.org/faostat/internal/en/#data/QCL>
- Farhadkhani, M., Nikaee, M., Yadegarfar, G., Hatamzadeh, M., Pourmohammadbagher, H., Sahbaei, Z., & Rahmani, H. R. (2018). Effects of irrigation with secondary treated wastewater on physicochemical and microbial properties of soil and produce safety in a semi-arid area. *Water Research*, 144, 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.047>
- Fernández-Lobato, L., López-Sánchez, Y., Blejman, G., Jurado, F., Moyano-Fuentes, J., & Vera, D. (2021). Life Cycle Assessment of the Spanish virgin olive oil production: A case study for Andalusian region. *Journal of Cleaner Production*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125677>
- Figueiredo, F., Castanheira, É. G., & Freire, F. (2017). Life-Cycle Assessment of irrigated and rainfed sunflower addressing uncertainty and land use change scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 140, 436–444. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.151>
- Fishelson, G. (1994). The Allocation and Marginal Value Product of Water in Israeli Agriculture. *Studies in Environmental Science*, 58, 427–440. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(08\)71428-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0166-1116(08)71428-6)
- Fraga, H., Moriondo, M., Leolini, L., & Santos, J. A. (2021). Mediterranean olive orchards under climate change: A review of future impacts and adaptation strategies. *Agronomy*, 11(1), 1–15. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010056>
- Frenk, S., Hadar, Y., & Minz, D. (2014). Resilience of soil bacterial community to irrigation with water of different qualities under Mediterranean climate. *Environmental Microbiology*, 16(2), 559–569. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12183>
- Fridman, D., Biran, N., & Kissinger, M. (2021). Beyond blue: An extended framework of blue water footprint accounting. *Science of the Total Environment*, 777, 146010. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146010>
- Frischknecht, R., Braunschweig, A., Hofstetter, P., & Suter, P. (2000). Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 20(2), 159–189. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(99\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(99)00042-6)
- Fukasawa, T., Horigome, A., Karisma, A. D., Maeda, N., Huang, A. N., & Fukui, K. (2018). Utilization of incineration fly ash from biomass power plants for zeolite synthesis from coal fly ash by microwave hydrothermal treatment. *Advanced Powder Technology*, 29(3), 450–456.

<https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.10.022>

- Galavi, M., Jalali, A., Ramroodi, M., Mousavi, S. R., & Galavi, H. (2010). Effects of treated municipal wastewater on soil chemical properties and heavy metal uptake by sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Journal of Agricultural Science*, 2(3), 235–241. <https://doi.org/10.5539/jas.v2n3p235>
- Gatta, G., Gagliardi, A., Disciglio, G., Lonigro, A., Francavilla, M., Tarantino, E., & Giuliani, M. M. (2018). Irrigation with treated municipal wastewater on artichoke crop: Assessment of soil and yield heavy metal content and human risk. *Water (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/w10030255>
- Gestring, W. D., & Soltanpour, P. N. (1981). Boron analysis in soil extracts and plant tissue by plasma emission spectroscopy. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 12(8), 733–742. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/00103628109367189>
- Giannocco, G., Arborea, S., de Gennaro, B. C., Iacobellis, V., & Piccinni, A. F. (2019). Assessing reclaimed urban wastewater for reuse in agriculture: Technical and economic concerns for Mediterranean regions. *Water (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/w11071511>
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., Schryver, A. De, Struijs, J., & Zelm, R. Van. (2009). ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation. Retrieved from http://www.pre-sustainability.com/download/misc/ReCiPe_main_report_final_27-02-2009_web.pdf
- Gomez-Gomez, J. de D., Pulido-Velazquez, D., Collados-Lara, A. J., & Fernandez-Chacon, F. (2022). The impact of climate change scenarios on droughts and their propagation in an arid Mediterranean basin. A useful approach for planning adaptation strategies. *Science of the Total Environment*, 820, 153128. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153128>
- Grant, T., Cruyppenninck, H., Eady, S., & Mata, G. (2014). AusAgLCI methodology for developing life cycle inventory. In *Rural Industries Research and Development Corp.*, Australia
- Green Delta GmbH. (2021). *Green Delta Open LCA Version 1.10*. Retrieved from <https://www.openlca.org/download/>
- Gronlund, C. J., Humbert, S., Shaked, S., & Neill, M. S. O. (2016). Intake fraction for particulate matter: Recommendations for life cycle impact assessment. *Environmental Science & Technology*, 8(1), 29–46. <https://doi.org/10.1007/s11869-014-0283-6>. Characterizing
- Gucci, R., & Fereres, E. (2012). Chapter 4.1 Fruit trees and vines: Olive. In P. Steduto, T. C. Hsiao, E. Fereres, & D. Raes (Eds.), *Crop Yield Response to Water*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Guedes, P., Martins, C., Couto, N., Silva, J., Mateus, E. P., Ribeiro, A. B., & Pereira, C. S. (2022). Irrigation of soil with reclaimed wastewater acts as a buffer of microbial taxonomic and functional biodiversity. *Science of the Total Environment*, 802, 149671. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149671>
- Guinée, J. B., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Wegener Sleeswijk, A., ... Huijbregts, M. a. J. (2001). Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards (J. B. Guinée, Ed.). Retrieved from <http://www.gbv.de/dms/hbz/toc/ht013470560.pdf>

