

Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Περιβαλλοντικής Μηχανικής
Κατεύθυνση Υδατικών Πόρων και Κλιματικής Αλλαγής

Μεταπτυχιακή διατριβή του φοιτητή:

Αντώνιου Αποστολάκη

2015057385

Με τίτλο:

Προσομοίωση Καλλιέργειας Θερμοκηπιακής Τομάτας με το Μοντέλο SALTMED: Σενάρια
Ποιότητας Άρδευσης και Κλιματικής Αλλαγής

Εξεταστική επιτροπή:

Καθ. Ιωάννης Κ. Τσάνης (επιβλέπων)

Καθ. Γεώργιος Π. Καρατζάς

Δρ. Αριστείδης Κουτρούλης

Ακαδημαϊκό έτος:

2016-2017

Ευχαριστίες

Με την περάτωση της παρούσας διατριβής ολοκληρώνεται ο κύκλος σπουδών μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα Περιβαλλοντικής Μηχανικής με κατεύθυνση στον τομέα των Υδατικών Πόρων και της Κλιματικής Αλλαγής. Συνεπώς, οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της. Πρώτα από όλους, ευχαριστώ τον Καθηγητή Ι. Κ. Τσάνη, διευθυντή του εργαστηρίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής για την ανάθεση της παρούσας διατριβής, που πραγματεύεται ένα υπαρκτό, καίριο και πολύπλοκο ζήτημα με άμεσες επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον όσο και στην κοινωνική ευημερία. Επιπλέον, ευχαριστίες οφείλω στον Καθηγητή Γ. Π. Καρατζά και στον Δρ. Α. Κουτρούλη για την αξιολόγηση της διατριβής.

Ιδιαίτερα σημαντική ήταν η συνεισφορά του Dr. Ι. Ν. Δαλιακόπουλου, του Dr. Μ. Γ. Γρυλλάκη και της MSc Ι. Παναγέα, που με τις γνώσεις και τις ιδέες τους πάνω σε θέματα επιστήμης και μηχανικής συντέλεσαν στην εύρυθμη και ομαλή ολοκλήρωση της διατριβής μου. Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου, Μανώλη και Μαρία, για την αδιάκοπη υποστήριξη τους.

Περίληψη

Η αλάτωση αποτελεί ένα σημαντικό κίνδυνο για την ποιότητα των εδαφών που υποβαθμίζει την αγροτική παραγωγή, την εδαφική γονιμότητα και την ποιότητα των υδατικών πόρων. Σε ξηρικές παράκτιες περιοχές, όπως αυτές της Μεσογείου, η εφαρμογή ποιοτικά υποβαθμισμένης άρδευσης εξαιτίας της υπαλμύρισης των υδροφόρων στρωμάτων σε συνδυασμό με την εντατική καλλιέργεια ενισχύουν την εδαφική αλάτωση και θέτουν σε κίνδυνο την βιωσιμότητα της καλλιεργητικής παραγωγής. Επιπλέον, οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες παρουσιάζουν αυξημένες ανάγκες άρδευσης, ενώ η κλιματική σλλαγή δύναται να προκαλέσει επιπλέον αύξηση των αρδευτικών αναγκών λόγω αύξησης της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας. Στην παρούσα μελέτη, το μοντέλο SALTMED βαθμονομήθηκε βάση δεδομένων εδαφικής υγρασίας, εδαφικής αλατότητας και καλλιεργητικής παραγωγής που συλλέχθηκαν κατά την πειραματική καλλιέργεια θερμοκηπιακής τομάτας στις εγκαταστάσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης προσομοιώνοντας τις ημι-ξηρικές συνθήκες της Περιοχής Μελέτης (Λεκάνη Τυμπακίου Κρήτης) του Ερευνητικού Έργου RECARE που χρηματοδοτήθηκε από την Ε.Ε. στο πλαίσιο FP7. Το θερμοκηπιακό πείραμα διεξήχθη σε γλάστρες των 30 L με χώμα από την περιοχή μελέτης αρχικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC_{se}) 18 dS m^{-1} και περιλάμβανε την στάγδην άρδευση 10 φυτών τομάτας με δυο ποιότητες αρδευτικού νερού: χαμηλής αλατότητας (LS, $EC_w = 1.1 \text{ dS m}^{-1}$) και μέσης αλατότητας (MS, $EC_w = 3.5 \text{ dS m}^{-1}$). Το βαθμονομημένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της εδαφικής αλατότητας και της καλλιεργητικής απόδοσης, της ανάγκης σε άρδευση και λήψης ύδατος κάτω από διαφορετικές ποιότητες άρδευσης με EC_w που κυμαίνονταν από 1.1 to 7.0 dS m^{-1} και τις διαφορετικές κλιματικές συνθήκες που εκπροσωπούν πιθανά σενάρια κλιματικής αλλαγής. Η αύξηση της EC_w οδήγησε σε σημαντική μείωση της προσομοιωμένης πρόσληψης ύδατος με μη σταθερό ρυθμό απώλειας (17% ανά μοναδιαία αύξηση της EC_w για $EC_w < 3.25 \text{ dS m}^{-1}$ και 30% για $EC_w > 3.25 \text{ dS m}^{-1}$) και της παραγωγής κατά -17% ανά μοναδιαία αύξηση της EC_w , εξαιτίας του αυξημένου ωσμωτικού στρες. Η τελική EC_{se} του εδάφους δεν παρουσιάζει γραμμική σχέση με την EC_w , καθώς επηρεάζεται από δύο παράγοντες, την εισερχόμενη ποσότητα άλατος και το διαθέσιμο κλάσμα ύδατος για στράγγιση. Η κλιματική αλλαγή προβλέπεται να αυξήσει την εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας κατά 5-17% με επακόλουθη αύξηση των αναγκών άρδευσης κατά 4-14%. Κάτω από μεταχείριση άρδευσης LS η παραγωγή παρουσιάζει μείωση μικρότερη του 1% ενώ η πρόσληψη ύδατος αυξάνει κατά 4-13% καλύπτοντας τις αυξημένες ανάγκες άρδευσης. Αντίθετα, η αρδευτική μεταχείριση MS παρουσιάζει, επιπρόσθετα από την απώλεια λόγω αλατότητας, μειωμένη παραγωγή κατά 3-7% ενώ η πρόσληψη ύδατος παρουσιάζει μια αύξηση κατά 1-6% της ήδη μειωμένης πρόσληψης λόγω αλατότητας. Η κλιματική αλλαγή, επίσης,

αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά την ποιότητα του εδάφους μόνο κάτω από την άρδευση LS με αυξήσεις που φτάνουν τον διπλασιασμό της EC_{se}, ενώ κάτω από άρδευση MS η επίδραση της αλλαγής του κλίματος αποτελεί αμελητέο παράγοντα σε σχέση με την ποιότητα της άρδευσης.

Abstract

Soil salinity is a major soil degradation threat that hinders agricultural production, soil fertility and water resources quality. In arid coastal environments, such as those of the Mediterranean region, the deteriorated quality of irrigation water due to sea water intrusion and the applied intensive agricultural practices promote soil salinization and compromise the sustainability of agricultural production. On top of these, protected horticultural crops have to cope with increasing irrigation needs, while Climate Change may further augment these needs due to increases in crop evapotranspiration. In this study, the SALTMED model is calibrated using soil moisture, soil salinity and crop yield measurements collected from on a small-scale *Solanum lycopersicum* (tomato) greenhouse pot experiment that simulates the semi-arid conditions in the RECARE Project Case Study in Greece (Timpaki, Crete). The use of local planting soil with initial Electrical Conductivity (EC_{se}) of 18 dS m⁻¹ and local cultivation practices aims to replicate prevailing conditions at the Case Study. Ten plants are drip irrigated with two irrigation quality treatments: low salinity (LS, EC_w = 1.1 dS m⁻¹) and moderately salinity (MS, EC_w = 3.5 dS m⁻¹) irrigation water, resulting to high and excessively high final EC_{se}, respectively. Based on these approaches, the calibrated SALTMED model is employed to predict soil salinity and crop's irrigation needs, water uptake and final yield under different irrigation EC_w (ranged from 1.1 to 7.0 dS m⁻¹) and climatic conditions. Increased EC_w exerts a profound reduction on modelled water uptake with a changing loss rate (ca. 17% for EC_w < 3.25 dS m⁻¹ and 30% for EC_w > 3.25 dS m⁻¹) and crop yield (ca. -15% for a unit increase in EC_w). The MS treatment leads to a reduced crop yield by 28% and a curtailed water uptake by 29% compared with the LS treatment. These effects are attributed to the increased osmotic stress. Impact on final soil EC_{se} is also determined by the interaction between the salt inputs and the fraction of water available for leaching. Climate Change increases modelled crop evapotranspiration by 5-17% and water requirements by 4-14% regardless of the irrigation quality. Under the LS treatment, simulated crop yield is not affected by Climate Change and the water uptake is projected to increase by 4-13% balancing the increased water needs. In contrast, the combined effect of poor irrigation quality (MS treatment) and Climate Change leads to reduction in crop yield by 31-35%, while water uptake is reduced by 23-28% compared to the LS treatment. Climate Change provokes an increase upon modelled soil EC_{se} and its impact is greater during the last warmer months of the cultivation. LS treatment concludes to a greater increase of simulated EC_{se} under Climate Change when compared with MS treatment, because of the increased simulated water uptake that reduces water leaching fraction.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract	vi
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Το πρόβλημα της εδαφικής αλάτωσης.....	1
1.1.1 Επίδραση αλάτωσης στα εδάφη	3
1.1.2 Μηχανισμοί επίδραση της αλάτωσης στη βλάστηση	4
1.1.3 Μηχανισμοί ανοχής της βλάστησης στην αλάτωση.....	5
1.2 Η καλλιέργεια τομάτας.....	8
1.3 Προσομοίωση καλλιεργητικών συστημάτων	11
1.4 Κλιματική Αλλαγή	12
1.5 Σκοπός μελέτης	12
2 Μεθοδολογία	13
2.1 Το μοντέλο SALTMED.....	13
2.1.1 Κίνηση ύδατος και διαλυμένων ουσιών	13
2.1.2 Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας.....	15
2.1.3 Πρόσληψη ύδατος από την καλλιέργεια	16
2.1.4 Παραγωγή καλλιέργειας.....	17
2.1.5 Δεδομένα εισόδου	17
2.2 Εδαφικές παράμετροι	18
2.2.1 Εδαφική υγρασία	18
2.2.2 Προσδιορισμός εδαφικής αλατότητας.....	19
2.2.3 Προσδιορισμός μετάλλων και δείκτη SAR	19
2.3 Κλιματικά δεδομένα.....	19
2.3.1 Κλιματικές συνθήκες υπάρχουσα κατάσταση	19
2.3.2 Κλιματικές συνθήκες μελλοντικών σεναρίων	20

2.4	Στατιστική ανάλυση	22
3	Περιοχή μελέτης.....	24
3.1	Πειραματική διάταξη Πολυτεχνείου Κρήτης	24
3.2	Αποτελέσματα πειραματικής διάταξης.....	26
3.2.1	Ύψος παραγωγή	26
3.2.2	Ποιότητα εδάφους	27
3.2.3	Κλιματικά δεδομένα	30
3.3	Χρήση μοντέλου SALTMED	33
3.3.1	Παραμετροποίηση καλλιέργειας τομάτας	33
3.3.2	Παραμετροποίηση εδάφους.....	34
3.3.3	Τροποποίηση προσομοιωμένης ECse σε SAR	40
3.4	Εξεταζόμενα σενάρια	42
3.4.1	Σενάρια ποιότητας άρδευσης.....	42
3.4.2	Σενάριο Κλιματικής Αλλαγής	42
4	Αποτελέσματα και συζήτηση	44
4.1	Σενάρια αλατότητας άρδευσης.....	44
4.1.1	Επίδραση αλατότητας στην καλλιέργεια τομάτας.....	44
4.1.2	Επίδραση αλατότητας στο έδαφος	49
4.2	Σενάρια Κλιματικής Αλλαγής	51
4.2.1	Επίδραση Κλιματικής Αλλαγής στην καλλιέργεια τομάτας.....	51
4.2.2	Επίδραση Κλιματικής Αλλαγής στο έδαφος	57
5	Συμπεράσματα.....	61
6	Βιβλιογραφία	65
7	Παράρτημα	73
7.1	Πρόσληψη ύδατος σε ημερήσιο βήμα.....	73
7.2	Στράγγιση ύδατος σε ημερήσιο βήμα.....	74
7.3	Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργεια σε αθροιστικό βήμα	75

1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με την αναφορά των United Nations (2006), ο πληθυσμός της Γης αναμένεται να ξεπεράσει τα 9.5 δισ. έως το 2050, ενώ το 2006 βρίσκονταν στα 6.5 δισ και σήμερα στα 7.5 δισ. Σήμερα, ο πληθυσμός Η ραγδαία πληθυσμιακή αύξηση εγείρει ανησυχίες για τη δυνατότητα κάλυψης των αναγκών σε φυσικούς πόρους (Ragab et al. 2015), τη στιγμή μάλιστα που η επιστημονική κοινότητα προβλέπει ένα διπλασιασμό στις ανάγκες τροφής και νερού τις επόμενες δεκαετίες (Banwart 2011), ιδιαίτερα υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής (IPCC 2014). Ως εκ τούτου, ο γεωργικός τομέας οφείλει να αυξήσει την απόδοση του, εκφρασμένη ως παραγωγή τροφής ανά μονάδα επιφάνειας και χρησιμοποιούμενου υδατικού πόρου, μέσα από την υιοθέτηση καινοτόμων και αειφόρων πρακτικών διαχείρισης. Η επιστημονική κοινότητα σε συνεργασία με κυβερνητικούς και διακυβερνητικούς φορείς οφείλει να αναζητήσει λύσεις και να προτείνει πολιτικές που θα ενισχύσουν την βιωσιμότητα και την ανθεκτικότητα του παρόντος κοινωνικο-οικονομικού συστήματος και θα διασφαλίσουν την κοινωνική ευημερία.

1.1 Το πρόβλημα της εδαφικής αλάτωσης

Ως εδαφική αλάτωση ορίζεται η συσσώρευση αλάτων στη ριζόσφαιρα σε επίπεδο που παρεμποδίζει τη βλαστική ανάπτυξη και την αγροτική παραγωγή (Rengasamy 2006), ενώ αναστέλλει σημαντικές λειτουργίες του εδάφους (Rath & Rousk 2015; Singh 2015) υποβαθμίζοντας το περιβάλλον. Η αλάτωση των εδαφών μπορεί να έχει φυσική προέλευση, είτε να οφείλεται σε ανθρωπογενή αίτια (DERM 2011). Η φυσική ή πρωτογενείς αλάτωση των εδαφών αναπτύσσεται κυρίως λόγω της διάβρωσης του μητρικού πετρώματος και την επακολουθεί απελευθέρωση διαλυτών αλάτων, όπως χλωριούχα άλατα του νατρίου (Na), μαγνησίου (Mg) ή ασβεστίου (Ca) και σε μικρότερο βαθμό θειούχα και ανθρακούχα άλατα (Munns & Tester 2008). Επιπρόσθετα, οι παράκτιες περιοχές δέχονται αποθέσεις αλάτων θαλάσσιας προέλευσης μέσω του αέρα και της βροχόπτωσης (Munns & Tester 2008), ενώ σημαντική είναι και η συνεισφορά της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στους υπόγειους υδροφορείς (IPCC 2007; Heiss et al. 2014).

Η ανθρωπογενείς ή δευτερογενείς αλάτωση οφείλεται στην άρδευση καλλιεργειών σε (ημι)ξηρικές περιοχές με χαμηλές κατακρημνίσεις, υψηλή εξατμισοδιαπνοή και εδαφικές συνθήκες που αποτρέπουν την ορθή στράγγιση (Allison 1964). Εάν οι υδατικοί πόροι που χρησιμοποιούνται στην άρδευση χαρακτηρίζονται από επαρκή ποιότητα, τότε η αλάτωση των εδαφών δεν αποτελεί έντονο πρόβλημα και αντιμετωπίζεται εύκολα με έκπλυση. Όταν, ωστόσο, η συγκέντρωση των αλάτων στους αρδευτικούς πόρους αυξάνει, το πρόβλημα της εδαφικής αλάτωσης εντείνεται (Brady & Weil 2011). Η εκτεταμένη και μη ορθολογική χρήση χημικών λιπασμάτων μπορεί να οδηγήσει

στην υποβάθμιση του εδάφους (Singh 2015), ακόμα και όταν η ποιότητα των υδατικών πόρων είναι ικανοποιητική.

Στις παράκτιες περιοχές βασική αιτία της υποβάθμισης των υπόγειων υδάτων είναι η διείσδυση του θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού βαθύτερα στην ενδοχώρα. Η διείσδυση του πόδα υφαμύρισης υποκινείται από την ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα που οδηγεί σε μεταβολή της ισορροπίας μεταξύ του γλυκού και αλμυρού νερού. Η ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα προκύπτει λόγω της μεταβολής του υδατικού ισοζυγίου είτε λόγω μειωμένων εισροών-βροχοπτώσεων, είτε λόγω αυξημένων εκροών-υπεράντλησης για οικιακή ή αγροτική χρήση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αρδευτική εκμετάλλευση του υποβαθμισμένου υπόγειου ύδατος προκαλεί σημαντικά προβλήματα αλάτωσης στις καλλιεργητικές εκτάσεις τόσο λόγω της υψηλής συγκέντρωσης αλάτων στο υφάλμυρο νερό, όσο και συγκεκριμένα στην συγκέντρωση του Na. Επιπρόσθετα, σε περιοχές με ρηχό υδροφόρο ορίζοντα ανθρωπογενείς αλάτωση προκαλείται εξαιτίας των απότομων αλλαγών χρήσεων γης, ειδικά όταν αυτοί περιλαμβάνουν την απομάκρυνση της φυσικής βλάστησης και την αντικατάσταση της με καλλιέργειες διαφορετικών ποσοτικών απαιτήσεων σε νερό, οδηγώντας σε μεταβολές της ελεύθερης επιφάνειας του υδροφορέα (Rengasamy 2010).

Η αλάτωση των εδαφών αποτελεί έναν από τους πιο απειλητικούς κινδύνους υποβάθμισης των εδαφών σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ θέτει σημαντικά προβλήματα στην παραγωγή και διασφάλιση τροφής (Brady & Weil 2011). Πιο αναλυτικά, από τα περίπου $1,730 \cdot 10^6$ ha καλλιεργήσιμης έκτασης (FAO 2005) μόλις τα $230 \cdot 10^6$ ha (~15%) βρίσκονται υπό άρδευση, ενώ οφείλονται για περισσότερο από το ένα τρίτο της παγκόσμιας παραγωγής τροφίμων (Munns & Tester 2008). Ωστόσο, η άρδευση των καλλιεργειών συμβάλει σημαντικά στην αλάτωση των εδαφών και οφείλεται για την υποβάθμιση περίπου $45 \cdot 10^6$ ha, δηλαδή του 20% των αρδευόμενων εκτάσεων (Munns 2005). Αντίθετα, η επιφάνεια των μη αρδευόμενων καλλιεργητικών εκτάσεων υπολογίζεται στα $1,500 \cdot 10^6$ ha περίπου, από τα οποία μόλις τα $32 \cdot 10^6$ ha (~2%) μπορούν να χαρακτηριστούν ως υποβαθμισμένα λόγω αλάτωσης. Συνολικά, η πρωτογενείς και δευτερογενείς αλάτωση πλήττει περισσότερα από $800 \cdot 10^6$ ha, έκταση που αντιστοιχεί στο 6% της συνολικής επιφάνειας στεριάς της Γης (FAO 2005)

Βάση της παρουσίας των διαφορετικών αλάτων στο έδαφος, τα υποβαθμισμένα λόγω αλάτωσης εδάφη διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, τα αλατούχα, τα νατριούχα και τα αλατούχα-νάτριου. Από αυτά, τα νατριούχα εδάφη είναι τα πλέον προβληματικά λόγω της αυξημένης παρουσίας του Na στο έδαφος και ακολουθούν τα αλατούχα-νατριούχα, όπου η αυξημένη παρουσία δισθενών κατιόντων, όπως Ca και Mg αντισταθμίζει τις αρνητικές επιδράσεις του Na (Brady & Weil 2011).

Τα αλατούχα εδάφη παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις κατιόντων, όπως Ca, Mg και K, αλλά όχι Na και αποτελούν την πιο εύκολα αντιμετωπίσιμη μορφή αλατότητας (Brady & Weil 2011). Επιπρόσθετα, τα υποβαθμισμένα λόγω αλάτωσης εδάφη μπορεί να εμπίπτουν και στην ειδική κατηγορία των αλκαλιωμένων εδαφών, που παρουσιάζουν υψηλές τιμές pH. Για την κατάταξη ενός εδάφους σε μια από τις παραπάνω κατηγορίες εξετάζονται τρεις βασικές χημικές ιδιότητες (van Beek & Toth 2012), η ηλεκτρική αγωγιμότητα εκχύλισης υπό κορεσμό (Electrical Conductivity saturated extraction, ECse), η αναλογία προσρόφησης νατρίου (Sodium Adsorption Ratio, SAR) και το pH, όπως δείχνει ο **Πίνακας 1.1**.

Πίνακας 1.1: Ταξινόμηση υποβαθμισμένων εδαφών από αλάτωση με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα (ECe), την αναλογία προσρόφησης νατρίου (SAR) και το pH (van Beek & Toth 2012).

Κατηγορία υποβαθμισμένου εδάφους	ECse (dS m ⁻¹)	SAR (mmol L ⁻¹) ^{0.5}	pH
Αλατούχο (Saline)	≥4	<13	<8.5
Νατριούχο (Sodic)	<4	≥13	>8.5
Αλατούχο-Νατριούχο (Saline-Sodic)	≥4	≥13	>8.5
Αλκαλιωμένα (Alkaline)	<4	≥13	>8.5

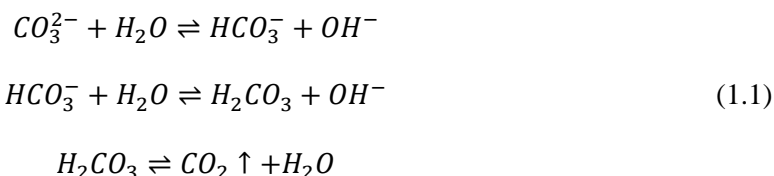
1.1.1 Επίδραση αλάτωσης στα εδάφη

Η αλάτωση των εδαφών και κατά κύριο λόγο η παρουσία του Na, επηρεάζει άμεσα την ποιοτική κατάστασή τους και συνεπώς την ικανότητά τους να υποστηρίξουν την ανάπτυξη της βλάστησης ή των καλλιεργειών. Αρχικά, το ανταλλάξιμο Na εντείνει την τάση των συσσωματωμάτων να διασπαστούν υπό την επίδραση του κύκλου ξήρανσης-διαβροχής, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση σωματιδίων αργίλου και ιλύος ικανών να φράξουν τους εδαφικούς πόρους (Brady & Weil 2011). Το πρόβλημα αυτό ενισχύεται αφού η ικανότητα διόγκωσης των σωματιδίων αργίλου αυξάνει καθώς η άργιλος πλησιάζει τον κορεσμό σε Na. Παράλληλα προκαλείται και διασπορά της αργίλου λόγω της συνδυαστικής δράσης του Na και της μειωμένης συγκέντρωσης διασθενών κατιόντων, όπως Ca και Mg, που ενισχύουν την κροκίδωση των εδαφικών σωματιδίων.

Η διασπορά των συσσωματωμάτων και της αργίλου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διηθητικότητας και της ικανότητας συγκράτησης νερού και την αύξηση της επιφανειακής απορροής, ενώ παράλληλα η παρουσία του οξυγόνου (O₂) μειώνεται λόγω της παρεμπόδισης του αερισμού (Brady & Weil 2011). Εδάφη υποβαθμισμένα εξαιτίας της αλατότητας είναι ευαίσθητα στη διάβρωση λόγω της αυξημένης επιφανειακής απορροής και της υποβαθμισμένης δομής.

Η περιορισμένη στράγγιση στις (ημι)ξηρικές περιοχές έχει ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση αλάτων στο έδαφος, με τα κατιόντα Ca, Mg, K και Na να κυριαρχούν τόσο στην εδαφική διάλυση όσο και στην εδαφική μήτρα. Τα κατιόντα αυτά δεν μπορούν να απελευθερώσουν ή να δεσμεύσουν

κατιόντα υδρογόνου (H^+) και δεν επηρεάζουν το pH του εδάφους. Ωστόσο, εάν η παρουσία των παραπάνω αλάτων οφείλεται στη διάβρωση του μητρικού πετρώματος, για παράδειγμα ανθρακικού ασβεστίου ($CaCO_3$) και ανθρακικού νατρίου (Na_2CO_3), τότε είναι πιθανή η παρουσία ανθρακικών (CO_3^{2-}) και διττανθρακικών (HCO_3^-) ριζών που δύνανται να αυξήσουν το εδαφικό pH σύμφωνα με τις **Εξίσωση 1.1**.