- Hashem, M. S., & Qi, X. Bin. (2021). Treated wastewater irrigation-a review. *Water (Switzerland)*, 13(11), 1–37. <https://doi.org/10.3390/w13111527>
- Hauschild, M. Z., & Wenzel, H. (1998). *Environmental Assessment of Products: Volume 2: Scientific Background*. London, UK: Chapman & Hall.
- Hayat, S., Hayat, Q., Alyemeni, M. N., Wani, A. S., Pichtel, J., & Ahmad, A. (2012). Role of proline under changing environments: A review. *Plant Signaling and Behavior*, 7(11). <https://doi.org/10.4161/psb.21949>
- Heijungs, R., & Guinee, J. B. (2012). An overview of the Life Cycle Assessment method - Past, present, and future. In M. A. Curran (Ed.), *Life Cycle Assessment Handbook* (pp. 15–42). Beverly, MA: Scrivener Publishing LLC.
- Helmes, R. J. K., Huijbregts, M. A. J., Henderson, A. D., & Jolliet, O. (2012). Spatially explicit fate factors of phosphorous emissions to freshwater at the global scale. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(5), 646–654. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0382-2>
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., ... Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3, 816–821. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/nclimate1911>
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012a). Reply to Ridoutt and Huang: From water footprint assessment to policy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(22), E1425–E1425. <https://doi.org/10.1073/pnas.1205186109>
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012b). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(9), 3232–3237. <https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109>
- Hoekstra, A. Y. (2016). A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA. *Ecological Indicators*, 66, 564–573. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.026>
- Hoekstra, A. Y., Ashok K. Chapagain, Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual. In *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4324/9781849775526>
- Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2002). A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. *Water Research*, 49(11), 203–209. Retrieved from <http://waterfootprint.org/en/water-footprint/national-water-footprint/virtual-water-trade/>
- Horneck, D., & Miller, R. (1998). Determination of total nitrogen in plant tissue. In Y. Kalra (Ed.), *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis* (pp. 75–83). CRC Press.
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., ... van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Humbert, S., Marshall, J. D., Shaked, S., Spadaro, J. V., Nishioka, Y., Preiss, P., ... Jolliet, O. (2011). Intake fraction for particulate matter: Recommendations for life cycle impact assessment. *Environmental Science and Technology*, 45(11), 4808–4816.

Ibekwe, A. M., Gonzalez-Rubio, A., & Suarez, D. L. (2018). Impact of treated wastewater for irrigation on soil microbial communities. *Science of the Total Environment*, 622–623, 1603–1610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.039>

IOC (2022). World Olive Oil and Table Olive Figures. Retrieved January 31, 2022, from International Olive Council website: <https://www.internationaloliveoil.org/what-we-do/economic-affairs-promotion-unit/#figures>

IOOC (2020). International Olive Council: EU table olive figures. Retrieved from <https://www.internationaloliveoil.org/what-we-do/economic-affairs-promotion-unit/#figures>

IPCC (2014). Climate Change 2014 Part A: Global and Sectoral Aspects. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved from [papers2://publication/uuid/B8BF5043-C873-4AFD-97F9-A630782E590D](https://www.ipcc.ch/publications_and_materials/publications_and_materials/publications/papers2/publication/uuid/B8BF5043-C873-4AFD-97F9-A630782E590D)

Jarosz, R., Szerement, J., Gondek, K., & Mierzwa-Hersztek, M. (2022). The use of zeolites as an addition to fertilisers – A review. *Catena*, 213(February), 106125. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106125>

Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6), 324–330. <https://doi.org/10.1007/BF02978505>

Kampouris, I. D., Agrawal, S., Orschler, L., Cacace, D., Kunze, S., Berendonk, T. U., & Klümper, U. (2021). Antibiotic resistance gene load and irrigation intensity determine the impact of wastewater irrigation on antimicrobial resistance in the soil microbiome. *Water Research*, 193. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116818>

Kampouris, I. D., Klümper, U., Agrawal, S., Orschler, L., Cacace, D., Kunze, S., & Berendonk, T. U. (2021). Treated wastewater irrigation promotes the spread of antibiotic resistance into subsoil pore-water. *Environment International*, 146 (October 2020), 106190. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106190>

Kayikcioglu, H. H. (2012). Short-term effects of irrigation with treated domestic wastewater on microbiological activity of a Vertic xerofluent soil under Mediterranean conditions. *Journal of Environmental Management*, 102, 108–114. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.12.034>

Kumar, M., Tak, Y., Potkule, J., Choyal, P., Tomar, M., Meena, N. L., & Kaur, C. (2020). Phenolics as plant protective companion against abiotic stress. In *Plant Phenolics in Sustainable Agriculture*. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4890-1_12

Kumar, S., Bhushan, B., Wakchaure, G. C., Meena, K. K., Kumar, M., Meena, N. L., & Rane, J. (2020). Plant phenolics under water-deficit conditions: Biosynthesis, accumulation, and physiological roles in water stress alleviation. In L. Rafiq, R. Shuab, & A. N. Kamili (Eds.), *Plant Phenolics in Sustainable Agriculture, Volume 1* (pp. 451–465). <https://doi.org/10.1007/978-981-15-4890-1>