1.1.2 Μηχανισμοί επίδρασης της αλάτωσης στη βλάστηση

Οι κύριοι μηχανισμοί επίδρασης της εδαφικής αλάτωσης στη βλάστηση είναι δύο: η ωσμωτική επίδραση και η ειδική τοξικότητα ιόντων (Αγγελάκης & Tsombanoglou 1995). Συχνά παρατηρούνται και φαινόμενα τροφοπενίας εξαιτίας του αυξημένου pH (DERM 2011). Προκειμένου ένα φυτό να αντλήσει νερό από την εδαφική υγρασία πρέπει να ξεπεράσει το ολικό δυναμικό του εδαφικού νερού (total soil water potential, ψ_t), που απαρτίζεται από το βαρυτικό δυναμικό (gravitational potential, ψ_g), το δυναμικό της εδαφικής μήτρας (matrix potential, ψ_m) και το ωσμωτικό δυναμικό (osmotic potential, ψ_o), καθώς και το υδροστατικό δυναμικό (hydrostatic potential, ψ_h) στην περίπτωση κορεσμένης ζώνης, όπως περιγράφεται από την **Εξίσωση 1.2** (Ignacio & Porporato 2004). Καθώς η κίνηση του νερού λαμβάνει χώρα από τα υψηλά στα χαμηλά δυναμικά, η πρόσληψη νερού από τα φυτά είναι ευκολότερη όταν το ψ_t είναι υψηλό.

$$\psi_t = \psi_g + \psi_m + \psi_o + \psi_h \quad (1.2)$$

Το ωσμωτικό δυναμικό ψ_o οφείλεται στην ηλεκτροστατική έλξη μεταξύ των πολικών μορίων του νερού και ανόργανων ή οργανικών διαλυμένων ουσιών, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της ελευθερίας κίνησης των μορίων του νερού και τη μείωση της δυναμικής ενέργειας του (Brady & Weil 2011). Η αύξηση της συγκέντρωσης των διαλυμένων ουσιών στην εδαφική διάλυση, μειώνει το δυναμικό του νερού και περιορίζει την δυνατότητα πρόσληψη νερού από το ριζικό σύστημα διαμέσου της ημι-περατής κυτταρικής μεμβράνης. Έτσι, τα φυτά δαπανούν τη διαθέσιμη ενέργεια τους στην απόκτηση του απαραίτητου νερού, αναστέλλοντας την ανάπτυξη τους (Munns 2005). Υπό πολύ υψηλές συνθήκες αλατότητας το ωσμωτικό δυναμικό μπορεί να είναι τόσο χαμηλό ώστε να προκαλέσει τη λύση του κυτταρικού σπαραγού σε σπορόφυτα, λόγω της κίνησης του νερού από τα κύτταρα στο έδαφος (Brady & Weil 2011). Τα περισσότερα φυτά, και ιδιαίτερα εκείνα με υψηλή γεωργική σημασία, βιώνουν την εδαφική αλατότητα ως ένα ωσμωτικό στρες, που προστίθεται στο ενδεχόμενο στρες λόγω ελλειμματικής υγρασίας και παρουσιάζουν συμπτώματα ίδια με αυτά της

ξηρασίας (Munns 2005). Τα συμπτώματα περιλαμβάνουν την καχεκτική εμφάνιση και την αργή ανάπτυξη ή ακόμα και την παύση της ανάπτυξης και οδηγούν στην απώλεια παραγωγής και την μείωση της παραγόμενης ξηρής μάζας (DERM 2011).

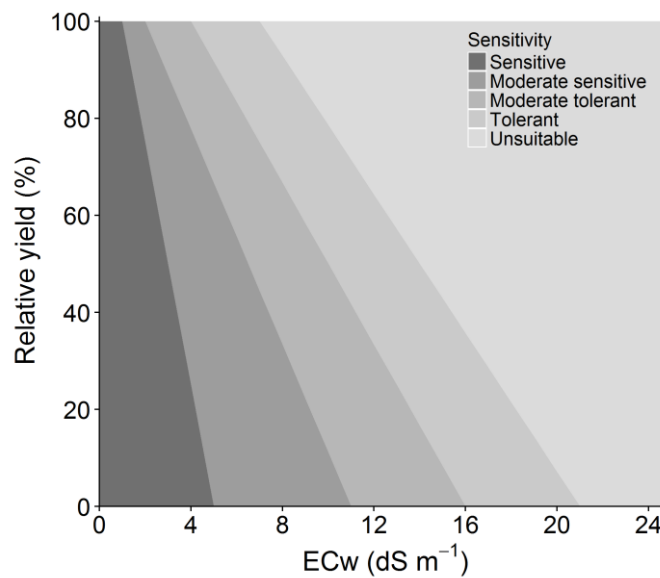
Ο δεύτερος μηχανισμός αναφέρεται στην ευαισθησία ορισμένων φυτών, κυρίως ξυλώδους βλάστησης (DERM 2011), στην αύξηση της συγκέντρωσης συγκεκριμένων ιόντων, όπως το Na, το χλώριο (Cl) και το βόριο (B) στους φυτικούς ιστούς (Brady & Weil 2011), και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ειδική τοξικότητα ιόντος (salt-specific effect) (Munns 2005). Η παρουσία των αλάτων στους φυτικούς ιστούς οφείλεται στην παθητική είσοδο τους στο ρεύμα διαπνοής με συνέπεια τη συσσώρευση τους στα φύλλα. Όταν η συγκέντρωση ενός ιόντος στα φύλλα φτάσει σε τοξικά επίπεδα για την εύρυθμη λειτουργία ενός φυτού, τότε δύναται να εμφανιστούν συμπτώματα, όπως μαύρισμα στις άκρες ή μερική νέκρωση των φύλλων τους ή ακόμα και πτώση και αποφύλλωση του φυτού (DERM 2011) και κατά συνέπεια περεταίρω μείωση του ρυθμού ανάπτυξης.

Η ανάπτυξη των φυτικών οργανισμών επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών (Brady & Weil 2011). Τα υποβαθμισμένα από αλάτωση εδάφη συχνά παρουσιάζουν τιμές pH μεγαλύτερες του 7 με αποτέλεσμα διάφορα ιχνοστοιχεία, όπως ο σίδηρος (Fe), ο χαλκός (Cu), ο ψευδάργυρος (Zn) και το μαγγάνιο (Mn), να μην είναι διαλυτά και διαθέσιμα για πρόσληψη από τα φυτά. Επιπρόσθετα, η αυξημένη παρουσία του Na μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της πρόσληψης άλλων κατιόντων, όπως συμβαίνει με το απαραίτητο θρεπτικό κάλιο (K) λόγω του ανταγωνισμού κατά τη διεργασία της μεταφοράς διάμεσων της κυτταρικής μεμβράνης. Τέλος, η ανάπτυξη των φυτών σε αλατούχα εδάφη συχνά περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα του φωσφόρου (P), καθώς οι αυξημένες συγκεντρώσεις Ca και Mg μειώνουν τη διαλυτότητα των ορυκτών που περιέχουν P, μέσω της δράσης του κοινού ιόντος (Common Ion Effect, CIE). Σημειώνεται ότι η παρουσία του Ca δύναται να περιορίσει τη διαθεσιμότητα του P ακόμα και όταν λαμβάνει χώρα προσθήκη P μέσω χημικής λίπανσης, λόγω του σχηματισμού των μη διαλυτών ενώσεων φωσφορικού ασβεστίου.

1.1.3 Μηχανισμοί ανοχής της βλάστησης στην αλάτωση

Η ανθεκτικότητα της βλάστησης σε συνθήκες υψηλής αλατότητας ορίζεται ως η ικανότητα του φυτού να επιβιώνει και να παράγει οικονομικά αποδεκτή σοδειά (DERM 2011) και διαφέρει σε μεγάλο βαθμό ανάμεσα στα διάφορα γένη, αλλά και μεταξύ των διαφορετικών ειδών του ίδιου γένους (Munns & Tester 2008). Οι Maas & Hoffman (1977) παρατήρησαν ότι τα φυτά δεν αντιδρούν στην αύξηση της εδαφικής αλατότητας, έως ότου αυτή ξεπεράσει ένα κατώφλι ανοχής. Το κατώφλι αυτό εξαρτάται από το είδος και την ποικιλία του φυτού, ενώ η αύξηση της αλατότητας

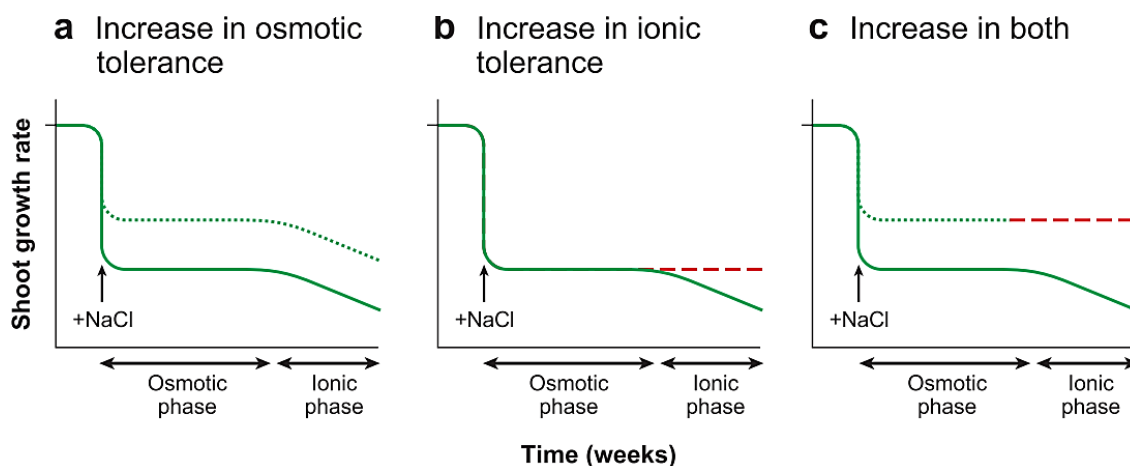
πάνω από το όριο οδηγεί σε σταδιακή απώλεια παραγωγής έως και την νέκρωση του φυτού (DERM 2011). Στην **Εικόνα 1.1** παρουσιάζεται η μεταβολή της σχετικής απόδοσης της καλλιέργειας ως συνάρτηση της εδαφικής αλατότητας εκφρασμένη σε ECse και της ποιότητας άρδευσης εκφρασμένη σε ECw για τις διάφορες κατηγορίες ευαισθησίας φυτών (Ayers & Westcot 1985). Οι ευαίσθητες καλλιέργειες παρουσιάζουν απότομη πτώση της απόδοσης ακόμα και για ECse < 4 dS m⁻¹, ενώ οι πιο ανθεκτικές δεν επηρεάζονται ούτε σε έντονες συνθήκες αλατότητας (ECse > 10 dS m⁻¹). Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι αρνητικές επιδράσεις της αλάτωσης στην ανάπτυξη των φυτών είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των μηχανισμών επίδρασης (**Κεφάλαιο 1.1.2**), οι οποίοι μπορεί να διαφέρουν μεταξύ των γενών (Munns & Tester 2008).



Εικόνα 1.1: Κατηγοριοποίηση σχετική απόδοση καλλιέργεια συναρτήσει ECw σύμφωνα με την ευαισθησία της καλλιέργειας. Το διάγραμμα βασίζεται στην εργασία των (Ayers & Westcot 1985) και επανασχεδιάστηκε από τους συγγραφείς της παρούσας μελέτης. Οι καλλιέργειες διακρίνονται σε ευαίσθητες (sensitive), μέτρια ευαίσθητες (moderately sensitive), μέτρια ανθεκτικές (moderately tolerant) και ανθεκτικές (tolerant), όπως παρουσιάζονται από τα αριστερά στα δεξιά.

Το ωσμωτικό στρες και η επίδραση του ειδικού ιόντος, που αποτελούν τους δυο κύριους μηχανισμούς επίδρασης της αλάτωσης, παρουσιάζουν μια χρονική διάκριση στην εμφάνιση τους. Το ωσμωτικό στρες οφείλεται στην παρουσία των αλάτων στο έδαφος και εμφανίζεται αμέσως μετά την αύξηση της εδαφικής αλατότητας σε τιμές ίσες με 40 mM ή ισοδύναμα 4.0 dS m⁻¹, για τα περισσότερα φυτά. Αντίθετα, η επίδραση του ειδικού ιόντος οφείλεται στην παρουσία αλάτων στους φυτικούς ιστούς και παρουσιάζεται μετά από εβδομάδες ή μήνες ανάλογα με το είδος του φυτού. Η χρονική διάκριση των μηχανισμών επίδρασης στο ρυθμό βλαστικής ανάπτυξης παρουσιάζεται στην **Εικόνα 1.2** (Munns & Tester 2008). Για τον περιορισμό των αρνητικών επιδράσεων της εδαφικής αλατότητας στην ανάπτυξη της βλάστησης, οι φυτικοί οργανισμοί

αναπτύσσουν άμυνες, που διαφέρουν ανάλογα με τον μηχανισμό αλάτωσης που τους προσβάλλει. Έτσι, ένας φυτικός οργανισμός μπορεί να παρουσιάζει αυξημένη ανθεκτικότητα στο ωσμωτικό στρες ή στην επίδραση των ειδικών ιόντων ή και στους δύο μηχανισμούς επίδρασης της αλάτωσης, με αποτέλεσμα τη διατήρηση του ρυθμού ανάπτυξης του υπό συνθήκες εδαφικής αλατότητας, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.2**.



Εικόνα 1.2: Ποιοτική απόκριση ρυθμού βλαστικής ανάπτυξης στην αλάτωση συναρτήσει του χρόνου με διάκριση των δυο φάσεων/μηχανισμών επίδρασης και επίδραση φυτικής ανθεκτικότητας σε κάθε μηχανισμό (Munns & Tester 2008).

Οι φυτικοί οργανισμοί παρουσιάζουν τρεις βασικές στρατηγικές απόκρισης στην εδαφική αλατότητα (Munns & Tester 2008). Η πρώτη στρατηγική ανθεκτικότητας βασίζεται στη μείωση του απαιτούμενου νερού για την επιβίωση του φυτού με συνέπεια να μη δαπανάται η διαθέσιμη ενέργεια του φυτού στην πρόσληψη νερού. Η στρατηγική αυτή αντισταθμίζει της αρνητικές συνέπειες του ωσμωτικού στρες και επιτυγχάνεται μέσω της αναστολής της ανάπτυξης των φύλλων και το κλείσιμο των στομάτων ώστε να μειωθεί η διαπνοή. Ιδιαίτερο ρόλο στην υλοποίηση του μηχανισμού αυτού παρουσιάζει η διαταραχή της υδατικής ισορροπίας μεταξύ εδάφους και φυτού (Fricke 2004), καθώς και η δράση διάφορων ορμονών, όπως το αποκοπτικό οξύ (Abscissic acid, ABA) και το γιββερελλικό οξύ (Gibberellic acid, GA), που παραγόμενες στο ριζικό σύστημα καθορίζουν το ρυθμό ανάπτυξης των φύλλων και την αγωγιμότητα των στομάτων υπό συνθήκες αβιοτικού στρες (Davies et al. 2005; Zhu 2001).

Οι άλλες δύο στρατηγικές ανθεκτικότητας αποσκοπούν στην ενίσχυση του φυτού απέναντι στην επίδραση του ειδικού ιόντος. Πιο συγκεκριμένα, η δεύτερη στρατηγική βασίζεται στον αποκλεισμό του Na από το ριζικό σύστημα και ως εκ τούτου την καθυστέρηση της συσσώρευσης του ειδικού ιόντος στο φύλλωμα και οι βιοχημικές διεργασίες της φωτοσύνθεσης πραγματοποιούνται ανεμπόδιστες. Εάν το φυτό επιτυγχάνει τον αποκλεισμό του 98% των αλάτων της εδαφικής

διάλυσης, τότε η συγκέντρωση στο εσωτερικό των φυτών δεν πρόκειται να υπερβεί αυτήν του εδάφους και επομένως δεν θα διαταραχθεί η λειτουργία του (Munns 2005).

Ο τρίτος μηχανισμός οφείλεται στην ανθεκτικότητα των ιστών του φυτού απέναντι σε συγκεκριμένα ιόντα, όπως το Na και το Cl και επιτυγχάνεται με τη διαμερισματοποίηση των τοξικών ιόντων τόσο σε διακυτταρικό όσο και κυτταρικό επίπεδο (Munns & Tester 2008). Διακυτταρική διαμερισματοποίηση πραγματοποιείται στα φύλλα με το Na να συσσωρεύεται στα εξωτερικά κύτταρα και όχι στα μεσόφυλλα, όπου περιέχεται η χλωροφύλλη και πραγματοποιείται η φωτοσύνθεση. Εσωτερικά των κυττάρων, αυξημένη συγκέντρωση αλάτων στο κυτόπλασμα προκαλεί τοξικότητα και παρεμποδίζει τη δράση των περισσότερων ενζύμων, ενώ η συσσώρευση αλάτων στα κυτταρικά τοιχώματα οδηγεί σε αφυδάτωση και λύση του κυττάρου. Στο εσωτερικό των κυττάρων, η διαμερισματοποίηση επιτυγχάνεται με τη συσσώρευση των αλάτων στα κενοτόπια (Flowers & Yeo 1986; Flowers 2004).

Η συνεισφορά των τριών αυτών μηχανισμών στην επιβίωση του φυτού σε περιβάλλον αλάτωσης διαφέρει μεταξύ των ειδών αλλά και των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν, όπως το επίπεδο της εδαφικής υγρασίας, τη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας και το χρόνο και τη συγκέντρωση έκθεσης στην εδαφική αλάτωση.

1.2 Η καλλιέργεια τομάτας

Η τομάτα αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα και δημοφιλή οπωροκηπευτικά σε παγκόσμιο επίπεδο, κυρίως εξαιτίας της εμφάνισης, της ιδιαίτερης γεύσης και της θρεπτικής της αξίας (Steduto et al. 2012). Ο ώριμος καρπός τομάτας έχει κόκκινο χρώμα και σχήμα του διαφέρει ανάλογα με την ποικιλία του φυτού, ενώ είναι πλούσιος σε βιταμίνες, όπως η βιταμίνη A, B6, C, και E αλλά και αντιοξειδωτικά, όπως το λυκοπένιο, β-καροτένιο και διάφορες φαινολικές ενώσεις (Benton 2008). Παραγωγή τομάτας έχει καταγραφεί σε περισσότερες από 144 χώρες με κυρίαρχες βάση παραγωγής την Κίνα, τις ΗΠΑ και την Τουρκία, ενώ η καλλιέργεια της καταλαμβάνει περίπου $2.8 \cdot 10^6$ ha παγκοσμίως (Steduto et al. 2012). Η μεγάλη ζήτηση τομάτας έχει οδηγήσει στην θερμοκηπιακή καλλιέργεια της, όπου η πλήρως ελεγχόμενες συνθήκες οδηγούν σε υπερδιπλασιασμό της παραγωγής ξεπερνώντας τους 140 t ha^{-1} (Steduto et al. 2012), σε σύγκριση με του 65 t ha^{-1} υπό μη προστατευόμενες συνθήκες (Benton 2008).

Το φυτό της τομάτας, υπό μη προστατευόμενες συνθήκες, καταναλώνει 400 με 800 mm νερού καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες, την ποικιλία του φυτού, το έδαφος και τον τρόπο άρδευσης (Steduto et al. 2012). Επιπλέον, είναι αρκετά ανθεκτικό στις ελλειμματικές συνθήκες υγρασίας όταν αυτές εφαρμόζονται μετά τον πλήρη σχηματισμό της

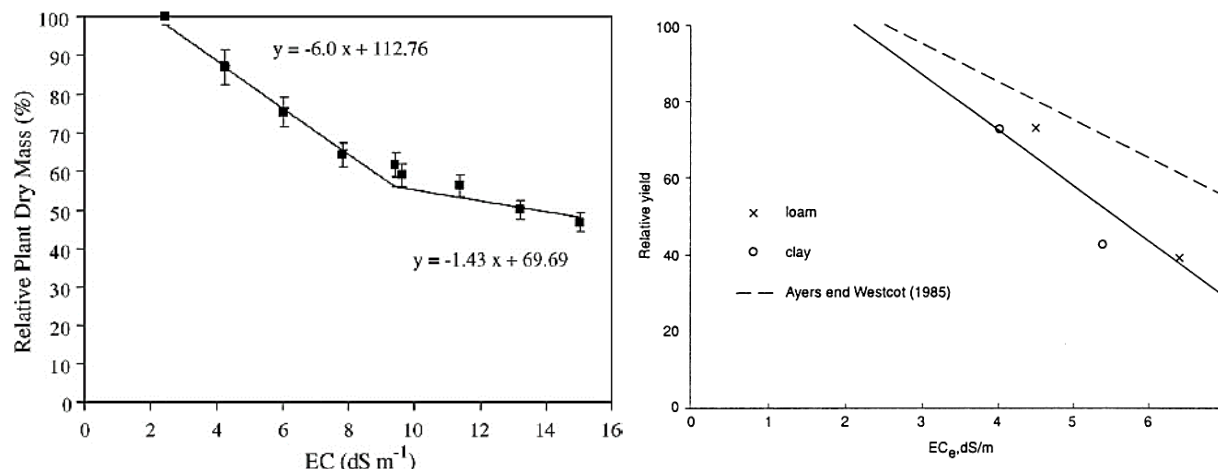
φυτοκάλυψης και δεν παρατηρείται απώλεια παραγωγής ακόμα και όταν η εδαφική υγρασία είναι στο 50% της ολικής διαθέσιμης υγρασίας. Επιπρόσθετα, έρευνες εστιασμένες στην ελλειμματική άρδευση (Deficit Irrigation, DI) υποστηρίζουν ότι είναι δυνατή η διατήρηση της απόδοσης υπό συνθήκες ελλειμματικές υγρασίας, ενώ η ποιότητα των παραγόμενων καρπών φαίνεται να αυξάνει (Battilani et al. 2002). Αντίθετα, στα πρώτα στάδια ανάπτυξης, η τομάτα απαιτεί επαρκείς διαθέσιμη υγρασία ώστε να φτάσει τη μέγιστη παραγωγή (Snyder 2007). Η άρδευση της καλλιέργειας τομάτας μπορεί να πραγματοποιηθεί με επιφανειακή ή υπεδάφια στάγδην άρδευση ή με μικροκαταιονισμό.

Η τομάτα είναι ευαίσθητη στις έντονες θερμοκρασιακές συνθήκες (Steduto et al. 2012). Πιο συγκεκριμένα, το φυτό είναι ευαίσθητο στις χαμηλές θερμοκρασίες οι οποίες εάν εφαρμόζονται για διάστημα μεγαλύτερο από 2-3 ημέρες οδηγούν σε μειωμένο αριθμό φύλλων και μεγαλύτερο πάχος ώστε να απορροφούν μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ μειώνεται και ο αριθμός των παρατηρούμενων σταυρών (τσαμπιά). Υπό χαμηλές θερμοκρασίες, πραγματοποιείται παρεμπόδιση της επικονίασης με αποτέλεσμα μειώνεται ο αριθμός των παραγόμενων καρπών. Επιπλέον, υψηλές θερμοκρασίες, ειδικά εάν συνοδεύονται από συνθήκες υψηλής σχετικής υγρασίας, καταλήγουν σε απώλεια παραγωγής λόγω μειωμένης εδραίωσης σταυρών και μη αποτελεσματικής επικονίασης. Βιβλιογραφικά ως βέλτιστες θερμοκρασιακές συνθήκες αναφέρεται το εύρος 21 με 28 °C για ημέρα και 16-18 °C για τη νύχτα (Snyder 2007).

Αναφορικά με την αλατότητα, το φυτό χαρακτηρίζεται ως μετρίως ευαίσθητο (moderately sensitive) με κατώφλι ανοχής τα $EC_{se} = 2.5 \text{ dS m}^{-1}$ (Reina-Sánchez et al. 2005), ενώ αναμένεται μείωση της παραγωγής κατά 10% για κάθε περεταίρω μοναδιαία αύξηση της EC_{se} (Maas & Hoffman 1977). Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για τιμές EC_{se} κοντά στα 8.0-9.0 dS m^{-1} αναμένεται απώλεια παραγωγής ίση με 50% (Maggio et al. 2007), ενώ οι Wan et al. (2007) θεωρούν ότι τιμές $> 12.5 \text{ dS m}^{-1}$ οδηγούν σε μηδενική παραγωγή. Αλατότητα μεγαλύτερη των 2.5 dS m^{-1} αυξάνει την πιθανότητα αδυναμία βλάστησης του σπόρου, ενώ στην περίπτωση επιτυχημένης βλάστησης μεταβάλλει τον ρυθμό ανάπτυξης του φυτού, αυξάνοντας τον χρόνο που απαιτείται για την πλήρη βλάστηση του (Maas & Hoffman 1977). Ωστόσο, η ανθεκτικότητα του φυτού στην αλατότητα μεταβάλλεται μεταξύ των διαδοχικών σταδίων ανάπτυξης. Πιο συγκεκριμένα, κατά το στάδιο της παραγωγής καρπών, η ανθεκτικότητα του φυτού στην αλατότητα αυξάνεται τόσο, ώστε επιβιώνει σε συνθήκες που ένα νεαρό φυτό θα είχε νεκρωθεί (Bolarin et al. 1993).

Οι Maggio et al. (2007) παρατήρησαν την σχετική απόδοση παραγωγής υδροπονικής θερμοκηπιακής τομάτας (*Licata FI-COIS 94*) σε σχέση με οκτώ διαφορετικές ποιότητες άρδευσης

με EC_w στο εύρος 2.5 έως 15.0 dS m⁻¹ και προσδιόρισαν δυο διακριτές φάσεις (**Εικόνα 1.3**). Υποστήριξαν ότι η πρώτη φάση με EC_w στο εύρος 2.5-9.6 dS m⁻¹ χαρακτηρίζεται από απώλεια παραγωγής 6.0% ανά μοναδιαία αύξηση του EC_w, ενώ η δεύτερη φάση με EC_w > 9.6 dS m⁻¹ περιγράφεται από απώλεια 1.4%. Σημείωσαν επίσης ότι η διγραμμική σχέση της απόκρισης της παραγωγής στην αλατότητα μπορεί να περιγράψει τη διαδοχή των μηχανισμών ανθεκτικότητας του φυτού, κατά αντιστοιχία με τον ρυθμό ανάπτυξης του βλαστού σε σχέση με την διαδοχική επίδραση των μηχανισμών αλατότητας που απεικονίζεται στην **Εικόνα 1.2**.



Εικόνα 1.3: (Αριστερά) Διγραμμική μεταβολή σχετικής απόδοσης υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας συναρτήσει EC_w (Maggio et al. 2007). Η διγραμμική σχέση με συντελεστές 6.0 και 1.4% περιγράφει την εναλλαγή των μηχανισμών επίδρασης της αλατότητας στην ανάπτυξη της τομάτας. (Δεξιά) Μεταβολή σχετικής απόδοσης τομάτας συναρτήσει εδαφικής αλατότητας (Katerji et al. 1998).

Οι Mizrahi et al. (1988) αρδεύοντας με αραιωμένο θαλασσινό νερό EC_w = 3.0 dS m⁻¹ καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο, δεν παρατήρησαν σημαντικές διαφορές στην παραγωγή θερμοκηπιακής τομάτας (cv. *FCIII*), ενώ διαπίστωσαν σημαντική ποιοτική βελτίωση, σε σύγκριση με άρδευση ποιότητας EC_w = 1.5 dS m⁻¹. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Del Amor et al. (2001) κατά τη θερμοκηπιακή καλλιέργεια τομάτας (cv. *Daniela*) υπό άρδευση 4.0 dS m⁻¹ μετά την παρέλευση 16 ημερών από τη μεταφύτευση. Οι Wan et al. (2007) σε ένα τριετές πείραμα πεδίου (2003 έως 2005) με άρδευση τεχνητού αλμυρού νερού με εύρος EC_w 1.1-4.9 dS m⁻¹ δεν παρατήρησαν σημαντικές διαφορές στην παραγωγή τομάτας (cv. *L-402*), ενώ διαπίστωσαν λογαριθμική αύξηση της απόδοσης χρήσης νερού (Water Use Efficiency, WUE) και της απόδοσης χρήσης αρδευτικού νερού (Irrigation Water Use Efficiency, IWUE). Συμπεράναν, επομένως, ότι η ελεγχόμενη χρήση αλμυρού νερού στην άρδευση συγκεκριμένων σταδίων τομάτας μπορεί να αποτελέσει διαχειριστική πρακτική μείωσης των αρδευτικών αναγκών. Σημειώνεται ότι οι διαφοροποιήσεις στη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε δυσχεραίνει τη σύγκριση μεταξύ των διαφόρων μελετών.