- Langgut, D., Cheddadi, R., Woodbridge, Carrión, J., Cavanagh, M., Colombaroli, D., ... Jessie, W. (2019). The origin and spread of olive cultivation in the Mediterranean Basin - The fossil pollen evidence. *The Holocene*, 29(5), 902–922. <https://doi.org/10.1177/0959683619826654>
- Lee, J.-Y., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J. P., ... Zhou, T. (2021). Future global climate: Scenario-based projections and near-term information supplementary material. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.006.553>
- Libutti, A., Gatta, G., Gagliardi, A., Vergine, P., Pollice, A., Beneduce, L., ... Tarantino, E. (2018). Agro-industrial wastewater reuse for irrigation of a vegetable crop succession under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, 196, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.015>
- Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. (2005). Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Handbook of Food Analytical Chemistry*, 2–2, 171–178. <https://doi.org/10.1002/0471709085.ch21>
- Lieder, S., & Schröter-Schlaack, C. (2021). Smart farming technologies in arable farming: Towards a holistic assessment of opportunities and risks. *Sustainability*, 13(12), 6783. <https://doi.org/10.3390/su13126783>
- Lindsay, W. L. and Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 42:421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
- Lonigro, A., Rubino, P., Lacasella, V., & Montemurro, N. (2016). Faecal pollution on vegetables and soil drip irrigated with treated municipal wastewaters. *Agricultural Water Management*, 174, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.001>
- Lopes, J. I., Arrobas, M., Raimundo, S., Gonçalves, A., Brito, C., Martins, S., ... Rodrigues, M. Â. (2022). Photosynthesis, yield, nutrient availability and soil properties after biochar, zeolites or mycorrhizal inoculum application to a mature rainfed olive orchard. *Agriculture (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/agriculture12020171>
- Love, S. (2017) Field Methods for the Analysis of Mud Brick Architecture. *J. Field Arch.*, 42, 1–13. <https://doi.org/10.1080/00934690.2017.1345222>
- Lyu, S., Wu, L., Wen, X., Wang, J., & Chen, W. (2022). Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil-crop systems in China: A review. *Science of the Total Environment*, 813, 152531. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152531>
- Maffia, A., Pergola, M., Palese, A. M., & Celano, G. (2020). Environmental impact assessment of organic vs. Integrated olive-oil systems in Mediterranean context. *Agronomy*, 10(3), 1–21. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030416>
- Mailer, R. J. (2012). Cultivation of olives in Australia. In D. Boskou (Ed.), *Olive Oil - Constituents, Quality, Health Properties and Bioconversions* (pp. 211–232). <https://doi.org/10.5772/36235>
- Majsztrik, J. C., Price, E. W., & King, D. M. (2013). Environmental benefits of wireless sensor-based

- irrigation networks: Case-study projections and potential adoption rates. *HortTechnology*, 23(6), 783–793. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.23.6.783>
- Malamos, N., Tsirogiannis, I. L., & Christofides, A. (2016). Modelling irrigation management services: The IRMA-SYS case. *International Journal of Sustainable Agricultural Management and Informatics*, 2(1), 1–18. <https://doi.org/10.1504/IJSAMI.2016.077264>
- Malamos, N., Tsirogiannis, I. L., Tegos, A., Efstratiadis, A., & Koutsoyiannis, D. (2017). Spatial interpolation of potential evapotranspiration for precision irrigation purposes. *European Water*, (59), 303–309.
- McGuire, R. G. (1992). Reporting of objective color measurements. *HortScience*, 27(12), 1254–1255. <https://doi.org/10.21273/hortsci.27.12.1254>
- Mechri, B., Tekaya, M., Hammami, M., & Chehab, H. (2020). Effects of drought stress on phenolic accumulation in greenhouse-grown olive trees (*Olea europaea*). *Biochemical Systematics and Ecology*, 92(June), 104112. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2020.104112>
- Mehmeti, A., Todorovic, M., & Scardigno, A. (2016). Assessing the eco-efficiency improvements of Sinistra Ofanto irrigation scheme. *Journal of Cleaner Production*, 138, 208–216. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.085>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Sustainability: Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), 1–7. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>
- Meza-Palacios, R., Aguilar-Lasserre, A. A., Morales-Mendoza, L. F., Rico-Contreras, J. O., Sánchez-Medel, L. H., & Fernández-Lambert, G. (2020). Decision support system for NPK fertilization: a solution method for minimizing the impact on human health, climate change, ecosystem quality and resources. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 55(11), 1267–1282. <https://doi.org/10.1080/10934529.2020.1787012>
- Michalopoulos, G., Kasapi, K. A., Koubouris, G., Psarras, G., Arampatzis, G., Hatzigiannakis, E., ... Kokkinos, G. (2020). Adaptation of Mediterranean olive groves to climate change through sustainable cultivation practices. *Climate*, 8(4), 54. <https://doi.org/10.3390/cli8040054>
- Mirabella, N., Castellani, V., & Sala, S. (2014). LCA for assessing environmental benefit of eco-design strategies and forest wood short supply chain: A furniture case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 1536:1550. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0757-7>
- Mok, H. F., Barker, S. F., & Hamilton, A. J. (2014). A probabilistic quantitative microbial risk assessment model of norovirus disease burden from wastewater irrigation of vegetables in Shepparton, Australia. *Water Research*, 54, 347–362. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.060>
- Montesano, F. F., van Iersel, M. W., Boari, F., Cantore, V., D’Amato, G., & Parente, A. (2018). Sensor-based irrigation management of soilless basil using a new smart irrigation system: Effects of set-point on plant physiological responses and crop performance. *Agricultural Water Management*, 203(January), 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.019>
- Murphy, B. (2015). Key soil functional properties affected by soil organic matter - Evidence from published literature. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 25(1), 6–11.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/25/1/012008>

- Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural water. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31–36. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., ... Zhang, H. (2013). Anthropogenic and natural radiative forcing. In D. Jacob, A. R. Ravishankara, & K. Shine (Eds.), *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 9781107057, pp. 659–740). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>
- Naija, D. S., Ben Mansour Gueddes, S., Cheraief, I., Ben Mariem, F., Ghariani, W., & Braham, M. (2021). Olive antioxidants under climatic conditions. *Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus*, 20(5), 43–61. <https://doi.org/10.24326/asphc.2021.5.5>
- Nanos, G. D., Pliakoni, E., Daenas, D., Amodio, M. L., & Colelli, G. (2008). Effect of deficit irrigation on olive and olive oil quality during fruit storage. In A. Santini, N. Lamaddalena, G. Severino, & P. M. (Eds.), *Irrigation in Mediterranean agriculture: Challenges and innovation for the next decades* (Vol. 84, pp. 77–83). Bari: CIHEAM.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In A. Page (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties* (2nd ed., pp. 539–579). <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
- Nelson, R. E. (1982). Carbonate and gypsum. In A. Page (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties* (pp. 181–197). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c11>
- Nemecek, T., Bengoa, X., Rossi, V., Humbert, S., Lansche, J., & Mouron, P. (2014). Methodological guidelines for the life cycle inventory of agricultural products. Version 3.5. In *World Food LCA Database (WFLDB)*. Lausanne and Zurich, Switzerland.
- Nemecek, Thomas, & Kägi, T. (2007). Life cycle inventories of agricultural production systems, Ecoinvent report No. 15. In *Final. Rep. Ecoinvent V2.0*. Zurich, Switzerland.
- Niavis, S., Tamvakis, N., Manos, B., & Vlontzos, G. (2018). Assessing and explaining the efficiency of extensive olive oil farmers: The case of Pelion peninsula in Greece. *Agriculture*, 8(2), 25. <https://doi.org/10.3390/agriculture8020025>
- Novoa, V., Ahumada-Rudolph, R., Rojas, O., Sáez, K., de la Barrera, F., & Arumí, J. L. (2019). Understanding agricultural water footprint variability to improve water management in Chile. *Science of the Total Environment*, 670, 188–199. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.127>
- Ofori, S., Puškáčová, A., Růžicková, I., & Wanner, J. (2021). Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. *Science of the Total Environment*, 760. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026>
- Pellegrini, G., Ingraio, C., Camposeo, S., Tricase, C., Contò, F., & Huisingsh, D. (2016). Application of water footprint to olive growing systems in the Apulia region: A comparative assessment. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2407–2418. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.088>

- Pergola, M., Favia, M., Palese, A. M., Perretti, B., Xiloyannis, C., & Celano, G. (2013). Alternative management for olive orchards grown in semi-arid environments: An energy, economic and environmental analysis. *Scientia Horticulturae*, 162, 380–386. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.08.031>
- 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 (*Olea europaea* L.) cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry*, 60, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.07.014>
- Pfister, S., Koehler, A., & Hellweg, S. (2009). Assessing the environmental impact of freshwater consumption in Life Cycle Assessment. *Environmental Science & Technology*, 43(11), 4098–4104. <https://doi.org/10.1021/es802423e>
- Pfister, S., & Baumann, J. (2012). Monthly characterization factors for water consumption and application to temporal explicit cereals inventory. In *8th International Conference on LCA in the Agri-Food Sector*, Rennes, France, 2-4 October 2012, p. 52–57.
- Pfister, Stephan, & Bayer, P. (2014). Monthly water stress: Spatially and temporally explicit consumptive water footprint of global crop production. *Journal of Cleaner Production*, 73, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.031>
- Phocaides, A. (2007). *Technical Handbook on Pressurized Irrigation Techniques*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Pliakoni, E. D., & Nanos, G. D. (2011). Influence of deficit irrigation and reflective mulch on “Konservolea” olive leaf physiology during the growing period. *Acta Horticulturae*, 888, 199–204. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.888.22>
- Polari, J. J., Mori, M., & Wang, S. C. (2021). Virgin olive oils from super-high-density orchards in California: Impact of cultivar, harvest time, and crop season on quality and chemical composition. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 123(3). <https://doi.org/10.1002/ejlt.202000180>
- Pradeleix, L., Roux, P., Bouarfa, S., Jaouani, B., Lili-Chabaane, Z., & Bellon-Maurel, V. (2015). Environmental impacts of contrasted groundwater pumping systems assessed by Life Cycle Assessment methodology: Contribution to the water-energy Nexus study. *Irrigation and Drainage*, 64(1), 124–138. <https://doi.org/10.1002/ird.1865>
- Ridoutt, B. G., & Huang, J. (2012). Environmental relevance--the key to understanding water footprints. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(22), E1424–E1424. <https://doi.org/10.1073/pnas.1203809109>
- Ridoutt, Bradley G., & Pfister, S. (2013). A new water footprint calculation method integrating consumptive and degradative water use into a single stand-alone weighted indicator. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(1), 204–207. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0458-z>
- 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, 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.071>
- Rosenbaum, R. K., Meijer, A., Demou, E., Hellweg, S., Jolliet, O., Lam, N. L., ... McKone, T. E. (2015).

- Indoor air pollutant exposure for Life Cycle Assessment: Regional health impact factors for households. *Environmental Science and Technology*, 49(21), 12823–12831. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00890>
- Roy, P. O., Azevedo, L. B., Margni, M., van Zelm, R., Deschênes, L., & Huijbregts, M. A. J. (2014). Characterization factors for terrestrial acidification at the global scale: A systematic analysis of spatial variability and uncertainty. *Science of the Total Environment*, 500–501(x), 270–276. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.099>
- Russo, C., Cappelletti, G. M., Nicoletti, G. M., Di Noia, A. E., & Michalopoulos, G. (2016). Comparison of European olive production systems. *Sustainability (Switzerland)*, 8(8), 1–11. <https://doi.org/10.3390/su8080825>
- Sala, S., Cerutti, A. K., & Pant, R. (2018). Development of a weighting approach for the environmental footprint. In *Publications Office of the European Union*.
- Salmoral, G., Aldaya, M. M., Chico, D., Garrido, A., & Llamas, M. R. (2011). The water footprint of olives and olive oil in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4), 1089–1104. <https://doi.org/10.5424/sjar/20110904-035-11>
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Schyns, J. F., & Hoekstra, A. Y. (2014). The added value of Water Footprint assessment for national water policy: A case study for Morocco. *PLoS ONE*, 9(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099705>
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., El-Hendawy, S., Abdella, K., Alotaibi, M., & Alderfasi, A. (2021). Impacts of long-and short-term of irrigation with treated wastewater and synthetic fertilizers on the growth, biomass, heavy metal content, and energy traits of three potential bioenergy crops in arid regions. *Energies*, 14(11), 1–22. <https://doi.org/10.3390/en14113037>
- Shan-an, H., Liu, L., & Ying, G. (1981). Olive introduction and breeding in China. I. The theory and practice of olive introduction in China. *Rivista Di Ortoflorofrutticoltura Italiana*, 65(6), 413–432. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/42878471>
- Shtull-Trauring, E., Cohen, A., Ben-Hur, M., Israeli, M., & Bernstein, N. (2022). NPK in treated wastewater irrigation: Regional scale indices to minimize environmental pollution and optimize crop nutritional supply. *Science of the Total Environment*, 806, 150387. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150387>
- Singh, A. (2021). A review of wastewater irrigation: Environmental implications. *Resources, Conservation and Recycling*, 168 (May 2020). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105454>
- Singh, P. K., Deshbhratar, P. B., & Ramteke, D. S. (2012). Effects of sewage wastewater irrigation on soil properties, crop yield and environment. *Agricultural Water Management*, 103, 100–104. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.022>
- Smith, M. (1992). CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. In *FAO Irrigation and Drainage Paper 46*.