1.3 Προσομοίωση καλλιεργητικών συστημάτων

Η ανάγκη διασφάλισης των υδατικών πόρων και της τροφής σε παγκόσμιο επίπεδο έχει οδηγήσει σε σημαντικές καινοτομίες στον κλάδο της γεωργίας της τελευταίας δεκαετίας. Η έρευνα γύρω από τη διαχείριση καλλιεργητικών συστημάτων στοχεύει στη βελτιστοποίηση των συστημάτων άρδευσης και την εκμετάλλευση υποβαθμισμένων υδατικών πόρων, στην ορθολογική χρήση των χημικών λιπασμάτων και την παρασκευή νέων οργανικών εδαφοβελτιωτικών, καθώς και τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης των εδαφικών πόρων μέσω πρακτικών αμειψισποράς ή εναλλαγή καλλιεργειών. Η καθολική αξιολόγηση νέων πρακτικών που προκύπτουν από πειραματικές μελέτες συναντά εμπόδια λόγω της μεγάλης ετερογένειας των εδαφικών πόρων και των κλιματικών συνθηκών που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόκριση του καλλιεργητικού συστήματος στην εκάστοτε εφαρμοζόμενη πρακτική.

Οι βασικές αρχές της γεωργικής μηχανικής και της υδρολογίας είναι κοινές για όλα τα καλλιεργητικά συστήματα και, επομένως, είναι δυνατή η προσομοίωση της απόκρισης τους σε κάθε πρακτική μέσω της δημιουργίας και εφαρμογής φυσικών μοντέλων. Η χρήση φυσικών μοντέλων για την προσομοίωση της ροής και της μεταφοράς διαλυμένων ουσιών στην ακόρεστη ζώνη αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τη διαχείριση καλλιεργητικών συστημάτων (Hirich et al. 2012), με στόχο την αειφορική διαχείριση των υδατικών και εδαφικών πόρων και τη μεγιστοποίηση της παραγωγής (Bastiaanssen et al. 2007; Montenegro et al. 2010). Επιπλέον, τα μαθηματικά μοντέλα έχουν τη δυνατότητα προσαρμογής και βαθμονόμησης στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής ενισχύοντας την αξιοπιστία τους, ενώ η ταχύτητα και το μικρό κόστος χρήσης τους τα καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμα στην αξιολόγηση εναλλακτικών καλλιεργητικών πρακτικών (Ragab 2015). Η επίλυση των φυσικών-μαθηματικών εξισώσεων που περιγράφουν τα καλλιεργητικά συστήματα πραγματοποιείται μέσω αριθμητικών μεθόδων.

Στη βιβλιογραφία συναντάται μεγάλος αριθμός υπολογιστικών προγραμμάτων για την προσομοίωση καλλιεργητικών συστημάτων, με τον συγγραφέα να θεωρεί ως κυριότερα το SALTMED (Ragab 2002), το Soil Water Atmosphere Plant (Kroes et al. 2008) και το SRFR (Bautista et al. 2009). Επιπλέον, τα μοντέλα HYDRUS-1D (Simunek et al. 2009) και HYDRUS-2D/3D (Šimunek et al. 2008) αποτελούν ευρέως χρησιμοποιούμενα και επικυρωμένα μοντέλα προσομοίωσης ροής στο υπέδαφος (Simunek et al. 2012), και δύναται να τροποποιηθούν ή να χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικά ώστε να περιγράψουν τις διεργασίες ανάπτυξης της βλάστησης. Οι Bastiaanssen et al. 2007) σημείωσαν ότι τα υπάρχοντα μοντέλα επαρκούν σε αριθμό και ποιότητα, ενώ έμφαση πρέπει να δοθεί στην εδραίωση και επικύρωση τους αλλά και την βελτίωση των μοντέλων ως αφορά την ευκολία χρήσης.

1.4 Κλιματική Αλλαγή

Οι Haddeland et al. (2014) αναφέρουν ότι ανάγκες άρδευσης των καλλιεργειών προβλέπεται να αυξηθούν με την αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας, ενώ ταυτόχρονα αναμένεται περιορισμός των διαθέσιμων υδατικών πόρων ειδικά στις (ημι)ξηρικές περιοχές (Ragab & Prudhomme 2002; Vrochidou et al. 2013), όπως αυτές της Μεσογείου (Koutroulis et al. 2013; Rochdane et al. 2014). Επιπρόσθετα, στις παράκτιες περιοχές προβλέπεται ποιοτική υποβάθμιση των υδατικών πόρων εξαιτίας της εντονότερης εκμετάλλευσης τους και της ανύψωσης της μέσης στάθμης θάλασσας (Taylor et al. 2012), που ενισχύουν το φαινόμενο διείσδυσης της σφήνας υφαλμύρισης.

Οι Daliakopoulos et al. (2016a), έπειτα από εκτενή βιβλιογραφική έρευνα, εντόπισαν και συγκέντρωσαν τα διάφορα φαινόμενα, που προωθούμενα από την κλιματική αλλαγή, συνεισφέρουν στην αλάτωση των εδαφών στην Ευρώπη. Στις μεσογειακές χώρες, όπως η Ιταλία, η Ισπανία και η Ελλάδα, η αύξηση της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας οδηγεί σε συσσώρευση αλάτων στο έδαφος. Αντίθετα, σε χώρες της κεντρική ή βόρειας Ευρώπης διαφορετικά φαινόμενα καθορίζουν την εδαφική αλάτωση, όπως για παράδειγμα η αύξηση της μέσης στάθμης θάλασσας ΜΣΘ στην Ολλανδία. Η ποιότητα και η διαθέσιμη ποσότητα του αρδευτικού ύδατος θα καθορίσουν το βαθμό και το ρυθμό της εδαφικής αλάτωσης. Η αύξηση της εξατμισοδιαπνοής οδηγεί σε μείωση του διαθέσιμου προς στράγγιση κλάσματος της άρδευσης, με αποτέλεσμα την συσσώρευση αλάτων στη ριζόσφαιρα (Daliakopoulos et al. 2016b). Οι υποβάθμιση των εδαφικών πόρων λόγω της αλάτωσης επιφέρει επιπρόσθετες πιέσεις στην παραγωγή τροφής.

1.5 Σκοπός μελέτης

Η παρούσα μελέτη διερευνά την επίδραση της ποιότητας άρδευσης στη γονιμότητα του εδάφους και την απόδοση της παραγωγής θερμοκηπιακής καλλιέργειας τομάτας υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής. Σκοπός της μελέτης είναι η ποσοτικοποίηση των απωλειών στην παραγωγή τομάτας εξαιτίας της χρήσης υποβαθμισμένων υδατικών πόρων για άρδευση και της συνεργατικής δράσης της κλιματικής αλλαγής. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, γίνεται χρήση του μοντέλου SALTMED για την προσομοίωση της θερμοκηπιακής καλλιέργειας τομάτας. Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε το Τυμπάκι Ηρακλείου, Κρήτης. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε και επαληθεύτηκε με βάση αποτελέσματα πειραματικής καλλιέργειας θερμοκηπιακής τομάτας έλαβαν χώρα στο Πολυτεχνείο Κρήτης (ΠΚ) από τον Οκτώβριο του 2015 έως τον Απρίλιο του 2016. Στη συνέχεια εκτελέστηκαν σενάρια εναλλακτικών πρακτικών άρδευσης και κλιματικής αλλαγής.

2 Μεθοδολογία

2.1 Το μοντέλο SALTMED

Το μοντέλο SALTMED (Ragab 2002) αναπτύχθηκε για την προσομοίωση καλλιεργητικών συστημάτων με σκοπό τον προσδιορισμό της εδαφικής υγρασίας και αλατότητας, τις ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό και N και την πρόβλεψη της τελικής παραγωγής και ξηρής βιομάζας της καλλιέργειας. Το μοντέλο SALTMED περιγράφει το σύστημα έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα μέσω μαθηματικών εξισώσεων και χαρακτηρίζεται από το εύρος επιλογών που προσφέρει για την προσομοίωση των διάφορων διεργασιών (Ragab 2015). Για παράδειγμα, ως σύστημα άρδευσης μπορεί να επιλεγθεί η άρδευση κατάκλισης, η άρδευση καταιονισμού και η επιφανειακή ή υπεδάφια στάγδην άρδευση, για την οποία παρέχεται και η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου μερικής ριζικής ξήρανσης (Partial Root Drying, PRD). Επιπλέον, η λίπανση μπορεί να εφαρμοστεί σε στερεή μορφή ή σε υδατοδιαλυτή μορφή μέσω της άρδευσης.

Το μοντέλο SALTMED έχει βαθμονομηθεί, επικυρωθεί και χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την προσομοίωση διαφόρων καλλιεργητικών συστημάτων από ένα μεγάλο πλήθος ερευνητικών ομάδων (Flowers et al. 2005; Abdel Gawad et al. 2005; Golabi et al. 2009; Pulvento et al. 2013; Silva et al. 2013; Fghire et al. 2015; Kaya et al. 2015; Mehanna & Pipars 2015; Kaya & Yazar 2016; Kaoutar et al. 2017), ενώ έχει χρησιμοποιηθεί και για την προσομοίωση θερμοκηπιακών καλλιεργειών (Aly et al. 2015; Rameshwaran et al. 2015; Rameshwaran et al. 2016; Ioannis N. Daliakopoulos et al. 2016; Apostolakis et al. 2016). Το μοντέλο SALTMED βρίσκει εφαρμογή και στη μελέτη επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής (Montenegro et al. 2010; Ioannis N. Daliakopoulos et al. 2016), ενώ πρόσφατα πραγματοποιήθηκε προσθήκης της μεθόδου των θερμοκρασιακών βαθμομερών στην τελευταία έκδοση του (Ragab 2015), για την πληρέστερη μελέτη της κλιματικής αλλαγής (Pulvento et al. 2015; Hirich et al. 2016).

2.1.1 Κίνηση ύδατος και διαλυμένων ουσιών

Η κίνηση του ύδατος στο έδαφος περιγράφεται από την εξίσωση του Richard, που βασίζεται σε δύο αρχές το νόμο του Darcy και την εξίσωση συνέχειας. Πιο συγκεκριμένα, ο νόμος του Darcy περιγράφει τη γραμμική σχέση της ροής του νερού q [$L \ T^{-1}$] με την υδραυλική κλίση $\frac{\delta H}{\delta Z}$ [-] σύμφωνα με την **Εξίσωση 2.1**, όπου $K(\psi)$ η υδραυλική αγωγιμότητα [$L \ T^{-1}$] ως συνάρτηση του εδαφικού δυναμικού του νερού, H η υδραυλική πίεση [L] και Z [L] η κάθε κατακόρυφη απόσταση. Η υδραυλική πίεση H αποτελεί το άθροισμα του βαρυτικού δυναμικού Z και του δυναμικού πίεσης ψ (**Εξίσωση 2.2**).

$$q = -K(\psi) \frac{\delta H}{\delta Z} \quad (2.1)$$

$$H = \psi + Z \quad (2.2)$$

Προκειμένου η εξίσωση Richard να αντιπροσωπεύει την κατακόρυφη κίνηση του νερού στη ριζόσφαιρα όπου συνήθως επικρατούν ακόρεστες συνθήκες, μετατρέπεται στην **Εξίσωση 2.3**, όπου θ η εδαφική υγρασία, t και z ο χρόνος και η απόσταση αντίστοιχα, και S_w η πρόσληψη νερού από τη βλάστηση. Η υδραυλική αγωγιμότητα $K(\theta)$ εκφράζεται συνάρτηση της υγρασία θ , ενώ το δυναμικό πίεσης ψ εκφράζεται πλέον μόνο από το δυναμικό της εδαφικής μήτρας ψ_m , καθώς το υδροστατικό δυναμικό ψ_h μηδενίζεται λόγω των ακόρεστων συνθηκών.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial (\psi + z)}{\partial z} \right] - S_w \quad (2.3)$$

Η μεταφορά των διαλυμένων ουσιών (αλάτων και N) βασίζεται στη συμμεταφορά εξαιτίας της κίνηση του νερού και τη διάχυση και υδροδυναμική διασπορά λόγω των διαφορών συγκέντρωσης και περιγράφεται από την **Εξίσωση 2.4**. Ο πρώτος όρος του δεξιού μέλους της **Εξίσωσης 2.4** αφορά την συνδυαστική επίδραση της διάχυσης και υδροδυναμικής διασποράς, όπου c η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας, x η απόσταση, και D_s και D_h οι συντελεστές διάχυσης και διασποράς, αντίστοιχα. Ο συντελεστής D_s (**Εξίσωση 2.5**) αφορά τη διάχυση σε πορώδη μέσα, όπως το έδαφος, και μπορεί να εκφραστεί μέσω του γινομένου του συντελεστή D_o για διάχυση διαλυμένης ουσίας στο νερό με την υγρασία του πορώδους μέσου ως έκφραση του βαθμού κορεσμού και του εμπειρικού συντελεστή ξ , που εκφράζει την δαιδαλώδη σύνδεση των πόρων του μέσου **Εξίσωσης 2.6**. Στην **Εξίσωση 2.6**, τα θ και θ_s εκφράζουν την εδαφική υγρασία και την εδαφική υγρασία κορεσμού, όπου η τελευταία ισοδυναμεί με το πορώδες. Στο μοντέλο SALTMED η ροή ύδατος και η μεταφορά των διαλυμένων ουσιών επιλύεται αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

$$J = -(D_h + D_s) \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) + \bar{v} \theta c \quad (2.4)$$

$$D_s = D_o \theta \xi \quad (2.5)$$

$$\xi = \frac{\theta^{7/3}}{\theta_s^2} \quad (2.6)$$

Η δυσκολία μοντελοποίησης της ροής υδάτων στην ακόρεστη ζώνη έγκειται στην εξάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας από το εδαφικό δυναμικό, και επομένως από την περιεχόμενη εδαφική υγρασία. Το μοντέλο SALTMED περιγράφει τη σχέση μεταξύ εδαφικής υγρασίας θ και εδαφικού

δυναμικού ψ βάση της **Εξίσωσης 2.7** και τη σχέση μεταξύ εδαφικού δυναμικού και υδραυλικής αγωγιμότητας μέσω της **Εξίσωσης 2.8** όπως προτάθηκαν από τον van Genuchten (1980). Στην **Εξίσωση 2.7** το θ_s αντιπροσωπεύει την εδαφική υγρασία κορεσμού, το θ_r την παραμένουσα εδαφική υγρασία και τα α , n και m αποτελούν παραμέτρους που σχετίζονται με το εδαφικό δυναμικό που επιτρέπει τη διείσδυση αέρα στο έδαφος και την κατανομή μεγέθους των πόρων, αντίστοιχα. Τα α , n και m είναι εμπειρικοί παράμετροι που χαρακτηρίζουν το κάθε είδος εδάφους. Στην **Εξίσωση 2.8** τα K_s και K_r αντιπροσωπεύουν την κορεσμένη και σχετική υδραυλική αγωγιμότητα, ενώ το S_e , που δίδεται από την **Εξίσωση 2.9**, μια κανονικοποιημένη μορφή εδαφικής υγρασίας που εκφράζει τον αποτελεσματικό κορεσμό (Effective Saturation). Οι **Εξισώσεις 2.7-8** μετασχηματίστηκαν σύμφωνα με τους van Dam et al. (1994) στις **Εξισώσεις 2.10-11** ώστε να εκφράζουν το εδαφικό δυναμικό και την υδραυλική αγωγιμότητα συναρτήσει του S_e (Ragab 2002).

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha\psi|^n)^m} \quad (2.7)$$

$$K(\psi) = K_s K_r(\psi) = K_s S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (2.8)$$

$$S_e = \frac{(\theta - \theta_r)}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.9)$$

$$h(S_e) = \frac{\left[(S_e^{-1/m} - 1)^{1/n} \right]}{\alpha} \quad (2.10)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^\lambda \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (2.11)$$

Ο συντελεστής απόπλυσης LR, δηλαδή η περίσσεια νερού που απαιτείται για την απομάκρυνση των αλάτων από τη ριζόσφαιρα, υπολογίζεται από την **Εξίσωση 2.12** ως ο λόγος του ύψους νερού στράγγισης D_d προς το ύψος νερού άρδευσης D_i ή ως ο λόγος της αγωγιμότητας του νερού άρδευσης C_i προς το νερό στράγγισης C_d .

$$LR = \frac{D_d}{D_i} = \frac{C_i}{C_d} \quad (2.12)$$

2.1.2 Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας

Το μοντέλο SALTMED διαθέτει τρεις μεθόδους για τον προσδιορισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_o [L] και ο χρήστης καλείται να επιλέξει ανάμεσα στην εξίσωση των Penman-Monteith, την τροποποιημένη εξίσωση Penman-Monteith σύμφωνα με τους Allen et al. (1989), καθώς και την εισαγωγή δεδομένων πεδίου. Στην παρούσα εργασία, η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο των Allen et al. (1989) (**Εξίσωση 2.13**) με βάση τα

κλιματικά δεδομένα θερμοκρασίας, βροχόπτωσης, σχετικής υγρασίας και ολικής ακτινοβολίας της περιοχής και θεωρώντας αγωγιμότητα στομάτων του φυτού ίση με 70 m s^{-1} . Στη συνέχεια, η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET_c προσδιορίζεται από το γινόμενο της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με τον φυτικό συντελεστή K_c [-] (**Εξίσωση 2.14**), ο οποίος διακρίνεται στον φυτικό συντελεστή διαπνοής K_{cb} και στον συντελεστή εδαφικής εξάτμισης K_e , σύμφωνα με την **Εξίσωση 2.15**.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (2.13)$$

$$ET_c = ET_o K_c \quad (2.14)$$

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (2.15)$$

2.1.3 Πρόσληψη ύδατος από την καλλιέργεια

Το μοντέλο SALTMED προσδιορίζει την πρόσληψη ύδατος S [L] από το φυτό βάση της **Εξίσωση 2.16**, που προτάθηκε από τους Cardon & Letey (1992), ως κλάσμα της μέγιστης δυνατής πρόσληψης ύδατος που συμπίπτει με την εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET_c (**Εξίσωση 2.17**). Ο όρος $\lambda(z, t)$ εκφράζει τη συνολική μάζα του ριζικού συστήματος για βάθος z και χρόνο t και υπολογίζεται συναρτήσει του L , που αποτελεί μέγιστο δυνατό βάθος του ριζικού συστήματος (**Εξίσωση 2.18**). Οι όροι π και h εκφράζουν το ωσμωτικό δυναμικό και το δυναμικό της εδαφικής μήτρας, ενώ οι π_{50} και h_{50} εκφράζουν την τιμή του ωσμωτικού δυναμικού και δυναμικού εδαφικής μήτρας που οδηγεί σε πρόσληψη ύδατος ίσο με το 50% του μέγιστου δυνατού, δηλαδή του S_{max} . Καθώς η ανθεκτικότητα της καλλιέργειας στην ξηρασία και το ωσμωτικό στρες μεταβάλλεται με τα στάδια της καλλιέργειας, τα όρια π_{50} και h_{50} μεταβάλλονται επίσης, και ο λόγος τους ορίζει τον συντελεστή $a(t)$, όπως φαίνεται στην **Εξίσωση 2.19**.

$$S_{(z,t)} = \left[\frac{S_{max}(t)}{1 + \left(\frac{a(t) h + \pi}{\pi_{50}(t)} \right)^3} \right] \lambda(z, t) \quad (2.16)$$

$$S_{max}(t) = ET_c(t) = ET_o(t) K_{cb}(t) \quad (2.17)$$

$$\lambda(z, t) = \begin{cases} \frac{5}{3} L, & z \leq 0.2L \\ \frac{25}{12} L \left(1 - \frac{z}{L} \right), & 0.2L \leq z \leq L \\ 0, & z > L \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\alpha(t) = \frac{\pi_{50}(t)}{h_{50}(t)} \quad (2.19)$$

2.1.4 Παραγωγή καλλιέργειας

Η σχετική παραγωγή (Relative Yield, RY), της καλλιέργειας εκφρασμένη σε [%], προσδιορίζεται από το λόγο του αθροίσματος της ημερήσιας πρόσληψης νερού $S(x, z, t)$ προς το άθροισμα της ημερήσιας μέγιστης δυνατής πρόσληψης νερού $S_{max}(x, z, t)$, σύμφωνα με την **Εξίσωση 2.20**, όπου τα x και z εκφράζουν τις συντεταγμένες του εκάστοτε σημείου του ριζικού συστήματος. Η πραγματική απόδοση της καλλιέργειας (Actual Yield, AY), εκφρασμένη σε $[M L^2]$ προσδιορίζεται από το γινόμενο της RY με τη μέγιστη δυνατή παραγωγή $Y_{max} [M L^2]$ (**Εξίσωση 2.21**), που προσδιορίζεται είτε από τη βιβλιογραφία ή από πειραματικά δεδομένα για μια περιοχή.

$$RY = \frac{\sum S(x, z, t)}{\sum S_{max}(x, z, t)} \quad (2.20)$$

$$AY = Y_{max} RY \quad (2.21)$$

2.1.5 Δεδομένα εισόδου

Το μοντέλο SALTMED επιλύει τις παραπάνω εξισώσεις με βάση τα δεδομένα εισόδου και αποδίδει τα αποτελέσματα τους σε ημερήσιο βήμα. Απαιτούμενα δεδομένα εισόδου αφορούν τις κλιματικές συνθήκες κατά την καλλιεργητική περίοδο, το πρόγραμμα άρδευσης, τα φυτικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και το πρόγραμμα στερεής λίπανσης και ο προσδιορισμός τους λαμβάνει χώρα στις καρτέλες του τμήματος Field Parameters. Το μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας και ταυτόχρονης εκτέλεσης έως είκοσι διαφορετικών καλλιεργητικών συστημάτων. Πιο αναλυτικά, τα απαιτούμενα κλιματικά δεδομένα (καρτέλα Climate) περιλαμβάνουν την μέγιστη και ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία ($^{\circ}C$), την μέση ημερήσια ταχύτητα ($m s^{-1}$), την ημερήσια ηλιοφάνεια (hr), την ημερήσια βροχόπτωση ($mm d^{-1}$), τη μέση ημερήσια σχετική υγρασία (%) και τη ολική ηλιακή ακτινοβολία ($MJ m^{-2} d^{-1}$).

Το πρόγραμμα άρδευσης (καρτέλα Irrigation) περιλαμβάνει την ποσότητα αρδευόμενου νερού ($L d^{-1}$ για στάγδην άρδευση), την ώρα έναρξης και παύσης της άρδευσης, την αγωγιμότητα ($dS m^{-1}$), την ποσότητα N στην υδρολίπανση ($mg L^{-1}$) καθώς και την ώρα έναρξης και παύσης της υδρολίπανσης. Επιπλέον, εάν πραγματοποιείται εφαρμογή στερεάς λίπανσης (καρτέλα Nitrogen), οργανικής ή χημικής, απαιτείται ο προσδιορισμός του φορτίου N-λίπανσης στο έδαφος ($g N m^{-2}$), ο αρχικός εδαφικός οργανικός άνθρακας ($g C m^{-2}$), η εδαφική κάλυψη από φυτικά υπολείμματα ($m^2 m^{-2}$) και το εδαφικό οργανικό υλικό (%).

Αναφορικά με τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας (καρτέλα Crop) το μοντέλο SALTMED διαθέτει μια μεγάλη βάση δεδομένων με πρότυπες καλλιέργειες. Πιο συγκεκριμένα, απαιτεί αρχικά τον προσδιορισμό της διάρκειας των σταδίων ανάπτυξης που είναι τρία, το αρχικό (initial), το μέσο (middle) και το τελικό (late) καθώς και της ημερομηνίας σποράς και βλάστησης της καλλιέργειας. Για κάθε ένα από τα στάδια ανάπτυξης απαιτείται επιπλέον η είσοδος των φυτικών συντελεστών K_c και K_{cb} , το κλάσμα φυτοκάλυψης F_c , το ύψος (m) της βλάστησης και ο δείκτης LAI ($m^2 m^{-2}$), ενώ πρέπει να καθοριστεί και όριο ωσμωτικού δυναμικού $\pi 50$ ($dS m^{-1}$). Επιπλέον, χρειάζεται ο προσδιορισμός του ελάχιστου και μέγιστου επιτρεπτού βάθους (m) του ριζικού συστήματος, η μέγιστη δυνατή παραγωγή ($t ha^{-1}$) κάτω από βέλτιστες συνθήκες και η ελάχιστη παρουσία οξυγόνου (%) που απαιτείται για την πρόσληψη νερού από τη βλάστηση. Τέλος, εάν η ανάπτυξη της καλλιέργειας επιλεγεί να προσδιοριστεί βάση της μεθόδου των βαθμοημερών, τότε απαιτείται και ο προσδιορισμός των θερμοκρασιακών βαθμοημερών κάθε σταδίου ανάπτυξης.

Το μοντέλο SALTMED διαθέτει μια εκτενή βάση δεδομένων σχετικά με τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των εδαφών και απαιτείται ο προσδιορισμός του πορώδους (Porosity, $m^3 m^{-3}$), της υδατοϊκανότητας (Field capacity, $m^3 m^{-3}$), του σημείου μόνιμου μαρασμού (Permanent wilting point, $m^3 m^{-3}$), του δείκτη κατανομής μεγέθους πόρων (Pore size distribution Index, -), του υδροσκοπικού ύδατος (Residual water content, $m^3 m^{-3}$), του παράγοντα ριζικού πλάτους (Root width factor, -), του βάθους εξάτμισης (Max evaporation depth, mm) και της υδραυλικής αγωγιμότητας (Saturated hydraulic conductivity, $cm d^{-1}$) καθώς και της οριακής τιμής εδαφικής μύζησης όπου επιτρέπεται η διείσδυση του αέρα στο έδαφος (Bubbling pressure, cm). Η επιλογή του εδάφους πραγματοποιείται στην καρτέλα General και είναι δυνατή η επιλογή διαφορετικών τύπων εδάφους (έως πέντε) και ο προσδιορισμός του βάθους για το σχηματισμό του εδαφικού προφίλ. Επιπλέον, προσδιορίζονται οι αρχικές εδαφικές συνθήκες υγρασίας, αλατότητας και συγκέντρωσης N για κάθε εδαφικό ορίζοντα.