- Soil Survey Staff. (1999). Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. In Agriculture Handbook 436 (2nd ed., p. 886). Washington, DC: U.S. Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service.
- Tanasijevic, L., Todorovic, M., Pereira, L. S., Pizzigalli, C., & Lionello, P. (2014). Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 144, 54–68. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.019>
- Tegos, A., Malamos, N., Efstratiadis, A., Tsoukalas, I., Karanasios, A., & Koutsoyiannis, D. (2017). Parametric modelling of potential evapotranspiration: A global survey. *Water (Switzerland)*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/w9100795>
- Tekaya, M., Mechri, B., Dabbaghi, O., Mahjoub, Z., Laamari, S., Chihaoui, B., ... Chehab, H. (2016). Changes in key photosynthetic parameters of olive trees following soil tillage and wastewater irrigation, modified olive oil quality. *Agricultural Water Management*, 178(89), 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.09.023>
- Therios, I. N. (2009). Olives. In J. Atherton & A. Rees (Eds.), *Crop Production Science in Horticulture Series* (pp. 166–187). Oxfordshire, UK: CAB International.
- Thomas, G. W. (2015). *Exchangeable Cations* (A. Page, Ed.). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c9>
- Todorović, M., Mehmeti, A., & Cantore, V. (2018). Impact of different water and nitrogen inputs on the eco-efficiency of durum wheat cultivation in Mediterranean environments. *Journal of Cleaner Production*, 183, 1276–1288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.200>
- Trenberth, K. E., Dai, A., Schrier, G. van der, Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4, 17–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/nclimate2067>
- Trendov, N., Varas, S. and, & Meng, S. (2019). *Digital technologies in agriculture and rural areas-Status report (FAO)*. Rome, Italy: FAO-Food and Agricultural Organisation.
- Tsarouhas, P., Achillas, C., Aidonis, D., Folinas, D., & Maslis, V. (2015). Life Cycle Assessment of olive oil production in Greece. *Journal of Cleaner Production*, 93, 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.042>
- Tsirogiannis, I. L., Karras, G., Tsoilis, D., & Barelos, D. (2015). Irrigation and drainage scheme of the plain of Arta – Effects on the rural landscape and the wetlands of Amvrakikos’ natural area. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.004>
- Tunc, T., & Sahin, U. (2015). The changes in the physical and hydraulic properties of a loamy soil under irrigation with simpler-reclaimed wastewaters. *Agricultural Water Management*, 158, 213–224. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.05.012>
- Twarakavi, N. K. C., Sakai, M., & Šimůnek, J. (2009). An objective analysis of the dynamic nature of field capacity. *Water Resources Research*, 45(10), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2009WR007944>
- UN-Water. (2021). Summary Progress Update 2021 : SDG 6 — water and sanitation for all. *UN-Water Integrated Monitoring Initiative*, 1–58. Retrieved from

<https://www.unwater.org/new-data-on-global-progress-towards-ensuring-water-and-sanitation-for-all-by-2030/>

- UNESCO UN-Water. (2020). *United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0793.pub2>
- Vanham, D., Hoekstra, A. Y., Wada, Y., Bouraoui, F., de Roo, A., Mekonnen, M. M., ... Bidoglio, G. (2018). Physical water scarcity metrics for monitoring progress towards SDG target 6.4: An evaluation of indicator 6.4.2 "Level of water stress." *Science of the Total Environment*, 613–614(September 2017), 218–232. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.056>
- Varela, M. C., Arslan, I., Reginato, M. A., Cenzano, A. M., & Luna, M. V. (2016). Phenolic compounds as indicators of drought resistance in shrubs from Patagonian shrublands (Argentina). *Plant Physiology and Biochemistry*, 104, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.03.014>
- Vatsanidou, A., Fountas, S., Liakos, V., Nanos, G., Katsoulas, N., & Gemtos, T. (2020). Life Cycle Assessment of variable rate fertilizer application in a pear orchard. *Sustainability*, 12(17), 6893. <https://doi.org/10.3390/su12176893>
- Vergine, P., Lonigro, A., Salerno, C., Rubino, P., Berardi, G., & Pollice, A. (2017). Nutrient recovery and crop yield enhancement in irrigation with reclaimed wastewater: a case study. *Urban Water Journal*, 14(3), 325–330. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1141224>
- Vergine, Pompilio, Salerno, C., Libutti, A., Beneduce, L., Gatta, G., Berardi, G., & Pollice, A. (2017). Closing the water cycle in the agro-industrial sector by reusing treated wastewater for irrigation. *Journal of Cleaner Production*, 164, 587–596. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.239>
- Verlicchi, P., Al Aukidy, M., Galletti, A., Zambello, E., Zanni, G., & Masotti, L. (2012). A project of reuse of reclaimed wastewater in the Po valley, Italy: Polishing sequence and cost benefit analysis. *Journal of Hydrology*, 432–433, 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.024>
- Verones, F., Bare, J., Bulle, C., Frischknecht, R., Hauschild, M., Hellweg, S., ... Fantke, P. (2017). LCIA framework and cross-cutting issues guidance within the UNEP-SETAC life cycle initiative. *Journal of Cleaner Production*, 161, 957–967. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.206>
- Wang, J., Zhang, D., Farooqi, T. J. A., Ma, L., Deng, Y., & Jia, Z. (2019). The olive (*Olea europaea* L.) industry in China: its status, opportunities and challenges. *Agroforestry Systems*, 93(2), 395–417. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0129-y>
- Wang, Z., Li, J., & Li, Y. (2017). Using Reclaimed Water for Agricultural and Landscape Irrigation in China: a Review. *Irrigation and Drainage*, 66(5), 672–686. <https://doi.org/10.1002/ird.2129>
- Wissam, Z., Ali, A., & Rama, H. (2016). Optimization of extraction conditions for the recovery of phenolic compounds and antioxidants from Syrian olive leaves. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry The*, 5(5), 390–394.
- Xiloyannis, C., Montanaro, G., Mininni, A. N., & Dichio, B. (2015). Sustainable production systems in fruit tree orchards. *Acta Horticulturae*, 1099 (November), 319–324.

<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1099.36>

Xu, Z., Chen, X., Liu, J., Zhang, Y., Chau, S., Bhattarai, N., ... Li, Y. (2020). Impacts of irrigated agriculture on food–energy–water–CO₂ nexus across metacoupled systems. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19520-3>

Zolti, A., Green, S. J., Ben Mordechai, E., Hadar, Y., & Minz, D. (2019). Root microbiome response to treated wastewater irrigation. *Science of the Total Environment*, 655, 899–907. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.251>

ΕΜΥ. (2022). Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, Κλιματικά Δεδομένα από Επιλεγμένους Σταθμούς στην Ελλάδα. Retrieved January 31, 2022, from http://www.emy.gr/emv/el/climatology/climatology_city?perifereia=Epirus&poli=Arta

ΟΠΕΚΕΠΕ. (2022). Συγκεντρωτικά Στοιχεία Ενιαίων Αιτήσεων Εκμετάλλευσης. Retrieved August 21, 2022, from http://aggregate.opekepe.gr/?triggerSelect=fytiko_eidos&queryType=fytiko&year=2016&perifereia=4&nomos=0401&dimos=&fytko_eidos=150