2.2 Εδαφικές παράμετροι

2.2.1 Εδαφική υγρασία

Η εδαφική υγρασία προσδιορίστηκε με χρήση του αισθητήρα EC-5 ECH₂O, της εταιρίας Decagon, σε βήμα 15 min. Η ακρίβεια του αισθητήρα προσδιορίζεται από τον κατασκευαστή στο $\pm 3\%$ για τυπικά εδάφη. Αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε δυο βάθη, 5 και 20 cm, με ακτινωτή διεύθυνση προς το κέντρο της γλάστρας, σε απόσταση 12 cm από το σημείο άρδευσης. Σε κάθε εδαφική μεταχείριση αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε τρεις επαναλήψεις.

2.2.2 Προσδιορισμός εδαφικής αλατότητας

Ο προσδιορισμός της EC πραγματοποιήθηκε σε εδαφικό δείγμα έπειτα από ξήρανση στους 40 °C για 48 h και κοσκίνιση σε κόσκινο διαμέτρου πόρων 2 mm. 10 g εδάφους κοσκινισμένου δείγματος τοποθετήθηκαν σε σωλήνες falcon των 50 mL και αναμείχθηκαν με 20 mL απιονισμένο νερό για 2 ημέρες και στη συνέχεια διηθήθηκαν. Η μέτρηση της $EC_{1:2}$ σε μονάδες $dS\ m^{-1}$ πραγματοποιήθηκε με το όργανο HQ40D Multi της εταιρίας HACH, στο διηθημένο διάλυμα. Για την άμεση σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία, η $EC_{1:2}$ εκφράστηκε σε ECse λαμβάνοντας υπόψη την κοκκομετρία του εδάφους, σύμφωνα με τις **Εξισώσεις 2.22-23** (Rengasamy 2006).

$$EC_{1:5} = 0.94\ EC_{1:2} \quad (2.22)$$

$$EC_{se} = [14 - 0.13(Clays\ Content\ (\%))] EC_{1:5} \quad (2.23)$$

2.2.3 Προσδιορισμός μετάλλων και δείκτη SAR

Η ανάλυση για τον προσδιορισμό των μετάλλων έγινε με φασματομετρία μάζας (Mass Spectrometry, MS) σε συνδυασμό με το επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (Inductively Coupled Plasma, ICP) ως πηγή ατμοποίησης των μετάλλων. Κατά την ανάλυση των μετάλλων με το ICP-MS αξιοποιήθηκε η δυνατότητα του οργάνου να λειτουργεί σε collision (He) mode, με στόχο την παραγωγή ακόμα πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων λόγω του περιορισμού των ισοβαρών παρεμποδίσεων.

Κατά την προεπεξεργασία, τα εδαφικά δείγματα τοποθετήθηκαν σε κλίβανο στους 40 °C για 48 h, για μείωση της περιεχόμενης υγρασίας τους και πέρασαν από κόσκινο διαμέτρου πόρων 2 mm. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε εκχύλιση των δειγμάτων με αποσταγμένο νερό σε αναλογία έδαφος προς νερό 1:2 και διήθηση με φίλτρο Whatman με διάμετρο πόρων 0.45 μm και κατάλληλη αραίωση μέσα στο εύρος της καμπύλης βαθμονόμησης (1:10). Τέλος, πραγματοποιήθηκε οξίνιση με χρήση νιτρικού οξέος (HNO_3) σε επίπεδο 2% v/v ($pH < 2$). Ο λόγος προσρόφησης νατρίου από το έδαφος (SAR) υπολογίστηκε από την **Εξίσωση 2.24**.

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{0.5([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])}} \quad (2.24)$$

2.3 Κλιματικά δεδομένα

2.3.1 Κλιματικές συνθήκες υπάρχουσα κατάσταση

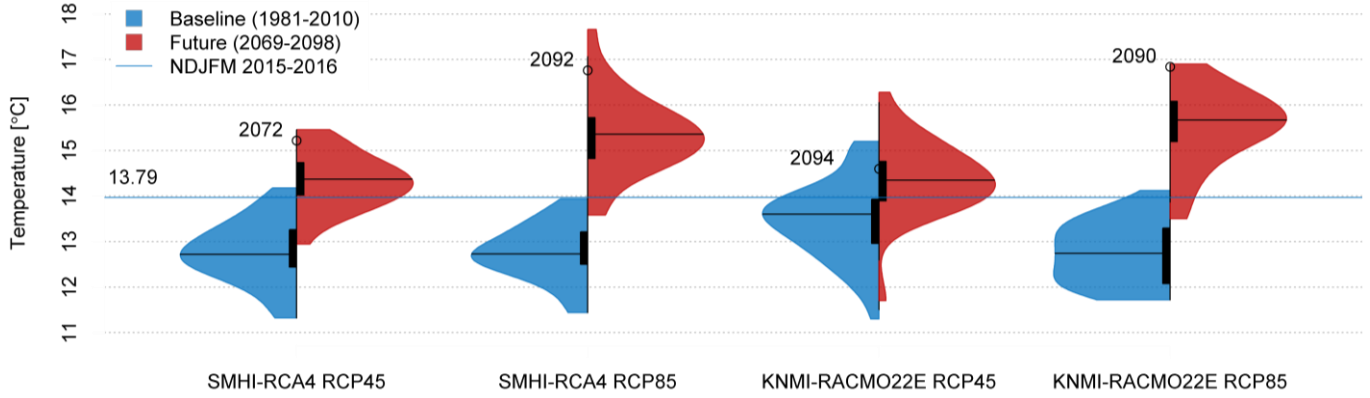
Κατά την εκτέλεση του πειράματος καταγράφονταν οι κλιματικές συνθήκες εντός και εκτός του θερμοκηπίου. Η θερμοκρασία αέρα (°C) και η σχετική υγρασία (%) παρατηρούνταν με βήμα 15

min με χρήση τριών αισθητήρων HOBOPro V2®. Η ακρίβεια του αισθητήρα ήταν ± 0.21 °C στο θερμοκρασιακό εύρος 0-50 °C και $\pm 2.5\%$ στο εύρος σχετικής υγρασίας 10-90%, ενώ χαρακτηρίζονταν από ανάλυση 0.02 °C και 0.03% στους 25 °C για τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία, αντίστοιχα. Επιπλέον, δεδομένα για την ολική ηλιακή ακτινοβολία πάρθηκαν από το σταθμό του ΠΚ, η οποία είχε καταγραφεί με χρήση πυρανόμετρου.

2.3.2 Κλιματικές συνθήκες μελλοντικών σεναρίων

Για τη μελέτη της κλιματικής αλλαγής, εξετάστηκαν τέσσερις χρονοσειρές που προέκυψαν από τον συνδυασμό δυο μοντέλων στα πλαίσια του Euro-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment over Europe) και δυο δρώσες δυνάμεις ακτινοβολίας (Representative Concentration Pathways, RCP). Πιο συγκεκριμένα, τα μοντέλα ήταν το RACMO του ινστιτούτου KNMI και το RCA του ινστιτούτου SMHI, ενώ τα RCP που χρησιμοποιήθηκαν θεωρούσαν αύξηση της μέσης ακτινοβολίας κατά 4.5 και κατά 8.5 W m⁻² έως το 2100. Τα δύο RCM (Regional Climate Models) λαμβάνουν οριακές συνθήκες από τα GCM (Global Climate Model) του κλιματικού πειράματος Couple Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). Τα RCM χαρακτηρίζονταν από ικανοποιητική χωρική ανάλυση με πλέγμα 12.5 km.

Οι τέσσερις επιλεγμένες χρονοσειρές εκτείνονταν από το παρελθόν έως και το μέλλον και διακρίθηκαν σε μια ιστορική (1981-2010) και μια μελλοντική περίοδο (2069-2098). Καθώς το μοντέλο SALTMED δεν λειτουργεί σε budget mode, εμφανίστηκε η ανάγκη επιλογής συγκεκριμένων ετών από τις τέσσερις μελλοντικές χρονοσειρές για μελέτη. Ως κριτήριο επιλογής χρησιμοποιήθηκε η μέση ετήσια θερμοκρασία (MEΘ). Αρχικά, προσδιορίστηκε η θέση της MEΘ της περιόδου 2015-16 στην ιστορική κατανομή (μπλε κατανομή στην **Εικόνα 2.1**). Έπειτα, προσδιοριστικό το μελλοντικό έτος κάθε χρονοσειράς του οποίου η θέση της MEΘ στην μελλοντική κατανομή (κόκκινη κατανομή **Εικόνα 2.1**) είναι στατιστικά ανάλογη με αυτήν της περιόδου 2015-16 στην ιστορική. Η μέθοδος αυτή κατέληξε στα έτη 2094, 2090, 2072 και 2092 για τις χρονοσειρές KNMI-RACMI22E RCP 4.5, KNMI-RACMI22E RCP8.5, SMHI-RCA4 RCP4.5 και SMHI-RCA4 RCP 8.5, αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 2.1**. Τα έτη αυτά στο εξής θα αναφέρονται με τους κωδικούς KNMI 4.5, KNMI 8.5, SMHI 4.5 και SMHI 8.5, αντίστοιχα.



Εικόνα 2.1: Κατανομή μέσης ετήσιας θερμοκρασίας ιστορικής και μελλοντικής περιόδου. Περιγραφή θέσης ΜΕΘ περιόδου 2015-16 στην ιστορική περίοδο και εύρεση μελλοντικού έτους με ΜΕΘ σε στατιστικά ανάλογης θέση στην μελλοντική κατανομή.

Προκειμένου το SALTMED να προσομοιώσει την καλλιέργεια τομάτας υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής, για την οποία τα διαθέσιμα δεδομένα κλιματικών μεταβλητών αφορούν το εξωτερικό περιβάλλον, έπρεπε να μοντελοποιηθεί η επίδραση του θερμοκηπίου. Οι ελάχιστες T_{in}^{min} και μέγιστες T_{in}^{max} ημερήσιες θερμοκρασίες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου υπολογίστηκαν από τις αντίστοιχες θερμοκρασίες περιβάλλοντος (T_{out}^{min} και T_{out}^{max}) βάση των **Εξισώσεων 2.25** που προτάθηκαν από τους Ioslovich et al. (1996) για μη τεχνητά θερμαινόμενο χώρο. Η μεταβλητή s είναι η ηλιακή ακτινοβολία σε ($W m^{-2}$), το b είναι η σταθερά θερμικής απόδοσης σε (%) και το U ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το σύστημα στο περιβάλλον σε ($W m^{-2} K^{-1}$) και αποτελεί χαρακτηριστικό του υλικού κατασκευής του θερμοκηπίου (**Πίνακας 2.1**). Το q εκφράζει το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω αερισμού ($W m^{-2} K^{-1}$). Ο αερισμός q εκφράζεται ως συνάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας και περιγράφει τον μη-αυτόματο αερισμό κατά τις ημέρες με ηλιοφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται ότι ο αερισμός περιγράφεται από δυο καταστάσεις; α) αυτήν μιας κρίσιμης ημέρας ή κατά τη διάρκεια της νύχτας και ισοδυναμεί με ακούσιες απώλειες θερμότητας και β) μια μέγιστη τιμή q_v που επιτυγχάνεται όταν η ηλιακή ακτινοβολία ξεπερνά μια οριακή τιμή s_v .

$$\begin{cases} T_{in}^{min}(t) = T_{out}^{min}(t) + \frac{1}{(U + q)} \\ T_{in}^{max}(t) = \begin{cases} T_{out}^{max}(t) + \frac{bs(t)}{U + q}, s \leq s_v \\ T_{out}^{max}(t) + \frac{bs(t)}{U + q_v}, s > s_v \end{cases} \end{cases} \quad (2.25)$$

Πίνακας 2.1: Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας U σε ($W m^{-2}$) για ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά κάλυψης θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων, προσδιορισμένα υπό κανονικοποιημένες περιβαλλοντικές συνθήκες ($T_{out} = -10\text{ }^{\circ}C$, $T_{in} = +30\text{ }^{\circ}C$, ταχύτητα ανέμου = 4 ms^{-1}) σύμφωνα με τον Castilla (2013).

Υλικό	Ηλιοφάνεια	Νεφελώδης
Μονό κάλυμμα	PE	8.8-9.0
	EVA	7.8
	PVC	7.6
	Polyester	7.2
	Glass (4 mm)	6.1
Διπλό κάλυμμα	PE+PE	6.4
	PC (6 mm)	3.5
	Glass + glass	3.1

Η σχετική υγρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου υπολογίζεται από ένα απλό 4-10-1 feedforward τεχνητό νευρωνικό δίκτυο εκπαιδευμένο και επικυρωμένο με χρήση της T_{in} , της T_{out} , της ηλιακής ακτινοβολίας R και της εξωτερικής σχετικής υγρασίας RH_{out} ως δεδομένα εισόδου. Τέλος, γίνεται η παραδοχή ότι η ηλιακή ακτινοβολία δεν επηρεάζεται από την κατασκευή του θερμοκηπίου.

2.4 Στατιστική ανάλυση

Η αξιολόγηση του βαθμονομημένου μοντέλου SALTMED πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή των τριών στατιστικών δεικτών στην παρατηρούμενη και προσομοιωμένη εδαφική υγρασία. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 υπολογίζεται ως το τετράγωνο του συντελεστή συσχέτισης R (Εξίσωση 2.26-27) και εκφράζει το βαθμό που η μεταβλητότητα της εξαρτημένης οφείλεται στην ανεξάρτητη μεταβλητή. Λαμβάνει τιμές στο εύρος 0 με 1, με το άνω όριο να υποδεικνύει άριστη συσχέτιση.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(y_{obs} - \bar{y}_{obs})(y_{sim} - \bar{y}_{sim})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{obs} - \bar{y}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (y_{sim} - \bar{y}_{sim})^2}} \quad (2.26)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n [(y_{obs} - \bar{y}_{obs})(y_{sim} - \bar{y}_{sim})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{obs} - \bar{y}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (y_{sim} - \bar{y}_{sim})^2}} \right]^2 \quad (2.27)$$

Ο δείκτης Root Mean Square Error (RMSE) προσδιορίζει την τυπική απόκλιση των διαφορών μεταξύ των παρατηρούμενων και των προσομοιωμένων τιμών μιας παραμέτρου (Εξίσωση 2.28). Ο RMSE διατηρεί τις μονάδες της εξεταζόμενης παραμέτρου και έχει φυσικό νόημα. Μικρές τιμές του δείκτη υποδηλώνουν επιτυχημένη προσομοίωση της παραμέτρου.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{obs} - y_{sim})^2}{n}} \quad (2.28)$$

Ο δείκτης Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) υπολογίζεται από την **Εξίσωση 2.29** και αξιολογεί την προγνωστική δύναμη του μοντέλου. Λαμβάνει τιμές από $-\infty$ έως 1, με τιμές > 0.80 να υποδηλώνουν άριστη προγνωστική δύναμη.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{obs} - y_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{obs} - \bar{y}_{obs})^2} \quad (2.29)$$

Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη γλώσσα προγραμματισμού R (R Core Team 2014). Η γραμμική παλινδρόμηση πραγματοποιήθηκε με την εντολή *lm()*, ενώ ο προσδιορισμός του RMSE και του NSE με τις εντολές *rmse()* και *NSE()* της βιβλιοθήκης *hydroGOF*, αντίστοιχα. Τα διαγράμματα διασποράς, ραβδογράμματα και θηκογράμματα που παρουσιάζονται στην εργασία δημιουργήθηκαν με χρήση της βιβλιοθήκης *ggplot2*.

3 Περιοχή μελέτης

Περιοχή μελέτης της παρούσας έρευνας αποτελεί το Τυμπάκι, Ηρακλείου που βρίσκεται στα Νότια παράλια της κεντρικής Κρήτης και καλύπτει έκταση ίση με 157,122 km². Στο Τυμπάκι λαμβάνει χώρα έντονη αγροτική δραστηριότητα με εξέχουσα την παρουσία θερμοκηπιακών μονάδων που ξεπερνούν τα 3,580 ha σε έκταση (Paritsis 2005). Κυρίαρχα καλλιεργούμενα είδη είναι η τομάτα (*Solanum lycopersicum*), το αγγούρι (*Cucumis sativus*), το κολοκύθι (*Cucurbita pepo*), η μελιτζάνα (*Solanum melongena*) και η πιπεριά (*Capsicum annuum*) (Thanopoulos et al. 2008). Οι μεγάλες απαιτήσεις σε αρδευτικό νερό ικανοποιούνται κατά κύριο λόγο από τα υπόγεια ύδατα. Εξαιτίας της υπεράντλησης και της ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα και της επακόλουθης διεύθυνσης του πόδα υφαλμύρισης προς την ενδοχώρα, τα υπόγεια ύδατα έχουν υποστεί ποιοτική υποβάθμιση (Vafidis et al. 2013).

3.1 Πειραματική διάταξη Πολυτεχνείου Κρήτης

Προκειμένου να αποφευχθούν αλλοιώσεις στην παραγωγή τομάτας εξαιτίας μη ορθών καλλιεργητικών πρακτικών που συχνά εφαρμόζονται από τους τοπικούς καλλιεργητές της περιοχής μελέτης, όπως υπεράρδευση, υπερλίπανση και εκτεταμένη χρήση χημικών φυτοφαρμάκων, ένα πείραμα καλλιέργειας τομάτας μικρής κλίμακας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε στις θερμοκηπιακές μονάδες του Πολυτεχνείου Κρήτης με γεωγραφικές συντεταγμένες 35°32'00.2''N 24°04'12.4''E. Το πείραμα τέθηκε σε λειτουργία στις 21 Οκτωβρίου 2015 με τη μεταφύτευση 10 σποριόφυτων τομάτας (*Solanum lycopersicum* L. cv *Elpida*) σε γλάστρες 30 L και ολοκληρώθηκε στις 14 Απριλίου 2016 όπου η βλάστηση απομακρύνθηκε για περεταίρω αναλύσεις.

Το εδαφικό υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη των σποριόφυτων προέρχονταν από την περιοχή μελέτης και αποτελεί τυπικό χώμα θερμοκηπιακής χρήσης. Τα βασικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους παρατίθενται στον **Πίνακα 3.1**. Η αρχική τιμή της EC_{se}, ίση με 24.70 και 16.70 dS m⁻¹ για το βάθος των 0-5 και 5-10 cm, αντίστοιχα, είναι ιδιαίτερα υψηλή και υποδηλώνει έδαφος που μπορεί να χαρακτηριστεί ως αλατούχο. Ωστόσο, η συγκέντρωση του Na, που ισούται με 54.38 και 15.16 mg g⁻¹ για το βάθος των 0-5 και 5-10 cm αντίστοιχα, είναι ιδιαίτερα χαμηλή σε σύγκριση με τις συγκεντρώσεις των μετάλλων Ca, Mg και K που λαμβάνουν τιμές μεγαλύτερες από 353, 32 και 72 mg g⁻¹, αντίστοιχα. Επομένως, η υψηλή τιμή της EC δικαιολογείται από την έντονη παρουσία θρεπτικών μετάλλων και όχι σε επιβλαβές Na. Οι τιμές SAR επιβεβαιώνουν την υπόθεση αυτή, παίρνοντας τιμές 0.60 και 0.23 για τα δυο βάθη, αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1: Βασικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τυπικού εδαφικού υποστρώματος θερμοκηπιακής χρήσης στην περιοχή μελέτης.

Υφή	Βάθος 0-20 cm	
Ιλιοαργιλώδες (Clay loam)	24% άμμο	
	45% ιλύ	
	31% άργιλο	
Χημικές ιδιότητες	Βάθος 0-5 cm	Βάθος 5-10 cm
Ολικός Οργανικός Άνθρακας, TOC (mg g ⁻¹)	11.67	13.28
Ολικό Άζωτο, TN (mg g ⁻¹)	1.18	1.25
Ολικός Φώσφορος, TP (mg g ⁻¹)	1.84	2.03
Νάτριο, Na (mg L ⁻¹)	54.38	15.61
Ασβέστιο, Ca (mg L ⁻¹)	461.05	353.41
Μαγνήσιο, Mg (mg L ⁻¹)	62.67	32.20
Κάλιο, K (mg L ⁻¹)	111.18	72.80
EC _{se} (dS m ⁻¹)	24.70	16.70
SAR	0.60	0.23
pH	7.60	7.60

Ο σχεδιασμός του πειράματος περιλάμβανε την καθημερινή στάγδην άρδευση των 10 φυτών με 1.5 L d⁻¹ στο χρονικό διάστημα 16:30 με 18:30 και τη χημική λίπανσή τους μέσω της άρδευσης δυο φορές την εβδομάδα, σύμφωνα με τον **Πίνακας 3.2**. Για τη διερεύνηση της επίπτωσης της ποιότητας του ύδατος άρδευσης στην καλλιέργεια της τομάτας και την ποιότητα του εδάφους πραγματοποιήθηκε διάκριση των φυτών σε δυο μεταχειρίσεις. Στην πρώτη μεταχείριση, που ονομάστηκε LS (Low Salinity), η εφαρμοζόμενη άρδευση χαρακτηρίζονταν από EC_w ίση με 1.1 dS m⁻¹, ενώ στη δεύτερη, που ονομάστηκε MS (Medium Salinity), από EC_w ίση με 3.5 dS m⁻¹. Το σύστημα άρδευσης αποτελείται από δυο βαρέλια των 80 L, δυο υποβρύχιες αντλίες και το σύστημα σωληνώσεων διανομής άρδευσης. Κάθε μεταχείριση εφαρμόστηκε σε 5 φυτά τομάτας ώστε να εξεταστεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

Πίνακας 3.2: Ποσότητες χημικών λιπασμάτων (g) ανά 15 L για τις δυο περιόδους υδρολίπανσης που εφαρμόστηκαν κατά την εξέλιξη του πειράματος.

Περίοδος υδρολίπανσης	Ποσότητα λιπάσματος (g) ανά 15 L			
	Νιτρικό κάλιο	Νιτρικό ασβέστιο	Μονοφωσφορικό κάλιο	Νιτρικό μαγνήσιο
21-10 με 20-11-2015	5.0	2.5	2.5	-
21-11-2015 με 14-04-2016	10.0	5.0	2.5	1.3

Το κλάδεμα των φυτών πραγματοποιούνταν με στόχο την ύπαρξη ενός μόνο κορμού, μέθοδος που συμφωνεί τόσο με τις εφαρμοζόμενες πρακτικές της περιοχής μελέτης όσο και με τη βιβλιογραφία

(Snyder 2007; Amundson et al. 2012). Ωστόσο, αύξηση της παραγωγής έχει διαπιστωθεί ερευνητικά με την πρακτική των διστέλεχων φυτών τομάτας (Amundson et al. 2012). Επιπλέον, τα φυτά δέχτηκαν κλάδεμα στην άκρη του βλαστού όταν έφτασαν τα 2 m, για λόγους χωρικής άνεσης στις εγκαταστάσεις του ΠΚ. Σημειώνεται ότι στην περιοχή μελέτης τα φυτά συχνά ξεπερνούν τα 3 m σε μήκος μέσα από αλλαγές στην κατεύθυνση ανάπτυξης τους στον κατακόρυφο άξονα. Η πυκνότητα φύτευσης κυμαίνεται στο εύρος 25,000 με 33,000 φυτά ha^{-1} σύμφωνα με τον (Steduto et al. 2012), ενώ στην περιοχή μελέτης οι εφαρμοζόμενες πυκνότητες βρίσκονται στο κάτω όριο του βιβλιογραφικού εύρους. Για την έκφραση της πειραματικής παραγωγής από kg φυτό $^{-1}$ σε t ha^{-1} , ως πυκνότητα φύτευση θεωρήθηκαν τα 25,000 φυτά ha^{-1} .

Το ριζικό σύστημα της τομάτας στον αγρό αναπτύσσετε μέχρι το 1.5 m (Battilani et al. 2002), με την πρόσληψη νερού και θρεπτικών να πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο στο εύρος 0.20 με 0.75 m, όπου βρίσκεται το 50-80% της ριζικής μάζας (Steduto et al. 2012). Οι κυλινδρικές γλάστρες της πειραματικής διάταξης είχαν βάθος ίσο με 0.25 cm και ακτίνα ίση με 0.15 cm περιορίζοντας και επηρεάζοντας σε μεγάλο βαθμό την αρχιτεκτονική της ανάπτυξης του ριζικού συστήματος. Ωστόσο, πολλές μελέτες που διερευνούν την απόκριση του φυτού της τομάτας στην αλατότητα βασίζονται σε πειράματα γλάστρας σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Scholberg & Locascio 1999; Reina-Sánchez et al. 2005; Psarras et al. 2008).

Κατά τη διάρκεια του πειράματος πραγματοποιήθηκαν τέσσερις εδαφικές δειγματοληψίες για τον προσδιορισμό της EC_{se} και των κατιόντων Na, Ca, Mg και K. Από τις συγκεντρώσεις των μετάλλων προσδιορίστηκε και ο δείκτης SAR, βάση της **Εξίσωσης (2.24)**. Επιπρόσθετα, παρατηρούνταν η εδαφική υγρασία σε δύο βάθη, 5 και 20 cm, σε βήμα 15 min με τους αισθητήρες EC-5 ECH₂O της εταιρίας Decagon και οι κλιματικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας στο εσωτερικό χώρο και εξωτερικά του θερμοκηπίου.

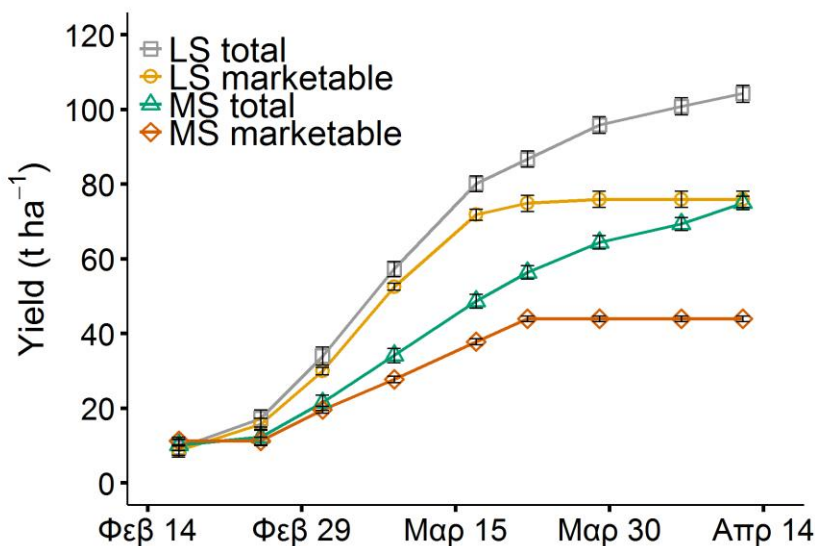
3.2 Αποτελέσματα πειραματικής διάταξης

Οι επιδράσεις των μεταχειρίσεων στην ποιότητα του εδάφους και την ποσοτική και ποιοτική κατάσταση της παραγωγής της καλλιέργειας έχουν αναλυθεί σε βάθος σε προηγούμενες διατριβές (Βάγκνερ & Τσάνης 2016; Δεληγιάννη & Τσάνης 2016; Κουτσκοιδής & Τσάνης 2016). Στην συνέχεια παρατίθενται συνοπτικά ορισμένα βασικά πειραματικά αποτελέσματα που αποτελούν είσοδο ή κριτήριο αξιοπιστίας κατά την μοντελοποίηση του καλλιεργητικού συστήματος.

3.2.1 Ύψος παραγωγή

Στην **Εικόνα 3.1** απεικονίζεται η ολική και η εμπορεύσιμη παραγωγή τομάτας της πειραματικής διάταξης του ΠΚ. Η μεταχείριση χαμηλής αλατότητα LS απέδωσε 105 t ha^{-1} και η μέσης

αλατότητας $MS\ 75\ t\ ha^{-1}$, παρουσιάζοντας μια μεταβολή ίση με 28.5% εξαιτίας της επιβαρυνμένης ποιότητας αρδευτικού νερού. Αναφορικά με την εμπορεύσιμη παραγωγή αυτή διαμορφώθηκε στους 76 και $44\ t\ ha^{-1}$ για την LS και MS μεταχείριση, αντίστοιχα, αποδίδοντας μια μεταβολή ίση με 42.1%. Αξίζει να σημειωθεί, επιπλέον, ότι η επίδραση της αλατότητας αύξησε το χάσμα μεταξύ ολικής και εμπορεύσιμης παραγωγής στην MS συγκριτικά με την LS μεταχείριση, γεγονός που οφείλεται όχι σε ποσοτική διαφορά στην παραγωγή καρπών, αλλά σε παραγωγή καρπών πολύ μικρού μεγέθους.



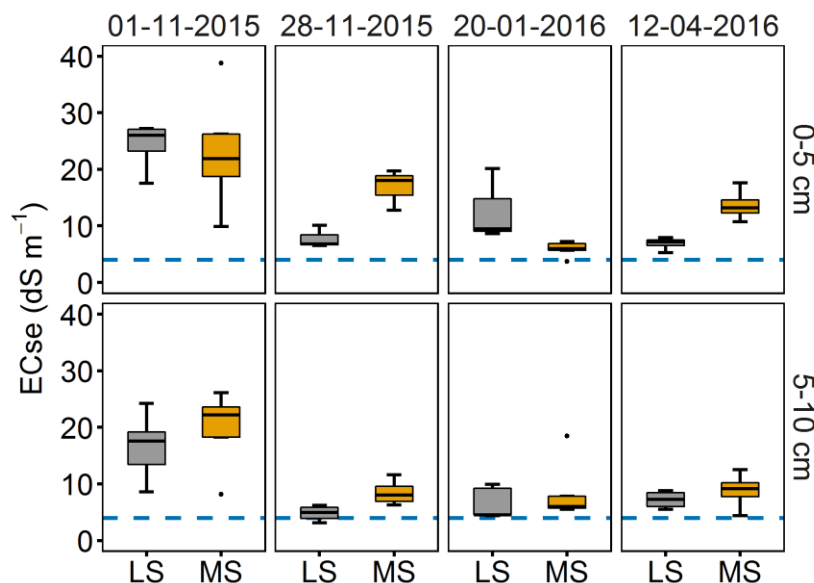
Εικόνα 3.1: Ολική (total) και εμπορεύσιμη (marketable) παραγωγή πειραματικής διάταξης ΠΚ για τις μεταχειρίσεις LS και MS.

Η παραγωγή τομάτας στην περιοχή του Τυμπακίου Κρήτης έχει ως μέση απόδοση την τιμή των $140\ t\ ha^{-1}$, ενώ ως βέλτιστη θεωρείται η τιμή των $180\ t\ ha^{-1}$. Η παραγωγή της πειραματικής διάταξης παρουσίασε σημαντικές διαφορές συγκριτικά με τις αναμενόμενες τιμές της περιοχής μελέτης. Οι διαφορές αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο στο κλάδεμα του βλαστού όταν η καλλιέργεια έφτασε τα 2 m, με αποτέλεσμα να μην αναπτυχθεί ο ίδιος αριθμός σταυρών με αυτόν που αναπτύσσεται από τους καλλιεργητές των οποίων τα φυτά συχνά ξεπερνούν τα 3 m. Επιπλέον, η υδρολίπανση που εφαρμόστηκε στα πλαίσια του πειράματος μπορεί να χαρακτηριστεί ως συντηρητική σε σύγκριση με αυτήν που εφαρμόζεται στην περιοχή μελέτης. Σημειώνεται ότι σκοπός του πειράματος δεν ήταν η επίτευξη της μέγιστης δυνατής παραγωγής, αλλά η διερεύνηση της επίπτωσης υποβαθμισμένης ποιότητας άρδευσης στην παραγωγή τομάτας.

3.2.2 Ποιότητα εδάφους

Η **Εικόνα 3.2** απεικονίζει την εξέλιξη της ECse για τις μεταχειρίσεις LS και MS στα βάθη 0-5 και 5-10 cm, κατά την διάρκεια του πειράματος. Το έδαφος παρουσιάζει υψηλή ECse κατά την έναρξη

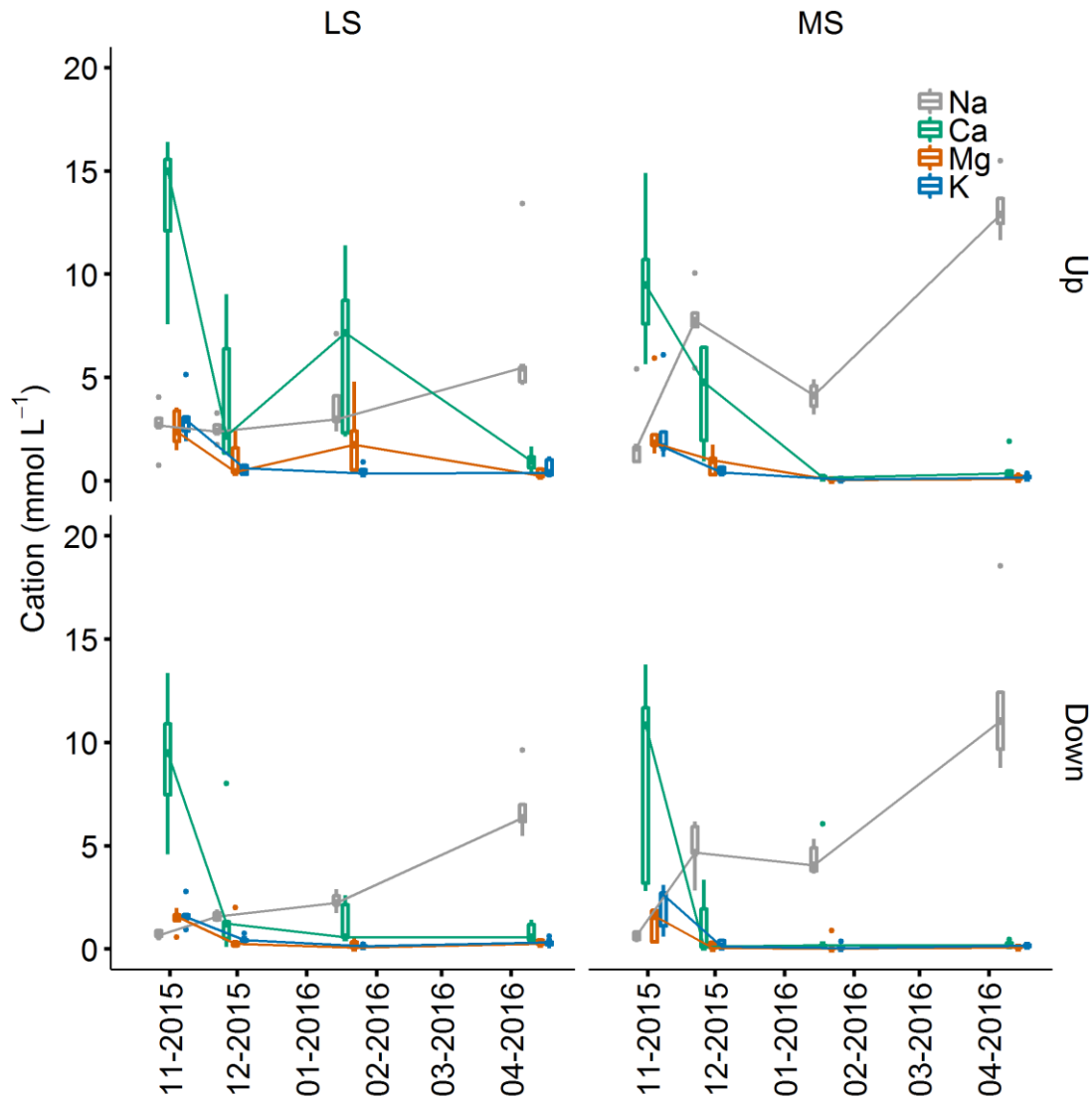
του πειράματος, η οποία οφείλεται στην παρουσία υψηλής συγκέντρωσης Ca, Mg και K, ενώ η παρουσία του Na είναι περιορισμένη. Στη συνέχεια, η ECse φθίνει και στο τέλος του πειράματος η μεταχείριση λαμβάνει τιμές στο εύρος 6.9-7.9 και 4.4-12.5 dS m⁻¹ για τα δυο βάθη αντίστοιχα, ενώ η μεταχείριση MS παρουσιάζει εύρος 10.7-17.6 και 4.5-12.5 dS m⁻¹ για τα δυο βάθη, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι έκτοπες τιμές.



Εικόνα 3.2: Εδαφική ECse για τις μεταχειρίσεις χαμηλής (LS) και μέσης (MS) ποιότητας άρδευσης σε βάθος 0-5 και 5-10 cm κατά την εξέλιξη του πειράματος. Η οριζόντια διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί σε 4.0 dS m⁻¹ πάνω από την οποία ένα έδαφος χαρακτηρίζεται ως αλατούχο.

Η **Εικόνα 3.3** παρουσιάζει τη συγκέντρωση των κατιόντων Na, Ca, Mg και K κατά την εξέλιξη του πειράματος για τις δύο εξεταζόμενες μεταχειρίσεις άρδευσης LS και MS για τα βάθη 0-5 και 5-10 cm. Στην έναρξη του πειράματος σημειώνονται υψηλές συγκεντρώσεις Ca, Mg και K με μέση τιμή 10.2, 1.9 και 2.3 mmol L⁻¹, ενώ η συγκέντρωση του Na είναι ιδιαίτερα χαμηλή με μέση τιμή 1.5 mmol L⁻¹. Η άρδευση με νερό υποβαθμισμένης ποιότητας λόγω προσθήκης NaCl (ώστε να προσομοιώσει την υφαλμύριση των υπογείων υδάτων) είχε ως αποτέλεσμα την απώλεια των κατιόντων Ca, Mg και K λόγω στράγγισης και τη συσσώρευση Na. Κατά την ολοκλήρωση του πειράματος και οι δύο μεταχειρίσεις σημείωσαν τιμές Na πολύ υψηλότερες από τις αρχικές. Πιο συγκεκριμένα, η μεταχείριση MS παρουσίασε μέση τιμή συγκέντρωσης Na ίση με 15 mmol L⁻¹, η οποία είναι πολύ υψηλότερη από την τιμή της μεταχείρισης LS 6.8 mmol L⁻¹. Σημειώνεται ότι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Na παρατηρήθηκαν στα πρώτα 0-5 cm και για τις δυο μεταχειρίσεις, γεγονός που ενδεχομένως να οφείλεται στην εξάτμιση της υγρασίας των πρώτων εκατοστών του εδάφους. Τα κατιόντα Ca, Mg και K έλαβαν τελικές μέσες τιμές < 1 mmol L⁻¹ και για τις δυο

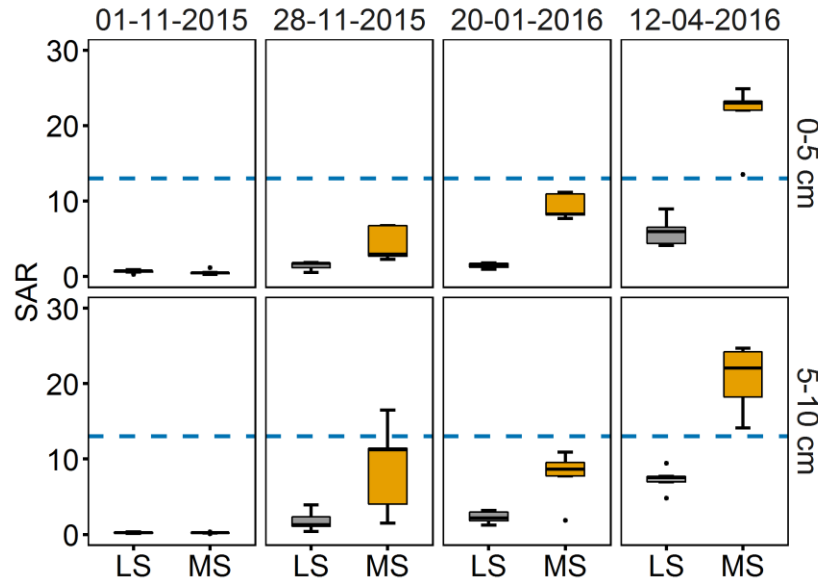
μεταχειρίσεις άρδευσης, με την μεταχείριση LS να παρουσιάζει ελαφρώς υψηλότερες τιμές σε σύγκριση με την MS.



Εικόνα 3.3: Συγκέντρωση κατιόντων Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ και K⁺ για τις μεταχειρίσεις χαμηλής (LS) και μέσης (MS) ποιότητας άρδευσης σε βάθος 0-5 και 5-10 cm κατά την εξέλιξη του πειράματος.

Στην **Εικόνα 3.4** παρουσιάζεται ο δείκτης SAR που περιγράφει την κανονικοποιημένη παρουσία του Na, λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία των Ca και Mg, για τις μεταχειρίσεις LS και MS στα βάθη 0-5 και 5-10 cm, κατά την εξέλιξη του πειράματος. Ο δείκτης SAR αρχικά λαμβάνει τιμές στο εύρος 0.25-0.92 και 0.09-0.36 για τα δυο βάθη, υποδηλώνοντας χαμηλή συμμετοχή του Na στη συνολική αλατότητα, ενώ στην συνέχεια αυξήθηκε. Η αύξηση του δείκτη SAR σε συνδυασμό με την πτώση του ECse υποδεικνύει την απώλεια των θρεπτικών Ca και Mg και τη συσσώρευση Na εξαιτίας της άρδευσης. Στη δειγματοληψία του Απριλίου η μεταχείριση LS παρουσίασε τιμές

SAR στο εύρος 4.09-8.95 και 6.90-7.73 για τα δυο βάθη παραμένοντας παρά την σημαντική αύξηση κάτω από την τιμή 13.0, όριο που χαρακτηρίζει τα νατριωμένα εδάφη. Αντίθετα, η μεταχείριση MS παρουσίασε τιμές στο εύρος 22.04-24.90 και 14.10-24.67 για τα βάθη 0-5 και 5-10 cm, χαρακτηρίζοντας το έδαφος ως αλατούχο-νατριωμένο και αυξάνοντας την ακαταλληλότητα του για γεωργική χρήση.

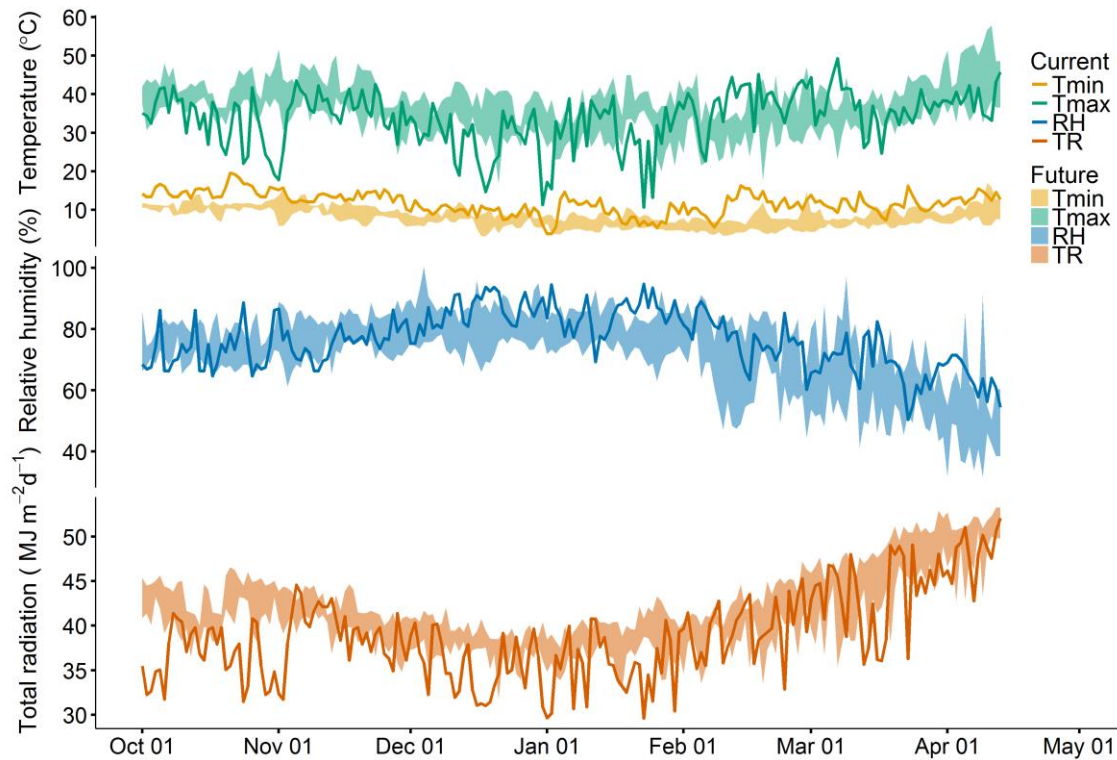


Εικόνα 3.4: Δείκτης SAR για τις μεταχειρίσεις χαμηλής (LS) και μέσης (MS) ποιότητας άρδευσης σε βάθος 0-5 και 5-10 cm κατά την εξέλιξη του πειράματος. Η οριζόντια διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί σε οριακή τιμή SAR 13.0 πάνω από την οποία ένα έδαφος χαρακτηρίζεται ως νατριούχο.

3.2.3 Κλιματικά δεδομένα

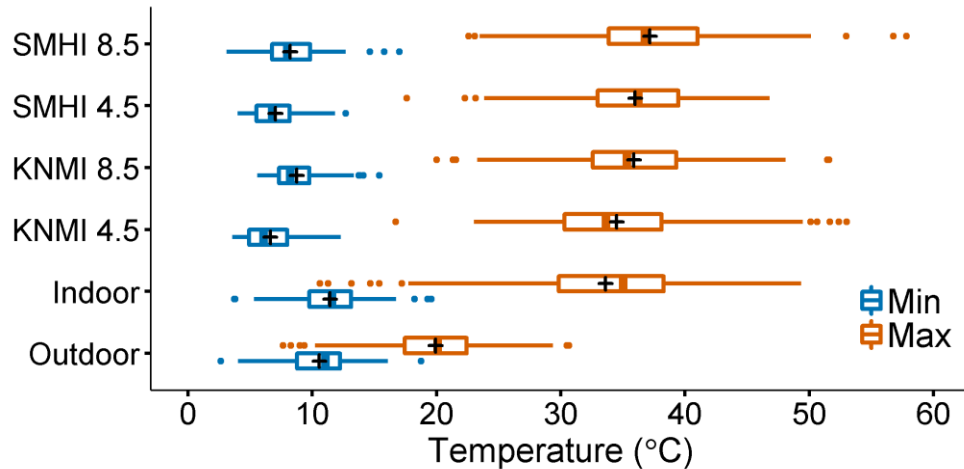
Στην **Εικόνα 3.5** παρουσιάζονται οι παρατηρούμενες κλιματικές συνθήκες σε ημερήσιο βήμα εντός του θερμοκηπίου κατά την εξέλιξη του πειράματος και οι κλιματικές συνθήκες των εξεταζόμενων σεναρίων κλιματικής αλλαγής. Πιο συγκεκριμένα, απεικονίζεται η ελάχιστη (minimum Temperature, Tmin) και μέγιστη (maximum Temperature, Tmax) θερμοκρασία, η σχετική υγρασία (Relative Humidity, RH) και η ολική εισερχόμενη ακτινοβολία (Total Radiation, TR). Παρατηρείται ότι η ελάχιστη θερμοκρασία παρουσιάζει πιο σταθερή συμπεριφορά, τόσο στην υπάρχουσα όσο και την μελλοντική κατάσταση, ενώ αντίθετα η μέγιστη θερμοκρασία παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις και μεγάλο εύρος τιμών και αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά στο μέλλον ιδιαίτερα μετά το μέσο της Άνοιξης. Η σχετική υγρασία κατά την υπάρχουσα κατάσταση παρουσίασε αύξηση τους χειμερινούς μήνες λόγω του μειωμένου αερισμού και στη συνέχεια φθίνουσα πορεία αφού αερισμός λαμβάνει χώρα καθημερινά. Επιπλέον, προβλέπεται ελάττωση της σχετικής υγρασίας στο μέλλον παρατήρηση που μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του δυναμικού εξατμισοδιαπνοής από την καλλιέργεια. Τέλος, η ολική ακτινοβολία παρουσιάζει μικρότερες τιμές

κατά τους χειμερινούς μήνες σε σχέση με τους καλοκαιρινούς, ενώ στο μέλλον αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά.



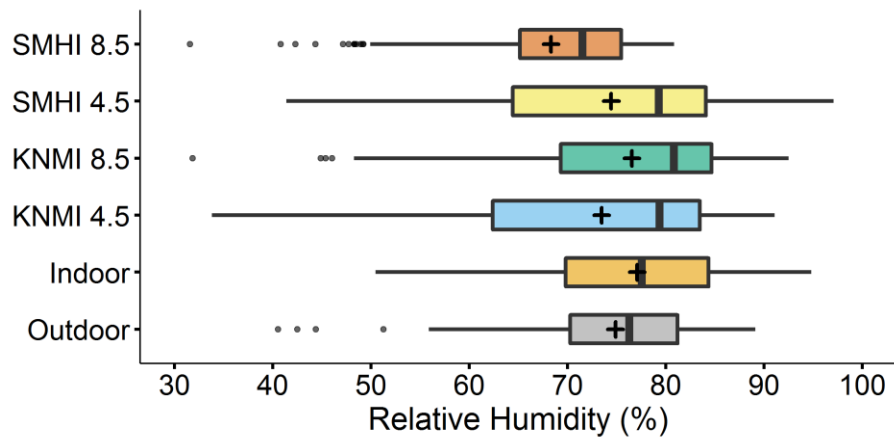
Εικόνα 3.5: Σχετική υγρασία (RH), ελάχιστη (Tmin) και μέγιστη (Tmax) θερμοκρασία και ολική ακτινοβολία (TR) θερμοκηπιακής εγκατάστασης ΠΚ σε ημερήσιο βήμα για την υπάρχουσα κατάσταση (line plots) και τα σενάρια κλιματικής αλλαγής (area plots) κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου.

Στην **Εικόνα 3.6** παρουσιάζεται η κατανομή της μέγιστης και ελάχιστης ημερήσιας θερμοκρασίας για τα εξεταζόμενα κλιματικά σενάρια, που αποτελεί είσοδο για το μοντέλο SALTMED (**Κεφάλαιο 2.1.5**). Η μέση ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος για την καλλιεργητική περίοδο στην υπάρχουσα κατάσταση είναι 10.5 °C και η μέση μέγιστη 19.9 °C, ενώ στο εσωτερικό του θερμοκηπίου οι αντίστοιχες τιμές είναι 11.4 και 33.6 °C. Παρατηρείται ότι η επίδραση του θερμοκηπίου είναι πιο έντονη στο άνω όριο του θερμοκρασιακού εύρους, ενώ το κάτω όριο -που επιτυγχάνεται τις νυχτερινές ώρες- δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα. Τα μελλοντικά κλιματικά σενάρια παρουσιάζουν αυξημένη μέση μέγιστη και μειωμένη μέση ελάχιστη θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα, στο μέλλον μέση ελάχιστη θερμοκρασία προβλέπεται να είναι μικρότερη της υπάρχουσας κατά 2.7 με 4.8 °C, ενώ η μέση μέγιστη θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη κατά 0.9 με 3.5 °C. Το πιο ήπιο σενάριο κλιματικής αλλαγής είναι το KNMI 4.5 και το πιο έντονο είναι το SMHI 8.5, ενώ τα KNMI 8.5 και SMHI 4.5 βρίσκονται ενδιάμεσα.

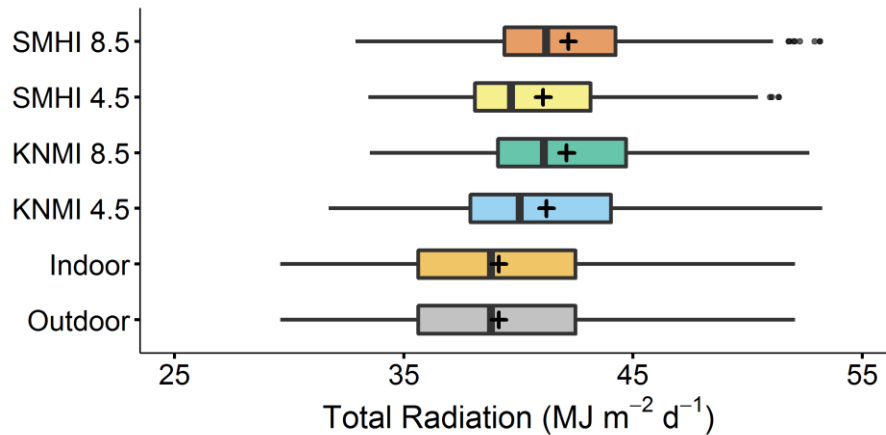


Εικόνα 3.6: Κατανομή ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας για την υπάρχουσα εξωτερική και εσωτερική κατάσταση και τα εξεταζόμενα μελλοντικά σενάρια για το εσωτερικό του θερμοκηπίου για την περίοδο Οκτωβρίου-Απριλίου. Ο σταυρός συμβολίζει τον απλό μέσο όρο της κατανομής για κάθε κατάσταση.

Στην **Εικόνα 3.7** και **Εικόνα 3.8** απεικονίζεται η κατανομή της σχετικής υγρασίας και της ολικής ακτινοβολίας, αντίστοιχα, για την υπάρχουσα κατάσταση και τα μελλοντικά κλιματικά σενάρια. Κατά την εξέλιξη του πειράματος, η σχετική υγρασία στο περιβάλλον παρουσίασε μέση τιμή ίση με 74.8%, ενώ στο εσωτερικό του θερμοκηπίου 77.1%. Τα μελλοντικά σενάρια προβλέπουν πτώση της μέσης σχετικής υγρασίας στις τιμές 73.4, 76.5, 74.6 και 68.3% για τα σενάρια KNMI 4.5, KNMI 8.5, SMHI 4.5 και SMHI 8.5, αντίστοιχα. Η ολική ακτινοβολία δεν επηρεάζεται από την κατασκευή του θερμοκηπίου και λαμβάνει την τιμή $39.1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ για την υπάρχουσα κατάσταση, ενώ τα σενάρια κλιματικής αλλαγής προβλέπουν σημαντικές αυξήσεις. Πιο συγκεκριμένα, η ολική ακτινοβολία προβλέπεται να αυξηθεί από 1.9 έως $3.0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.



Εικόνα 3.7: Κατανομή σχετικής υγρασίας για την υπάρχουσα εξωτερική και εσωτερική κατάσταση και τα εξεταζόμενα μελλοντικά σενάρια για το εσωτερικό του θερμοκηπίου για την περίοδο Οκτωβρίου-Απριλίου. Ο σταυρός συμβολίζει τον απλό μέσο όρο της κατανομής για κάθε κατάσταση.



Εικόνα 3.8: Κατανομή ολικής ηλιακής ακτινοβολίας για την υπάρχουσα εξωτερική και εσωτερική κατάσταση και τα εξεταζόμενα μελλοντικά σενάρια για το εσωτερικό του θερμοκηπίου για την περίοδο Οκτωβρίου-Απριλίου. Ο σταυρός συμβολίζει τον απλό μέσο όρο της κατανομής για κάθε κατάσταση.

3.3 Χρήση μοντέλου SALTMED

3.3.1 Παραμετροποίηση καλλιέργειας τομάτας

Κατά την εκπόνηση του πειράματος καταγράφονταν τα βασικά χαρακτηριστικά της βλάστησης, όπως η διάρκεια των σταδίων ανάπτυξης, ύψος φυτού, αριθμός φύλλων και απόδοση παραγωγής. Ωστόσο, το μοντέλο SALTMED απαιτεί επιπλέον χαρακτηριστικά όπως οι δείκτες K_c , K_{cb} και LAI για κάθε στάδιο ανάπτυξης, τα οποία πάρθηκαν από τη βάση δεδομένων του μοντέλου και διασταυρώθηκαν ή διορθώθηκαν βάσει της εργασίας των Allen et al. (1989), ώστε να αντιστοιχούν σε θερμοκηπιακή καλλιέργεια. Οι βαθμοήμερες των σταδίων ανάπτυξης υπολογίστηκαν ως το άθροισμα του υπολοίπου της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία βάσης. Η μέση ημερήσια θερμοκρασία υπολογίστηκε από την ελάχιστη και μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία, ενώ ως θερμοκρασία βάσης επιλέχθηκαν οι 8 °C. Οι φυτικοί παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της καλλιέργειας παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.3**.

Όπως αναφέρεται στο **Κεφάλαιο 3.2.1**, το ύψος της παραγωγής αναφοράς, δηλαδή της αρδευτικής μεταχείρισης LS, ήταν 105 t ha⁻¹, ενώ η μεταχείριση MS απέδωσε 75 t ha⁻¹ (**Εικόνα 3.1**). Ως μέγιστη δυνατή παραγωγή θεωρήθηκε αυτή της μεταχείρισης LS, δηλαδή $Y_{max} = 105 \text{ t ha}^{-1}$ (unstressed yield). Η απόκριση του φυτού στην ποιότητα άρδευσης βαθμονομήθηκε μέσω του παράγοντα π_{50} (**Πίνακας 3.3**), έτσι ώστε η τελική προσομοιωμένη απόδοση να συμπίπτει με την παρατηρούμενη για κάθε αρδευτική μεταχείριση. Η αύξηση του παράγοντα π_{50} κατά τη διαδοχή των σταδίων υποδηλώνει την αύξηση της ανθεκτικότητας των φυτών στην αλατότητα (**Κεφάλαιο 1.2**). Το βαθμονομημένο μοντέλο SALTMED προσομοίωσε με μεγάλη ακρίβεια την

παρατηρούμενη παραγωγή τομάτας (**Εικόνα 3.1**) προβλέποντας παραγωγή ίση με 105.0 και 74.9 t ha⁻¹ για τις μεταχειρίσεις άρδευσης LS και MS, αντίστοιχα.

Πίνακας 3.3: Τιμές φυτικών παραμέτρων ανά στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας για το μοντέλο SALTMED. Η διάρκεια, οι βαθμομέρες και το ύψος προέρχονται από παρατηρήσεις κατά την εκτέλεση του πειράματος, οι συντελεστές Kc, Kcb και ο δείκτης LAI βασίστηκαν στη βάση δεδομένων του SALTMED και την εργασία των Allen et al. (1989), ενώ η παράμετρος π_{50} προσδιορίστηκε μέσω βαθμονόμησης.

Στάδιο ανάπτυξης	Διάρκεια (d)	Βαθμομέρες (°C)	Συντελεστής Kc	Συντελεστής Kcb	h (m)	LAI	π_{50} (dS m ⁻¹)
Βλάστηση	30	368	-	-	-	-	-
Αρχικό	20	350	0.70	0.40	0.6	0.5	3.5
Ανάπτυξης	45	888	1.20	1.15	1.8	3.0	3.7
Μεσαίο	80	1418	0.90	0.85	2.0	2.0	4.1
Τελικό	20	430					

3.3.2 Παραμετροποίηση εδάφους

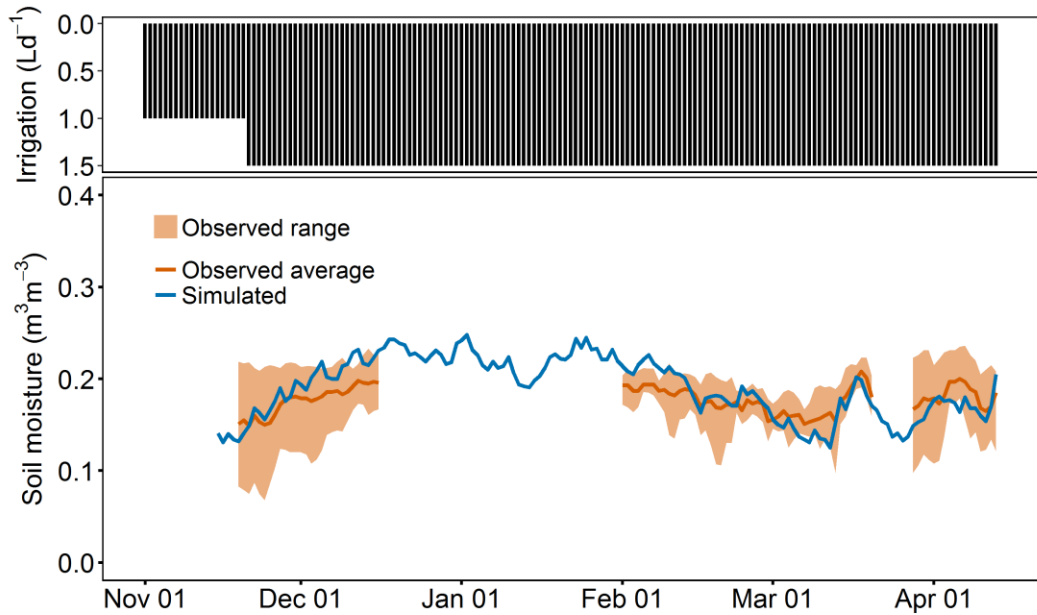
Το μοντέλο SALTMED επιλύει τις μαθηματικές εξισώσεις ροής υδάτων και μεταφοράς των διαλυμένων ουσιών με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (Ragab 2013). Για την στάγδην άρδευση το υπέδαφος μπορεί να θεωρηθεί ως ένας κύλινδρος και οι εξισώσεις αρκεί να λυθούν για μια ακτινική διεύθυνση και να κατοπτριστούν στις υπόλοιπες. Οι γλάστρες της πειραματικής διάταξης είχαν ακτίνα 0.15 m και βάθος 0.25 m. Επιλέχθηκε να σχηματιστεί κάβναβος με τετράγωνα στοιχεία πλευράς 0.025 m και με αριθμό διαμερισμάτων στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση ίσο με 6 και 10, αντίστοιχα. Το χρονικό βήμα της επίλυσης λάμβανε ως ελάχιστη τιμή τα 25 s και ως μέγιστη τα 300 s, σύμφωνα με τις υποδείξεις του εγχειριδίου του μοντέλου SALTMED.

Το μοντέλο SALTMED διαθέτει μια εκτενή βάση δεδομένων για τα εδάφη και τις υδραυλικές τους παραμέτρους (Ragab 2015). Με δεδομένο ότι το έδαφος της πειραματικής διάταξης ήταν ιλιοαργιλώδες (**Πίνακας 3.1**), η βαθμονόμηση της υδραυλικής συμπεριφοράς επιτεύχθηκε με κριτήριο την προσομοίωση της εδαφικής υγρασίας μέσα από δοκιμές τιμών για τις κύριες υδραυλικές παραμέτρους. Κατά τις δοκιμές αυτές, οι τιμές που χρησιμοποιούνταν βρίσκονταν εντός του προτεινόμενου εύρους τιμών της βάσης δεδομένων του μοντέλου και της διεθνούς βιβλιογραφίας (**Πίνακας 3.4**). Η βαθμονόμηση και επικύρωση της προσομοίωσης της εδαφικής υγρασίας είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχημένη εφαρμογή του μοντέλου, καθώς από αυτήν εξαρτάται η μεταφορά των διαλυμένων ουσιών (δηλαδή των αλάτων) και επομένως και η έκθεση του φυτού στην αλατότητα. Για το λόγο αυτό, η επιτυχημένη προσομοίωση της εδαφικής υγρασίας αποτελεί το πρώτο και πλέον σημαντικό βήμα της βαθμονόμησης του μοντέλου.

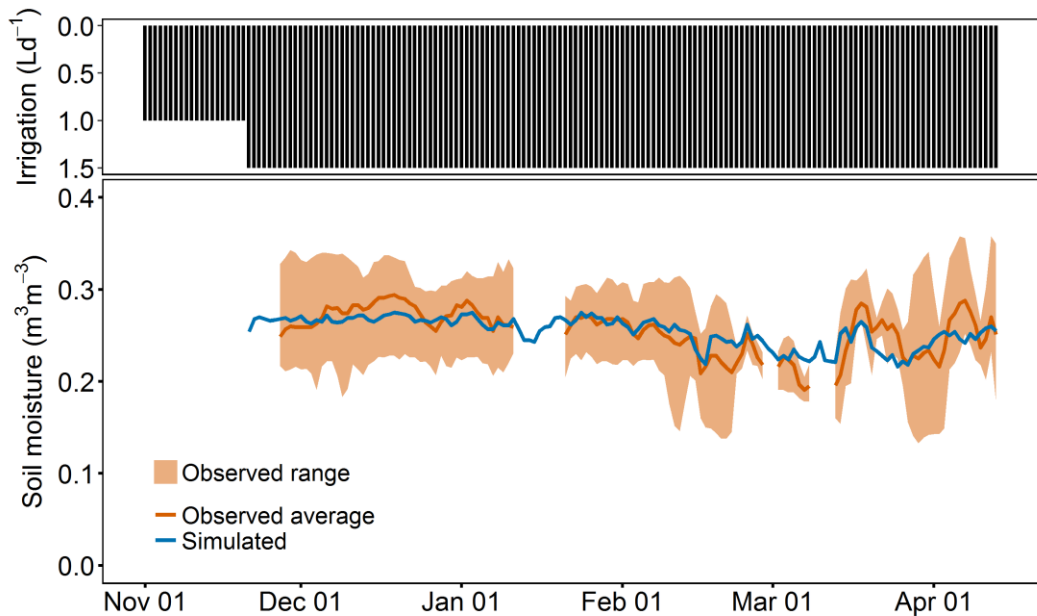
Πίνακας 3.4: Υδραυλικές παράμετροι εδάφους του SALTMED, προτεινόμενο βιβλιογραφικό εύρος για ιλοαργιλώδη εδάφη και επιλεγμένη τιμή κατά τη βαθμονόμηση. Πηγή εύρους: a. Βάση δεδομένων SALTMED, b. United States Department of Agriculture (<https://www.nrcs.usda.gov>), c. Environmental Science Division (<http://www.evs.anl.gov/>) και d. FAO (2007).

Υδραυλική παράμετρος	Προτεινόμενο εύρος	Επιλεγμένη τιμή
Πορώδες ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) Porosity, P	0.38-0.55 a	0.38
Υδατοϊκανότητα ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) Field Capacity, FC	0.20-0.39 a	0.20
Σημείο μόνιμης μάρανσης ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) Wilting Point, WP	0.04-0.08 a	0.04
Κατανομή μεγέθους πόρων (-) Pore Size Distribution, PSD	0.09-0.41 a	0.48
Περιεχόμενο υδροσκοπικού ύδατος ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) Residual Water Content, RWC	0.01-0.05 a	0.01
Παράγοντας ριζικού πλάτους (-) Root Width factor, RW	0.75-1.00 a	0.95
Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (cm d^{-1}) Saturated hydraulic conductivity, Ksat	10-1000 a,b,c,d	380
Βάθος εξάτμισης (mm) Evaporation Depth, ED	120 a	120
Bubbling Pressure, BP (cm)	12.5-48.0 a	14

Στην **Εικόνα 3.9** και **Εικόνα 3.10** παρουσιάζεται η παρατηρούμενη μέση εδαφική υγρασία, το παρατηρούμε εύρος και η προσομοιωμένη εδαφική υγρασία για τα βάθη 5 και 20 cm, αντίστοιχα, ενώ παράλληλα απεικονίζεται και η ημερήσια άρδευση. Τα παρατηρούμενα δεδομένα παρουσιάζουν μεγάλο ημερήσιο εύρος τιμών και για τα δυο βάθη, υπογραμμίζοντας τη δυσκολία μελέτης της ακόρεστης ζώνης αλλά και την ετερογενή συμπεριφορά του εδάφους ακόμα και σε πειράματα γλάστρας. Η βαθμονόμηση του μοντέλου επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί με γνώμονα την μέση παρατηρούμενη ημερήσια τιμή εδαφικής υγρασίας για τα δυο βάθη, στον υπολογισμό της οποίας συμπεριλήφθηκαν δεδομένα από όλους τους εφαρμοζόμενους αισθητήρες εδαφικής υγρασίας. Εναλλακτικά, δεδομένα αισθητήρων με υποψία σφάλματος μπορούν να μην ληφθούν υπόψη, ωστόσο στα πλαίσια του συγκεκριμένου πειράματος κρίθηκε ότι δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία για την αφαίρεση κάποιου εκ των αισθητήρων.



Εικόνα 3.9: Ημερήσια ποσότητα άρδευσης για την μεταχείριση LS (πάνω). Παρατηρούμενο εύρος (area) και μέση εδαφική υγρασία και προσομοιωμένη εδαφική υγρασία (lines) για το βάθος των 5 cm κατά την εξέλιξη του πειράματος σε απόσταση 13 cm από την πηγή άρδευσης (κάτω).



Εικόνα 3.10: Ημερήσια ποσότητα άρδευσης για την μεταχείριση LS (πάνω). Παρατηρούμενο εύρος (area) και μέση εδαφική υγρασία και προσομοιωμένη εδαφική υγρασία (lines) για το βάθος των 20 cm κατά την εξέλιξη του πειράματος σε απόσταση 13 cm από την πηγή άρδευσης (κάτω).

Για τον έλεγχο της βαθμονόμησης της υδραυλικής συμπεριφοράς του εδάφους, υπολογίστηκαν ο συντελεστής R^2 , το RMSE και ο δείκτης Nash-Sutcliffe. Εξετάζοντας το σύνολο των δεδομένων SM, ανεξάρτητα από το βάθος προέλευσης όπως οι Zappa & Gurtz (2003), το μοντέλο παρουσίασε

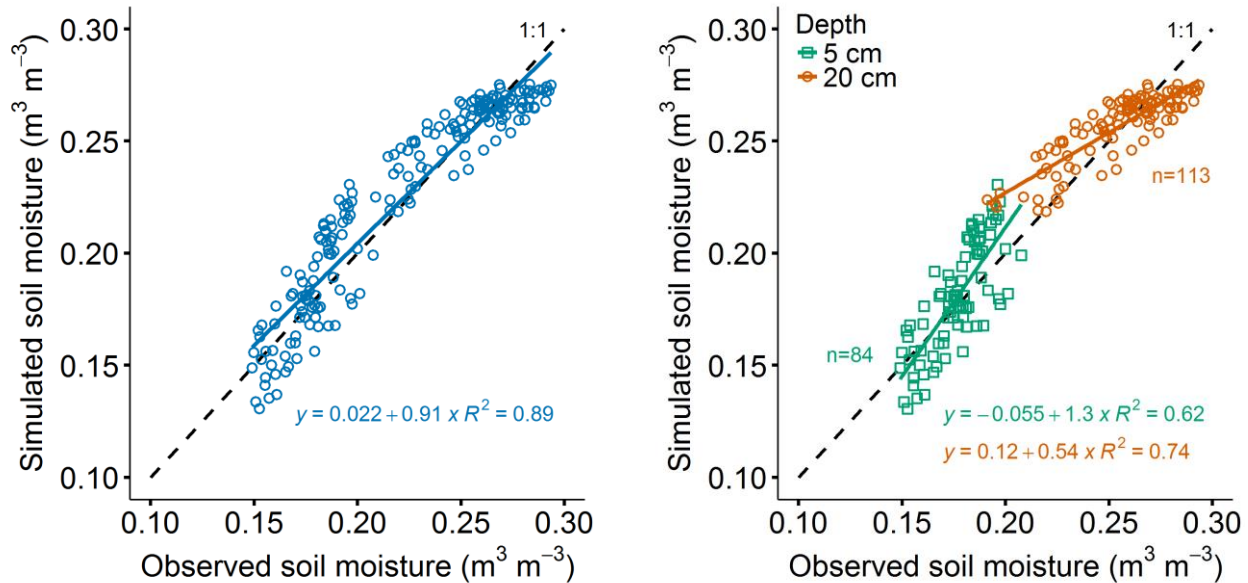
ιδιαίτερα ικανοποιητική συμπεριφορά με τους δείκτες R^2 , RMSE και δείκτης NaS να λαμβάνουν τις τιμές 0.89, 0.015 $m^3 m^{-3}$ και 0.887, αντίστοιχα (Πίνακας 3.5). Στην Εικόνα 3.11 απεικονίζεται η προσομοιωμένη συναρτήση της μέσης παρατηρούμενης SM για τα δυο βάθη, 5 και 20 cm και το σύνολο των δεδομένων, ενώ παρουσιάζεται η ευθεία και συνάρτηση γραμμικής παλινδρόμησης.

Διακρίνοντας τα δεδομένα βάσει του βάθους προέλευσης, ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 υπολογίστηκε ίσος με 0.62 και 0.74 για τα 5 και 20 cm (Πίνακας 3.5), αντίστοιχα, παρέχοντας ποσοτικά στοιχεία ότι το μοντέλο ανταποκρίνεται καλύτερα στα 20 cm. Επιπλέον, ο δείκτης RMSE προσδιορίστηκε ίσος με 0.016 και 0.014 $m^3 m^{-3}$ για τα δυο βάθη, τιμές ιδιαίτερα καλές εάν ληφθεί υπόψη η ευαισθησία του αισθητήρα EC-5 ECH₂O, της εταιρίας Decagon. Τέλος, ο δείκτης Nash-Sutcliffe οδήγησε σε αμφιλεγόμενα συμπεράσματα καθώς στα 20 cm έλαβε την τιμή 0.68 που θεωρείται ικανοποιητική, ενώ για τα 5 cm την τιμή 0.29 (Πίνακας 3.5). Διαχωρίζοντας τα δεδομένα SM με βάση το βάθος παρατήρησης, το μοντέλο παρουσίασε καλύτερη συμπεριφορά στο βάθος των 20 cm (Εικόνα 3.10) σε σχέση με αυτό των 5 cm, που φαίνεται να υπερεκτιμάτε (Εικόνα 3.9).

Πίνακας 3.5: Δείκτες R, R^2 , RMSE και NaS για την αξιολόγηση της βαθμονόμησης του μοντέλου SALTMED στην προσομοίωση της εδαφικής υγρασίας. Τα παρατηρούμενα και προσομοιωμένα δεδομένα υγρασίας αξιολογούν συνολικά και διακριτά ως προς το βάθος παρατήρησης.

Δεδομένα εδαφικής υγρασίας	R (-)	R^2 (-)	RMSE ($m^3 m^{-3}$)	NaS (-)
Σύνολο δεδομένων	0.94	0.89	0.015	0.887
Βάθος 5 cm	0.79	0.62	0.016	0.287
Βάθος 20 cm	0.86	0.74	0.014	0.680

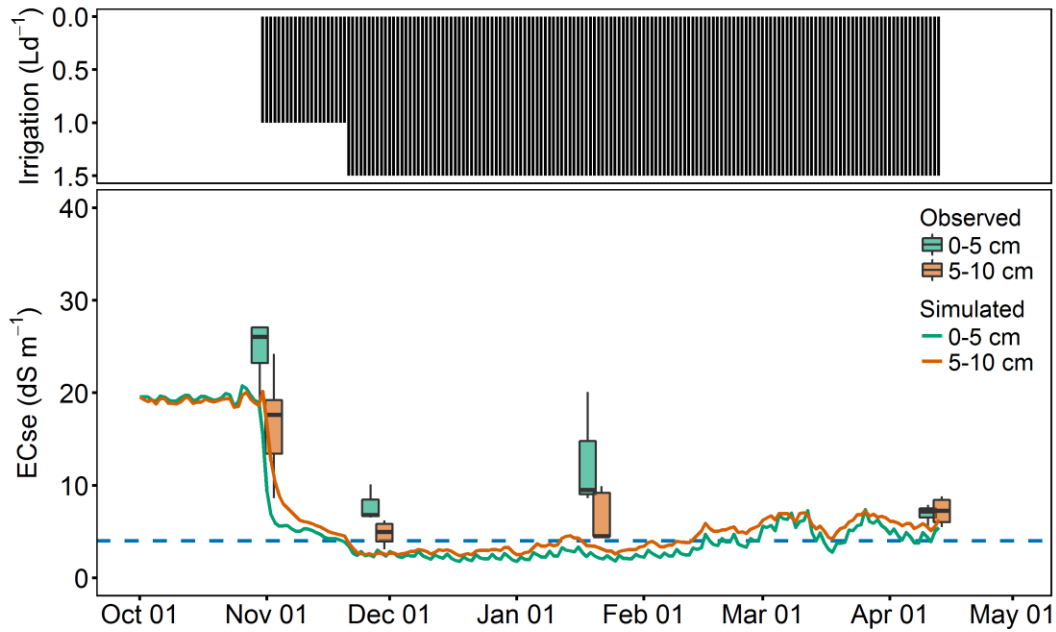
Το επιφανειακό έδαφος υπόκειται σε εντονότερες μεταβολές σε σχέση με το υποκείμενο, εξαιτίας των ημερήσιων κύκλων διαβροχής και στράγγισης, ενώ δέχεται και εξάτμισης αντίθετα με το έδαφος μεγαλύτερου βάθους. Η διαφορά στην ένταση των διεργασιών του κύκλου του νερού μεταξύ των δυο βαθών, μπορεί να οφείλεται για την μη ικανοποιητική προσομοίωση του επιφανειακού εδάφους έναντι του υποκείμενου. Επιπλέον, το πλήθος των μετρήσεων SM για το βάθος των 5 cm ($n = 84$) ήταν περιορισμένα σε σύγκριση με αυτά του βάθους 20 cm ($n = 113$) (Εικόνα 3.11), λόγω αστοχίας των αισθητήρων.



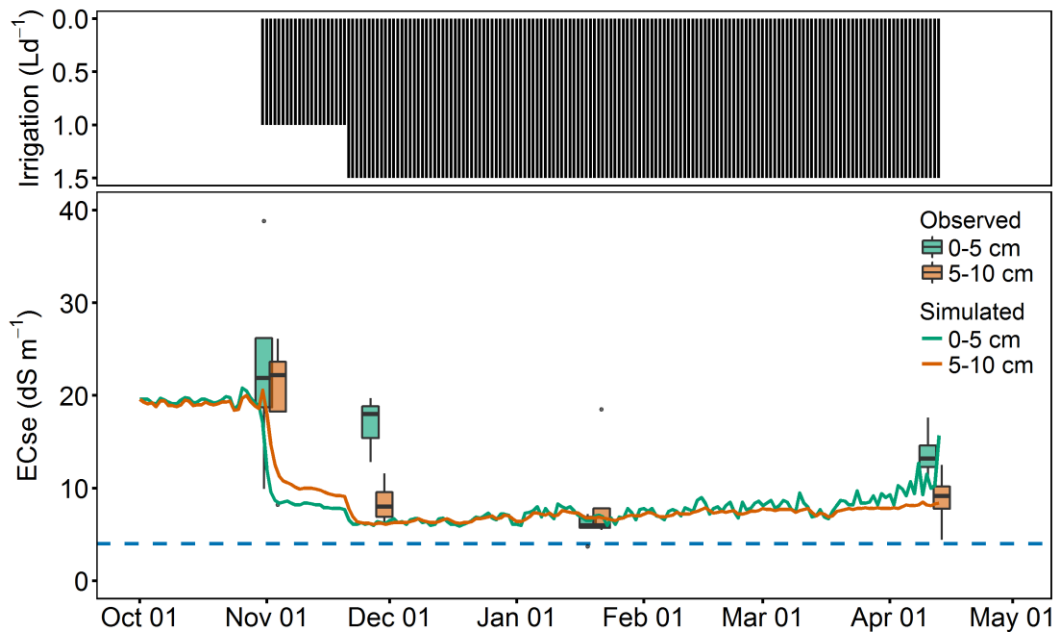
Εικόνα 3.11: Προσομοιωμένη εδαφική υγρασία συναρτήσει παρατηρούμενης για την μεταχείριση LS σε βάθος 5 και 20 cm (δεξιά) και για το σύνολο των παρατηρήσεων (αριστερά). Απεικονίζεται η ευθεία και η συνάρτηση παλινδρόμησης καθώς και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 για κάθε βάθος. Η διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει την ευθεία 1:1.

Μετά την βαθμονόμηση της εδαφικής υγρασίας, διερευνάτε η απόδοση του μοντέλου SALTMED στην προσομοίωση της εδαφικής αλατότητας ECse. Λόγω του περιορισμένου πλήθους των πειραματικών μετρήσεων κατά την διεξαγωγή του πειράματος (**Εικόνα 3.2**) δεν είναι δυνατή η ποσοτικοποίηση της αποτελεσματικότητας του μοντέλου στην προσομοίωση της αλατότητας. Ωστόσο οι **Εικόνα 3.12** και **Εικόνα 3.13** παρουσιάζουν την παρατηρούμενη και την προσομοιωμένη ECse σε απόσταση 10 cm από την πηγή άρδευσης για τα βάθη 0-5 και 5-10 cm, αντίστοιχα, παρέχοντας μια ποιοτική εκτίμηση του μοντέλου. Στην **Εικόνα 3.12** και **Εικόνα 3.13** παρατηρείται ότι η ECse πέφτει γρήγορα με την έναρξη των αρδεύσεων, ιδιαίτερα για την μεταχείριση LS. Σύμφωνα με την προσομοίωση, η ECse παραμένει σταθερή μέχρι την έναρξη των αρδεύσεων και έπειτα φθίνει έως στις 27-11-2015 όπου λαμβάνει την μικρότερη της τιμή για τις δυο μεταχειρίσεις, ίση με 2.3 και 6.0 dS m⁻¹ για την LS και MS, αντίστοιχα, χωρίς σημαντικές διαφορές μεταξύ των δυο βαθών μελέτης 0-5 και 5-10 cm.

Από τις 28-11-2015 μέχρι το τέλος της καλλιέργειας η ECse ακολουθεί μια ανοδική πορεία με την μεταχείριση LS να λαμβάνει τελικές τιμές 5.4 και 6.3 για τα βάθη 0-5 και 5-10 cm, και την MS τις 15.3 και 8.6 dS m⁻¹, αντίστοιχα, που βρίσκονται πάνω από το όριο των 4.0 dS m⁻¹. Αιτία της αυξητικής πορείας της ECse μετά τις 27-11-2015 είναι η αύξηση των απαιτήσεων του φυτού σε νερό σε συνδυασμό με την διατήρηση σταθερής άρδευσης, συνθήκες που οδήγησαν σε μείωση του διαθέσιμου για στράγγιση νερού.



Εικόνα 3.12: Ημερήσια ποσότητα άρδευσης για την μεταχείριση LS (πάνω). Παρατηρούμενη ECse (boxplots) και προσομοιωμένη ECse (lines) σε απόσταση 13 cm από την πηγή άρδευσης για τα βάθη 0-5 και 5-10 cm για την μεταχείριση LS κατά την εξέλιξη του πειράματος (κάτω). Η οριζόντια διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί σε ECse 4.0 dS m⁻¹ πάνω από την οποία ένα έδαφος χαρακτηρίζεται ως αλατούχο.



Εικόνα 3.13: Ημερήσια ποσότητα άρδευσης για την μεταχείριση MS (πάνω). Παρατηρούμενη ECse (boxplots) και προσομοιωμένη ECse (lines) σε απόσταση 13 cm από την πηγή άρδευσης για τα βάθη 0-5 και 5-10 cm για την μεταχείριση MS κατά την εξέλιξη του πειράματος (κάτω). Η οριζόντια διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί σε ECse 4.0 dS m⁻¹ πάνω από την οποία ένα έδαφος χαρακτηρίζεται ως αλατούχο.

Γενικά, το μοντέλο τείνει να υποεκτιμά την εδαφική αλατότητα, ενώ συγκρίνοντας την **Εικόνα 3.12** με την **Εικόνα 3.13**, το μοντέλο φαίνεται να ανταποκρίνεται καλύτερα στην μεταχείριση υψηλής αλατότητας MS. Σημειώνεται ωστόσο ότι και τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζουν μεγάλο εύρος τιμών, ενώ στην περίπτωση της μεταχείρισης MS το εύρος είναι μικρότερο.

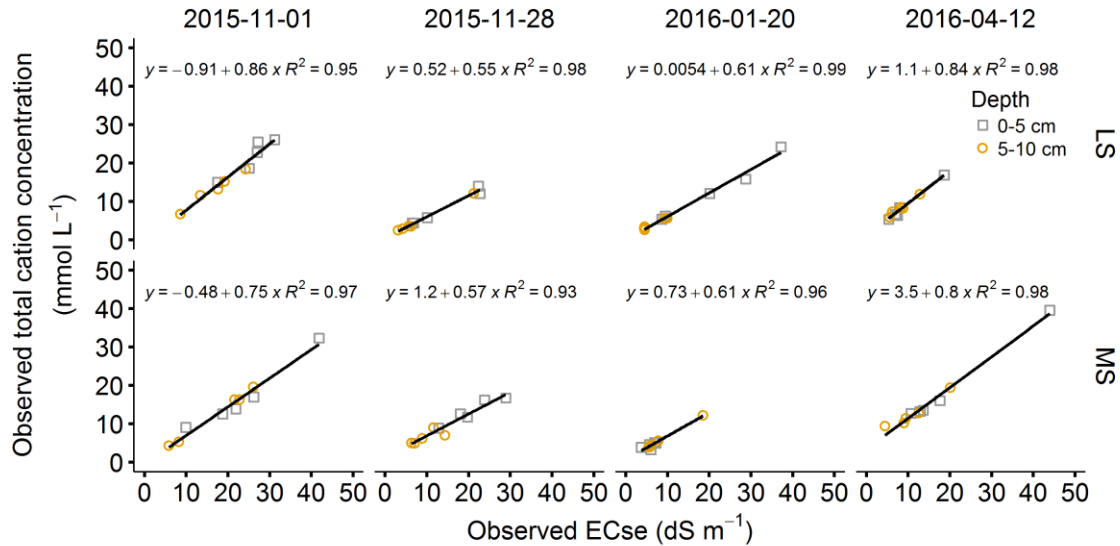
3.3.3 Τροποποίηση προσομοιωμένης ECse σε SAR

Το μοντέλο SALTMED δεν λαμβάνει υπόψη τη σχετική συμμετοχή των διαφόρων ιόντων που συμβάλουν στο σχηματισμό της EC_w και της EC_{se}. Ωστόσο, η επίδραση των διαφόρων ιόντων στις καλλιέργειες διαφέρει σε σημαντικό βαθμό, με το Na να είναι από τα πλέον επιβλαβή. Με αυτό το γνώμονα, η παρούσα εργασία προσφέρει ένα πλαίσιο μετατροπής της προσομοιωμένης EC_{se} σε τιμές του δείκτη SAR, που προσφέρει πληροφορία για την παρουσία των ιόντων Na, Ca και Mg, χρησιμοποιώντας τις εργαστηριακά προσδιορισμένες τιμές των κατιόντων.

Αρχικά, αθροίζοντας τις παρατηρούμενες συγκεντρώσεις (Cation Concentration, CC_{obs}, mmol L⁻¹) των κατιόντων (Na, Ca, Mg και K) σε κάθε δείγμα για κάθε δειγματοληψία χωριστά, υπολογίζεται η παρατηρούμενη Ολική συγκέντρωση των ιόντων (Cation Total Concentration, CTC_{obs}). Με βάση την CTC_{obs} υπολογίζεται η ποσοστιαία συμμετοχή των διαφόρων κατιόντων (Na, Ca και Mg) στο δείγμα (**Πίνακας 3.6**). Επιπλέον, προσδιορίζεται η ευθεία παλινδρόμησης της EC_{se,obs} μέσω την CTC_{obs} για κάθε μεταχείριση άρδευσης και δειγματοληψία ξεχωριστά (**Εικόνα 3.14**). Στη συνέχεια, γίνεται χρήση της εξίσωσης γραμμικής παλινδρόμησης με γνωστή την προσομοιωμένη EC_{se,sim} και ζητούμενο την προσομοιωμένη CTC_{sim}. Τέλος, πολλαπλασιάζοντας την CTC_{sim} με την ποσοστιαία συμμετοχή των κατιόντων στην CTC_{obs} εκτιμάται η προσομοιωμένη συγκέντρωση κάθε κατιόντος, που με βάση την **Εξίσωση 2.24** αποδίδουν την προσομοιωμένη SAR_{sim}.

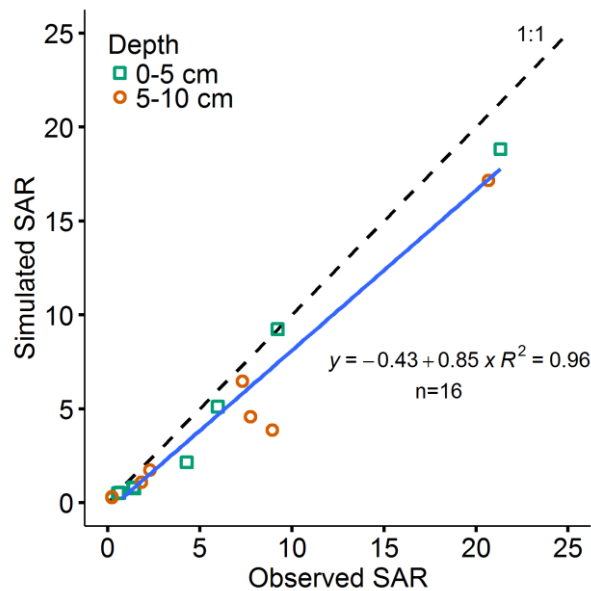
Πίνακας 3.6: Συντελεστές συμμετοχής των κατιόντων Na, Ca, και Mg στην Ολική συγκέντρωση κατιόντων για τις μεταχειρίσεις άρδευσης LS και MS κατά τις τέσσερις δειγματοληψίες. Τα δύο βάθη παρατήρησης (0-5 και 5-10 cm) εξετάστηκαν ξεχωριστά.

Δειγματοληψία	Μεταχείριση	0-5 cm			Δειγματοληψία	Μεταχείριση	5-10 cm		
		Na	Ca	Mg			Na	Ca	Mg
01-11-2015	LS	0.12	0.61	0.11	01-11-2015	LS	0.06	0.70	0.11
	MS	0.11	0.60	0.15		MS	0.07	0.67	0.09
28-11-2015	LS	0.39	0.43	0.11	28-11-2015	LS	0.47	0.32	0.09
	MS	0.61	0.29	0.06		MS	0.79	0.15	0.02
20-01-2016	LS	0.34	0.48	0.13	20-01-2016	LS	0.63	0.28	0.05
	MS	0.94	0.04	0.01		MS	0.83	0.13	0.02
12-04-2016	LS	0.78	0.11	0.04	12-04-2016	LS	0.84	0.09	0.03
	MS	0.95	0.03	0.01		MS	0.96	0.02	0.01



Εικόνα 3.14: Παρατηρούμενη ολική συγκέντρωση κατιόντων συναρτήσει παρατηρούμενης EC_{se} για τις μεταχείριση άρδευσης LS και MS και τις τέσσερις δειγματοληψίες. Απεικονίζεται η ευθεία και η εξίσωση γραμμικής παλινδρόμησης και ο συντελεστής προσδιορισμού R².

Για τον έλεγχο της μεθόδου εξετάστηκε η ικανότητα προσομοίωσης των τιμών SAR που προσδιορίστηκαν για τις τέσσερις δειγματοληψίες για τις μεταχειρίσεις LS και MS. Η **Εικόνα 3.15** απεικονίζει την προσομοιωμένη SAR συναρτήσει της παρατηρούμενης. Η ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης χαρακτηρίζεται από συντελεστή προσδιορισμού R² ίσο με 0.96 που είναι ικανοποιητικός. Γενικά, η μέθοδος φαίνεται να υποεκτιμά την SAR.



Εικόνα 3.15: Προσομοιωμένη SAR συναρτήσει παρατηρούμενης για τις τέσσερις δειγματοληψίες και τις μεταχειρίσεις άρδευσης LS και MS. Παρουσιάζεται η ευθεία και η εξίσωση γραμμικής παλινδρόμησης.

3.4 Εξεταζόμενα σενάρια

Με βάση το βαθμονομημένο μοντέλο εξετάστηκε η επίδραση μιας σειράς μεταβλητών στο προσομοιωμένο καλλιεργητικό σύστημα του Τυμπακίου, Κρήτης. Οι εξεταζόμενες μεταβλητές είναι η ποιότητα της άρδευσης εκφρασμένη ως ECw και η κλιματική αλλαγή.

3.4.1 Σενάρια ποιότητας άρδευσης

Στόχος των σεναρίων υποβαθμισμένης ποιότητας άρδευσης, εκφρασμένη ως ECw, είναι η ποσοτικοποίηση της επίδρασης της αλατότητας στην καλλιεργητική παραγωγή τομάτας και στους εδαφικούς πόρους, όταν οι υπόλοιποι παράμετροι (όπως το κλίμα και η ποσότητα άρδευσης) διατηρούνται σταθεροί. Αναφορικά με την καλλιεργητική παραγωγή, η δημιουργία μιας εξίσωσης που να συνδέει την ποιότητα της άρδευσης με την απόδοσή της καλλιέργειας είναι ιδιαίτερης σημασίας, αφού προσφέρει τη δυνατότητα πρόβλεψης και επομένως βελτιστοποίησης της παραγωγής. Επιπρόσθετα, προσδιορίζονται βασικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, όπως το κατώφλι ανοχής της τομάτας στην ECw αλλά και η τιμή της ECw που οδηγεί σε απώλεια παραγωγής ίση με 50%. Η ποιότητα του εδάφους, εκφρασμένη ως ECse, διερευνάτε καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και ιδιαίτερα κατά την παύση της καλλιέργειας. Η παρακολούθηση της ECse κατά την εξέλιξη της καλλιέργειας προσφέρει βαθύτερη γνώση για τις περιόδους πίεσης της καλλιέργειας, ενώ η κατάσταση του εδάφους κατά την παύση της αφορά επιπλέον την προστασία του περιβάλλοντος και τις μελλοντικές καλλιέργειες.

Εξετάζονται 13 σενάρια υποβαθμισμένης ποιότητας άρδευσης συμπληρωματικά με τις ποιότητες άρδευσης των μεταχειρίσεων LS και MS, και χαρακτηρίζονται από ECw ίση με 1.50, 2.00, 2.50, 3.00, 3.25, 3.75, 4.00, 4.25, 4.75, 6.00, 6.50 και 7.00 dS m⁻¹, αντίστοιχα. Για λόγους ευκολίας, τα 13 εξεταζόμενα σενάρια ομαδοποιούνται σε τρεις ομάδες, ανάλογα με την σχετική ποιότητα τους σε σύγκριση με τις πειραματικές μεταχειρίσεις LS και MS. Πιο συγκεκριμένα, οι 3 ομάδες είναι: η 1.50-3.25 dS m⁻¹ που βρίσκεται μεταξύ LS και MS, η 3.75-4.75 dS m⁻¹ που βρίσκεται πάνω την μεταχείριση MS και η 6.00-7.00 dS m⁻¹ με ECw πολύ μεγαλύτερο από την MS.

3.4.2 Σενάρια Κλιματικής Αλλαγής

Η κλιματική αλλαγή, και πιο συγκεκριμένα η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, αναμένεται να αυξήσει τις απαιτήσεις των καλλιεργειών σε άρδευση (Haddeland et al. 2014) εξαιτίας της αυξημένης εξατμισοδιαπνοής (Tanasijevic et al. 2014; Saadi et al. 2015). Ωστόσο, στις (ημι)ξηρικές περιοχές η διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων είναι περιορισμένη και ενδεχομένως να μην επαρκεί για την κάλυψη των μελλοντικά αυξημένων αναγκών της καλλιέργειας. Στόχος των σεναρίων κλιματικής αλλαγής είναι οι ποσοτικοποίηση της επίδρασης των μεταβαλλόμενων

κλιματικών συνθηκών στην θερμοκηπιακή καλλιέργεια τομάτας και την γονιμότητα του εδάφους και η διερεύνηση της συνεργιστικής δράσης της κλιματικής αλλαγής με την άρδευση υποβαθμισμένης ποιότητας κάτω από σταθερή ποσότητα άρδευσης.

4 Αποτελέσματα και συζήτηση

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας διακρίνονται στην επίδραση της ποιότητας άρδευσης (Κεφάλαιο 4.1) και στην επίδραση της κλιματικής αλλαγής (Κεφάλαιο 4.2) σε ένα τυπικό καλλιεργητικό σύστημα της περιοχής του Τυμπακίου, Κρήτης όπως αυτό προσομοιώθηκε από θερμοκηπιακό πείραμα καλλιέργειας τομάτας μικρής κλίμακας στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Σε δεύτερο βαθμό, τα αποτελέσματα διαχωρίζονται ως προς τις επιδράσεις των εξεταζόμενων μεταβλητών (αλατότητα και κλιματικές συνθήκες), αρχικά στην απόδοση της καλλιέργειας (Κεφάλαια 4.1.1 και 4.2.1) και έπειτα στην ποιότητα του εδάφους (Κεφάλαια 4.1.2 και 4.2.2).

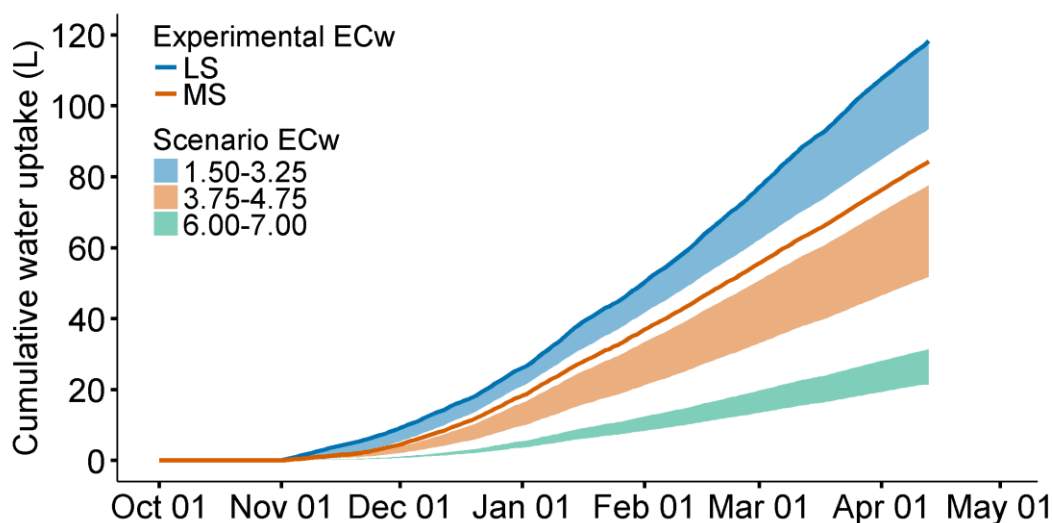
4.1 Σενάρια αλατότητας άρδευσης

4.1.1 Επίδραση αλατότητας στην καλλιέργεια τομάτας

Στην **Εικόνα 4.1** απεικονίζεται η αθροιστική προσομοιωμένη πρόσληψη ύδατος κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου για τις μεταχειρίσεις LS και MS και τα 13 σενάρια μεταβαλλόμενης ποιότητας άρδευσης εκφρασμένης ως EC_w στο εύρος 1.50-7.00 dS m⁻¹. Η μεταχείριση LS παρουσιάζει τη μέγιστη πρόσληψη ύδατος ίση με 118.3 L φυτό⁻¹, ενώ η μεταχείριση MS με πρόσληψη 84.4 L φυτό⁻¹ οδηγεί σε μείωση ίση με 28.6%. Η μείωση αυτή οφείλεται στο αυξημένο ωσμωτικό στρες που δέχονται τα φυτά της μεταχείρισης MS σε σχέση με την μεταχείριση LS. Η αύξηση του EC_w οδηγεί σε αυξημένη παρουσία αλάτων στη ριζόσφαιρα (**Εικόνα 4.4**) που έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του ωσμωτικού δυναμικού και συνεπώς τη μείωση ολικού δυναμικού του εδαφικού ύδατος. Τότε, η καλλιέργεια υπόκειται σε ωσμωτική καταπόνηση και απαιτείται μεγαλύτερη δαπάνη ενέργειας για την πρόσληψη ύδατος με τελικό αποτέλεσμα το περιορισμός της πρόσληψης νερού. Επιπλέον, η αδυναμία πρόσληψης ύδατος από την καλλιέργεια οδηγεί σε μείωση της πειραματικής απόδοσης καλλιέργειας ίση με 28.5%, από 105 σε 75 t ha⁻¹ (**Εικόνα 3.1**), υπογραμμίζοντας την σημαντική εξάρτηση της παραγωγής από την πρόσληψη νερού.

Για την πληρέστερη κατανόηση της συμπεριφοράς του φυτού σε άρδευση υποβαθμισμένης ποιότητας το βαθμονομημένο μοντέλο εκτελέστηκε για 13 σενάρια υποβαθμισμένης ποιότητας άρδευσης κάτω από τις ίδιες αρδευτικές και κλιματικές συνθήκες. Τα 13 εξεταζόμενα σενάρια διακρίνονται σε τρεις ομάδες: η 1^η ομάδα περιλάμβανε 5 σενάρια με την EC_w να κυμαίνεται στο εύρος 1.50-3.25 dS m⁻¹, η 2^η περιλάμβανε 5 σενάρια με την EC_w να κυμαίνεται στο 3.75-4.75 dS m⁻¹ και η 3^η 3 σενάρια με EC_w 6.00, 6.50 και 7.00 dS m⁻¹. Η αύξηση της EC_w οδήγησε σε πτώση της πρόσληψης ύδατος και στις τρεις ομάδες αλατότητας (**Εικόνα 4.1** και **Πίνακας 4.1**). Πιο συγκεκριμένα, η 1^η ομάδα οδήγησε σε πρόσληψη ύδατος από 93.6 έως και 118.2 L φυτό⁻¹, υποδηλώνοντας ότι η μεταχείριση LS βρίσκεται μέσα στα όρια ανοχής της καλλιέργειας στην

αλατότητα, ενώ καθώς η ECw αυξάνει μέχρι τα 3.25 dS m⁻¹ η πρόσληψη μπορεί να μειωθεί έως και 21%. Συνεχίζοντας, η 2^η ομάδα σημείωσε πρόσληψη στο εύρος 51.9-77.8 L φυτό⁻¹ σημειώνοντας μεταβολή από 34 έως και 56%. Τέλος, η τρίτη ομάδα αλατότητας με πρόσληψη ύδατος στο εύρος 21.3-31.5 L φυτό⁻¹ οδηγεί σε απώλεια πρόσληψη ύδατος > 80%, θέτοντας ερωτηματικά σχετικά με την οικονομική ευστάθεια του καλλιεργητικού συστήματος. Στην **Εικόνα 7.1** απεικονίζεται η ημερήσια πρόσληψη ύδατος για τις μεταχειρίσεις LS και MS και τα εξεταζόμενα σενάρια (**Παράρτημα 7.1**).



Εικόνα 4.1: Αθροιστική προσομοιωμένη πρόσληψη ύδατος για την καλλιέργεια τομάτας υπό άρδευση διαφορετικών ποιοτήτων ύδατος κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου. Οι εφαρμοζόμενες ποιότητες άρδευσης χαρακτηρίζονταν από ECw 1.10 και 3.50 dS m⁻¹ που αποτελούν τις μεταχειρίσεις LS και MS και επιπλέον από τρεις ομάδες σεναρίων που περιλάμβαναν τα 1.50, 2.00, 2.50, 3.00, 3.25, τα 3.75, 4.00, 4.25, 4.50, 4.75 και τα 6.00, 6.50, 7.00 dS m⁻¹, αντίστοιχα.

Οι Yurtseven et al. (2005) διερεύνησαν την απόκριση της ποικιλίας H2274-Oturak συναρτήσει της ECw υπό θερμοκηπιακές συνθήκες στην Τουρκία για ένα αμμοαργιλώδες έδαφος και παρατήρησαν σημαντική πτώση της πρόσληψης ύδατος με την αύξηση της ECw εξαιτίας προσθήκη NaCl και CaCl₂. Κατά την άρδευση αναφοράς με ECw = 0.25 dS m⁻¹ παρατηρήθηκε ολική πρόσληψη ίση με 175.8 L φυτό⁻¹, ενώ η αύξηση της ECw σε 2.5, 5.0 και 10.0 dS m⁻¹ οδήγησαν σε μείωση ίση με 18, 35 και 56%. Οι Zhang et al. (2017) διεκπεραιώνοντας ένα θερμοκηπιακό πείραμα καλλιέργειας τομάτας ποικιλίας *Lycopersicon esculentum* (Miller) στην Κίνα, με μέση θερμοκρασία ημέρας 23.9 και νύχτας 14.6 °C, προσδιόρισαν πτώση 16.4% στην πρόσληψη ύδατος μεταξύ άρδευσης με ECw 0.8 και 2.0 dS m⁻¹, με την διαφορά στην ποιότητα άρδευσης να οφείλεται σε προσθήκη NaCl. Οι Romero-Aranda et al. (2001) εξέτασαν την απόδοση άρδευσης της προστατευόμενης καλλιέργειας τομάτας (ποικιλίες cv Daniela και Moneymaker) κάτω από τρεις ποιότητες άρδευσης (0, 35 και 70 mM NaCl ή προσεγγιστικά 3.5 και 7.0 dS m⁻¹),

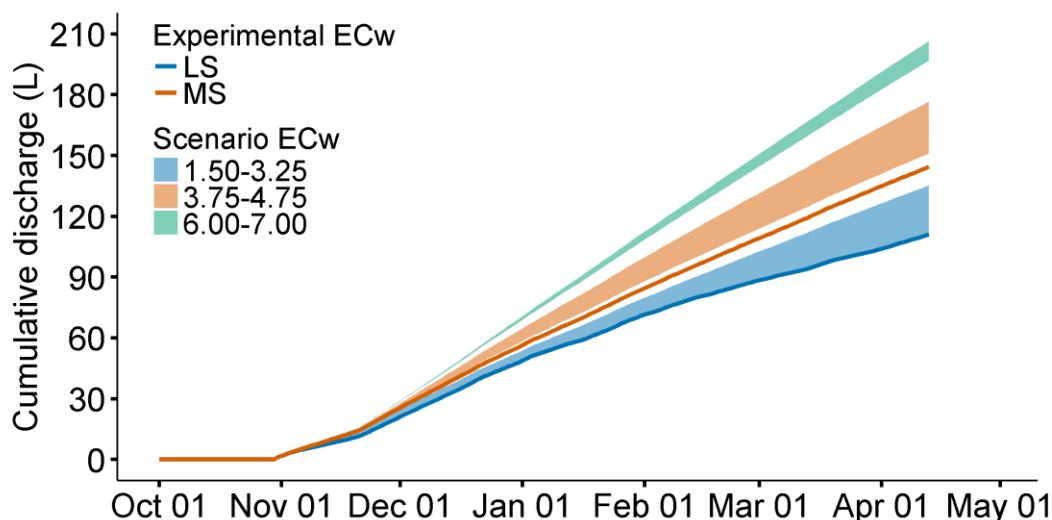
τυπικές για την Νοτιοανατολική Ισπανία με θερμοκρασιακό εύρος 22-28 °C. Η πρόσληψη ύδατος προσδιορίστηκε ως τη διαφορά μεταξύ ύδατος άρδευσης και ύδατος στράγγισης και δεν παρουσίασε σημαντικές διαφορές μεταξύ των δυο ποικιλιών σε κάθε ποιότητα άρδευσης. Συγκριτικά με την άρδευση αναφοράς ($EC_w = 0 \text{ dS m}^{-1}$), οι ποιότητες EC_w 35 και 70 mM NaCl οδήγησαν σε μειωμένη πρόσληψη ύδατος κατά 15 και 23%, αντίστοιχα (Romero-Aranda et al. 2001). Οι Reina-Sánchez et al. (2005) μελέτησαν τη συμπεριφορά τεσσάρων ποικιλιών τομάτας (Floridade, L1, L5 και L9) σε άρδευση αναφοράς 1.9 dS m^{-1} και τρεις μεταχειρίσεις με EC_w 4.7, 7.1 και 9.1 dS m^{-1} (0, 25, 50 και 75 mM NaCl, επιπρόσθετα της λίπανσης) σε θερμοκηπιακή εγκατάσταση στη Συρία, και παρατήρησαν πτώση της πρόσληψης ύδατος ως προς την άρδευση αναφορά στο εύρος 16-27, 23-33 και 35-47% για κάθε μεταχείριση. Η προσομοίωση καλλιέργειας τομάτας στην παρούσα εργασία παρουσίασε μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στις χαμηλές τιμές, με πτώση πρόσληψης ύδατος 7% στα 2.5 dS m^{-1} , ενώ στην επακόλουθη αύξηση της EC_w σημείωσε μεγαλύτερη ευαισθησία με μείωση τη 50% να επιτυγχάνεται στα μόλις στα ca. 4.50 dS m^{-1} (Πίνακας 4.1). Η πρόσληψη νερού μειώνεται κατά 50% για τιμές EC_w στο εύρος 4.25-4.75 dS m^{-1} , το οποίο συμπίπτει με τις παραμετροποιημένες τιμές π_{50} που εισήχθησαν στο μοντέλο SALTMED (Πίνακας 3.4).

Πίνακας 4.1: Ολική αθροιστική προσομοιωμένη πρόσληψη και στράγγιση ύδατος για την καλλιέργεια τομάτας υπό άρδευση διαφορετικών ποιοτήτων ύδατος σύμφωνα με τα εξεταζόμενα σενάρια.

EC_w (dS m^{-1})	Πρόσληψη νερού (L φυτό^{-1})	Στράγγιση (L φυτό^{-1})	EC_w (dS m^{-1})	Πρόσληψη νερού (L φυτό^{-1})	Στράγγιση (L φυτό^{-1})
1.10 (LS)	118.3	111.1	3.50 (MS)	84.4	144.6
1.50	118.2	111.2	3.75	77.8	151.1
2.00	115.7	113.7	4.00	69.9	159.0
2.25	113.3	116.0	4.25	63.6	165.2
2.50	109.9	119.3	4.75	51.9	176.8
2.75	106.0	123.2	6.00	31.5	196.9
3.00	100.3	128.8	6.50	26.1	202.3
3.25	93.6	135.5	7.00	21.3	206.6

Το νερό που δεν προσλαμβάνεται από την καλλιέργεια εξαιτίας της EC_w είναι διαθέσιμο να συμμετάσχει στις υπόλοιπες υδρολογικές διεργασίες. Καθώς οι κλιματικές συνθήκες διατηρούνται σταθερές μεταξύ των σεναρίων EC_w , το επιπλέον νερό θα απομακρυνθεί από τη ριζόσφαιρα μέσω της στράγγισης. Στην **Εικόνα 4.2** απεικονίζεται η αθροιστική προσομοιωμένη στράγγιση ύδατος από τη ριζόσφαιρα για τα εξεταζόμενα σενάρια αλατότητας, ενώ στον **Πίνακας 4.1** παρουσιάζεται η ολική αθροιστική στράγγιση. Η μικρότερη στράγγιση, ίση με 111.1 L, επιτυγχάνεται με τη μεταχείριση LS, ενώ τα υπόλοιπα σενάρια οδηγούν σε αυξημένες απώλειες λόγω στράγγισης. Για

ECw στο εύρος 1.50-3.25 η στράγγιση αυξάνει από 0 έως και 21.9% με την αύξηση της αλατότητας, ενώ για ECw ίσο με την μεταχείριση MS η αύξηση φτάνει το 30.0%. Για ECw στα εύρη 3.75-4.75 και 6.00-7.00 η μεταβολή της στράγγισης κυμαίνεται από 36.0 έως και 59.1% και από 77.2 έως 86.0%. Επιπρόσθετα, η αύξηση της στράγγισης ενδεχομένως να οδηγήσει σε κίνδυνο ρύπανσης των υπόγειων υδάτων με διαθέσιμα θρεπτικά άλατα που προκύπτουν στη ριζόσφαιρα εξαιτίας της χημικής λίπανσης. Στην **Εικόνα 7.3** απεικονίζεται η ημερήσια προσομοιωμένη στράγγιση ύδατος από τη ριζόσφαιρα για τις μεταχειρίσεις LS και MS και τα εξεταζόμενα σενάρια αλατότητας (**Παράρτημα 7.2**).

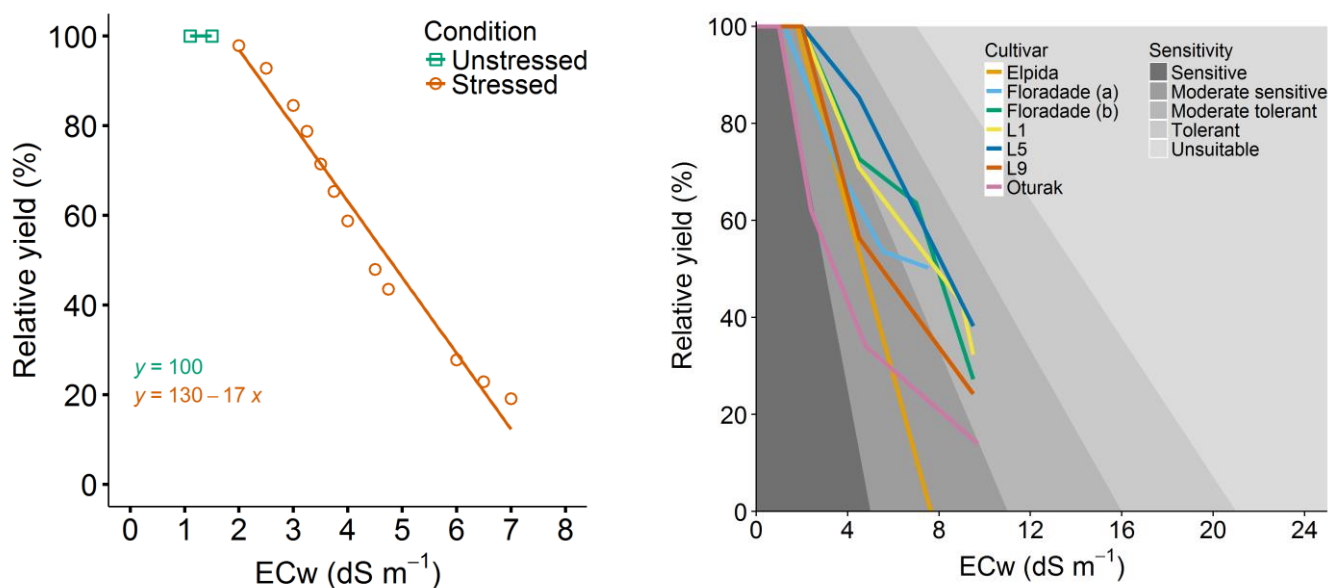


Εικόνα 4.2: Αθροιστική προσομοιωμένη στράγγιση ύδατος για την καλλιέργεια τομάτας υπό άρδευση διαφορετικών ποιότητων ύδατος κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου. Οι εφαρμοζόμενες ποιότητες άρδευσης χαρακτηρίζονταν από ECw 1.10 και 3.50 dS m⁻¹ που αποτελούν τις μεταχειρίσεις LS και MS και επιπλέον από τρεις ομάδες σεναρίων που περιλάμβαναν τα 1.50, 2.00, 2.50, 3.00, 3.25, τα 3.75, 4.00, 4.25, 4.50, 4.75 και τα 6.00, 6.50, 7.00 dS m⁻¹, αντίστοιχα.

Η μείωση της πρόσληψης ύδατος εξαιτίας της αύξησης της ECw οδήγησε σε μειωμένη σχετική απόδοση της καλλιέργειας τομάτας, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.3**. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της ECw έως τα 1.5 dS m⁻¹ δεν οδήγησε σε απώλεια παραγωγής, ενώ για μεγαλύτερες τιμές ECw παρουσιάζεται γραμμική πτώση με κλίση 17% ανά μοναδιαία αύξηση της ECw. Η απώλεια παραγωγής γίνεται ίση με 50% στο εύρος ECw 4.25-4.50 dS m⁻¹, ενώ ξεπερνά το 80% για ECw ≥ 7.00.

Σημειώνεται ότι οι Zhai et al. (2015), διερευνώντας την απόκριση της τομάτας (ποικιλία Red Crown) σε υποβαθμισμένη ποιότητα άρδευσης με ECw στο εύρος 3.0-5.5 dS m⁻¹ εξαιτίας της παρουσίας Na⁺, παρατήρησαν μέγιστη απώλεια εμπορεύσιμης παραγωγής ίση με 31% συγκρίνοντας με μεταχείριση άρδευσης αναφοράς 0.9 dS m⁻¹. Το πείραμα των Zhai et al. (2015) διεξήχθη στη Νότια Κίνα υπό συνθήκες πεδίου για τρία διαδοχικά έτη και η μέση παρατηρούμενη

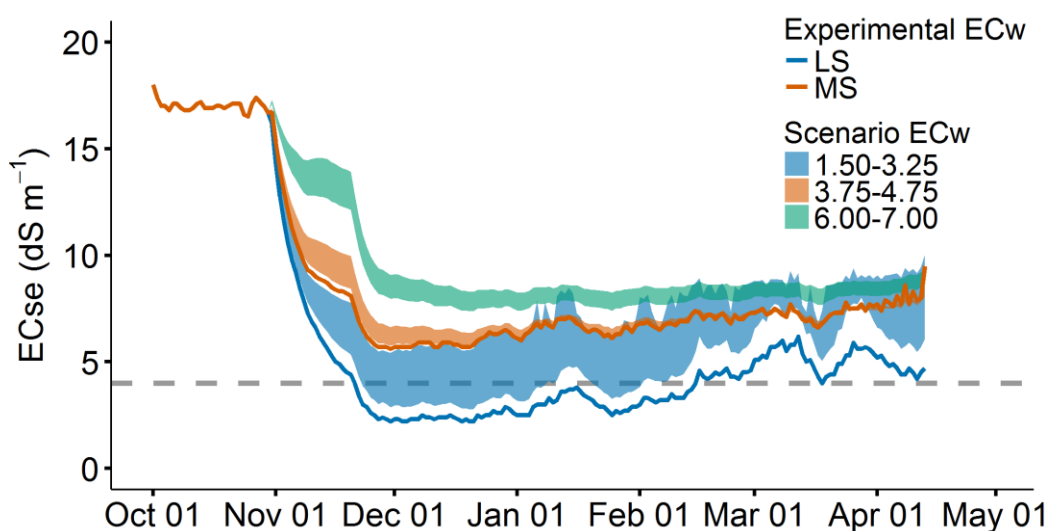
θερμοκρασία ήταν 23.0 °C. Επιπλέον, οι Abdel Gawad et al. (2005) προσδιόρισαν απώλεια παραγωγής τομάτας (ποικιλία Floridade) ίση με 50% για ECw στο εύρος 6.0-7.0 dS m⁻¹ κάτω από στάγδην άρδευση υπό συνθήκες πεδίου στη Συρία, ενώ η αύξηση της αλατότητας οφείλονταν στην ανάμιξη καθαρού ύδατος με στραγγίσματα καλλιεργητικών εκτάσεων και κατά συνέπεια οφείλονταν σε διάφορα μέταλλα όπως Ca, Mg και K, και όχι εξολοκλήρου στο Na. Οι Yurtseven et al. (2005) προσδιόρισαν την απώλεια θερμοκηπιακής παραγωγής της ποικιλίας H2274-Oturak στην Τουρκία μεταξύ της ECw αναφοράς 0.26 dS m⁻¹ και των μεταχειρίσεων ECw 2.4, 4.8 και 9.7 dS m⁻¹ ίση με 38, 66 και 86%, αντίστοιχα. Οι διαφοροποιήσεις σχετικά με την ποικιλία του φυτού, τις κλιματικές συνθήκες και κυρίως την προέλευση της αλατότητας στο νερό άρδευσης (Mizrahi et al. 1988; Del Amor et al. 2001; Wan et al. 2007) περιορίζουν τη δυνατότητα σύγκρισης των ευρημάτων της παρούσας εργασίας με τη βιβλιογραφία. Ωστόσο, η μεταβολή της σχετικής απόδοσης της καλλιέργειας συναρτήσει της ECw, όπως προσδιορίστηκε στην παρούσα μελέτη (Εικόνα 4.3), βρίσκεται μέσα στο φάσμα των μέτρια ευαίσθητων καλλιεργειών, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.3, στο οποίο ανήκει και η τομάτα σύμφωνα με τους Reina-Sánchez et al. (2005).



Εικόνα 4.3: (Αριστερά) Προσομοιωμένη σχετική απόδοση καλλιέργειας συναρτήσει της ECw. Διακρίνονται δυο φάσεις με την αύξηση του ECw, η πρώτη κυμαίνεται από 1.1 έως 1.5 dS m⁻¹ και δεν οδηγεί σε μείωση της παραγωγής, ενώ η δεύτερη για > 2.0 dS m⁻¹ με σταδιακή μείωση της σχετικής απόδοσης. (Δεξιά) Σχετική απόδοση καλλιέργειας συναρτήσει ECw σύμφωνα με την ευαισθησία της καλλιέργειας σύμφωνα με την εργασία των Ayers & Westcot (1985). Οι έγχρωμες γραμμές συμβολίζουν την μεταβολή της σχετικής απόδοσης καλλιέργειας τομάτας σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος της παρούσας εργασίας (πορτοκαλί) και της βιβλιογραφίας.

4.1.2 Επίδραση αλατότητας στο έδαφος

Η άρδευση καλλιεργειών με νερό υποβαθμισμένης ποιότητας οδηγεί στη συσσώρευση αλάτων στην ριζόσφαιρα με αρνητικές συνέπειες για την ίδια την καλλιέργεια και το περιβάλλον. Στην **Εικόνα 4.4** απεικονίζεται η εξέλιξη της εδαφικής ECse κατά την καλλιεργητική περίοδο για τις μεταχειρίσεις LS και MS και τα εξεταζόμενα σενάρια ποιότητας άρδευσης σε απόσταση 10 cm από την πηγή άρδευσης και για το βάθος 0-25 cm. Η πειραματική και η προσομοιωμένη εξέλιξη της εδαφικής ECse κατά την καλλιεργητική περίοδο για τις μεταχειρίσεις LS και MS απεικονίζεται και στις **Εικόνα 3.12** και **Εικόνα 3.13** σε απόσταση 10 cm από την πηγή άρδευσης και για τα βάθη 0-5 και 5-10 cm.



Εικόνα 4.4: Εδαφική ECse για το βάθος 0-25 cm σε απόσταση 10 cm από την πηγή άρδευσης κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου για τις μεταχειρίσεις χαμηλής (LS) και μέσης (MS) ποιότητας άρδευσης αλλά και τις εξεταζόμενες ομάδες ποιότητας άρδευσης 1.50-3.25, 3.75-4.75 και 6.00-7.00 dS m⁻¹. Η εδαφική ECse προσδιορίστηκε με χρήση του μοντέλου SALTMED για τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες. Η οριζόντια διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί σε 4.0 dS m⁻¹ πάνω από την οποία ένα έδαφος χαρακτηρίζεται ως αλατούχο.

Κατά την περίοδο 01-10-2015 έως 01-11-2015 όλες οι μεταχειρίσεις παρουσιάζουν πλήρη συμφωνία ως προς την προσομοίωση της ECse, λόγω της απουσίας άρδευσης που αποτελεί τη μεταβλητή των εξεταζόμενων σεναρίων. Με την έναρξη της άρδευσης, ωστόσο, παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις και ιδιαίτερα μεταξύ της μεταχείρισης LS και του σεναρίου 1.50-3.25 dS m⁻¹. Η αύξηση της ECw από 1.10 (LS) έως 3.25 dS m⁻¹ έχει ως αποτέλεσμα το διπλασιασμό της προσομοιωμένης ECse, ξεπερνώντας και την εδαφική αγωγιμότητα που προκαλείται από ECw 3.50 dS m⁻¹ από τις 01-02-2016 και έπειτα. Η περεταίρω αύξηση της ECw από 3.50 (MS) έως 4.75 dS m⁻¹ οδηγεί στην ήπια αύξηση της ECse έως τις 01-02-2016, ενώ στη συνέχεια φαίνεται να ταυνίζεται με τη μεταχείριση MS με αμελητέες αυξομειώσεις και τιμές μικρότερες του άνω ορίου

της 1^{ης} ομάδας σεναρίων. Τέλος, η τρίτη ομάδα ECw στο εύρος 6.00-7.00 dS m⁻¹ έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ECse έως και 5 μονάδες πάνω από αυτήν της 2^{ης} ομάδας σεναρίων στις 15-11-2015, ενώ οι αποκλίσεις τους μειώνονται σταδιακά και καταλήγουν να επικαλύπτονται από τις 15-03-2016 και έπειτα.

Η μη αναμενόμενη επίδραση των σεναρίων ποιότητας άρδευσης στην τελική ECse οφείλεται στην μειωμένη πρόσληψη ύδατος από την καλλιέργεια που οδηγεί σε επιπλέον διαθέσιμο νερό προς στράγγιση και απομάκρυνση αλάτων. Στον **Πίνακα 4.2** παρατίθεται η τελική εδαφική ECse για τις μεταχειρίσεις LS και MS και τα 13 εξεταζόμενα σενάρια ποιότητας άρδευσης, όπως προσομοιώθηκε από το μοντέλο SALTMED. Η αύξηση της ECw από 1.10 έως 3.50 dS m⁻¹ οδηγεί σε αύξηση έως και κατά 100% της τελικής ECse εξαιτίας της εισόδου μεγαλύτερης ποσότητας αλάτων κατά την άρδευση. Ακολούθως, με περεταίρω αύξηση του ECw στο εύρος 3.50-4.75 dS m⁻¹, η τελική ECse μειώνεται έως και κατά 28% σε σχέση με την ECw 3.50 dS m⁻¹, πιθανώς εξαιτίας της αύξησης του διαθέσιμου κλάσματος άρδευσης προς στράγγιση. Για ECw > 4.75 dS m⁻¹ η τελική ECse φαίνεται να αυξάνει και για ECw 7.00 dS m⁻¹ λαμβάνει την τιμή 9.3 dS m⁻¹, καθώς η εισροή αλάτων έχει αυξηθεί σημαντικά ενώ η πρόσληψη νερού μειώνεται με βραδύτερους ρυθμούς. Συνεπώς, προτείνεται ότι η τελική εδαφική ECse είναι αποτέλεσμα δυο παραμέτρων, της ποσότητας εισερχόμενων αλάτων κατά την άρδευση και του διαθέσιμου κλάσματος άρδευσης για στράγγιση το οποίο αυξάνει με την αύξηση του ωσμωτικού δυναμικού στη ριζόσφαιρα.

Πίνακας 4.2: Τελική εδαφική ECse για το βάθος 0-25 cm σε απόσταση 10 cm από την πηγή άρδευσης για τις μεταχειρίσεις χαμηλής (LS) και μέσης (MS) ποιότητας άρδευσης αλλά και τις εξεταζόμενες ομάδες ποιότητας άρδευσης 1.50-3.25, 3.75-4.75 και 6.00-7.00 dS m⁻¹. Η εδαφική ECse προσδιορίστηκε με χρήση του μοντέλου SALTMED για τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες.

ECw (dS m ⁻¹)	ECse (dS m ⁻¹)	ECw (dS m ⁻¹)	ECse (dS m ⁻¹)
1.10 (LS)	4.7	3.50 (MS)	9.5
1.50	6.1	3.75	8.5
2.00	8.4	4.00	8.2
2.25	8.7	4.25	8.1
2.50	9.1	4.75	8.1
2.75	9.3	6.00	8.6
3.00	9.4	6.50	8.9
3.25	9.6	7.00	9.3

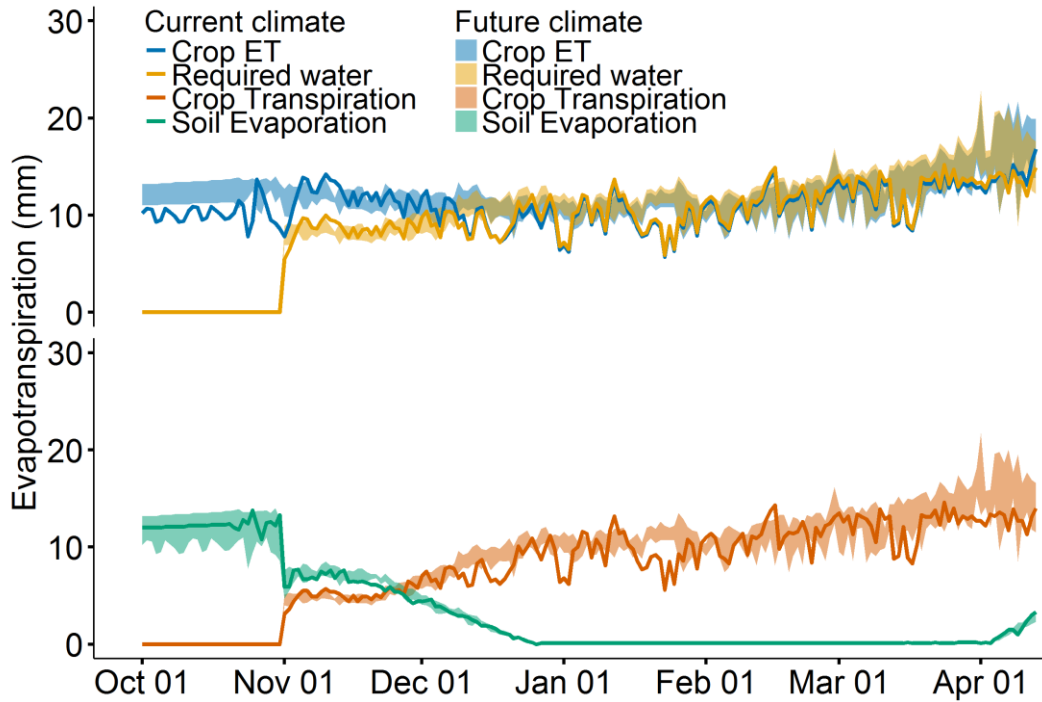
Οι Daliakopoulos et al. (2016) χρησιμοποιώντας το μοντέλο SALTMED προσδιόρισαν την ECse στο βάθος 0.0-1.3 m κάτω από την πηγή στάγδην άρδευσης για διαφορετικές ποιότητες άρδευσης ECw 1-3 dS m⁻¹ κατά την καλλιέργεια τομάτας στην νότια Ελλάδα. Τα αποτελέσματα του SALTMED κατά την ολοκλήρωση της καλλιεργητικής περιόδου έδειξαν ότι η ποιότητα άρδευσης ECw καθορίζει τη ECse στα πρώτα 0.3 m, ενώ στο εύρος 0.5-0.7 m προσδιόρισαν συσσώρευση

αλάτων και σημαντική αύξηση της ECse ανεξάρτητα από την ECw (Daliakopoulos et al. 2016). Η ταύτιση της ECw με την ECse στα πρώτα 0.3 m ενδεχομένως να αιτιολογείται από την ποσότητα (4.0 L d^{-1}) και το ρυθμό (1 h d^{-1}) της εφαρμοζόμενης άρδευσης αλλά και την υφή του εδάφους που χαρακτηρίζονταν από 46.7% άμμο, ενώ η αύξηση της ECse στο εύρος 0.5-0.7 m μπορεί να δικαιολογηθεί από την έντονη ριζική δραστηριότητα της τομάτας στο βάθος 0.2-0.75 m (Battilani et al. 2002; Steduto et al. 2012). Οι Wan et al. (2007) προσδιόρισαν την χωρική κατανομή της ECse σε υποβαθμισμένο ιλοπηλώδες έδαφος με αρχική $ECse = 9 \text{ dS m}^{-1}$ κατά την τριετή ανοιχτή καλλιέργεια τομάτας (*L. esculentum* Mill cv. L-402) με ECw αναφοράς 1.1 dS m^{-1} και τέσσερις μεταχειρίσεις στο εύρος $2.2\text{-}4.9 \text{ dS m}^{-1}$. Υιοθετώντας την πρακτική του συντελεστή απόπλυσης εφάρμοσαν περίσσεια άρδευσης και κατάφεραν να μειώσουν την ECse σε τιμές $< 4 \text{ dS m}^{-1}$ κατά την ολοκλήρωση των πειραμάτων το 2003 και 2005, με υψηλότερες τιμές εμφανίζονταν στο πρώτα 0.0-0.3 m, χωρίς σημαντικές επιδράσεις στην συνολική παραγωγή τομάτας (Wan et al. 2007). Στην παρούσα μελέτη η συντηρητική, αν και επαρκής, άρδευση που εφαρμόστηκε οδήγησε σε ικανοποιητικές αποδόσεις κάτω από ECw 1.1 dS m^{-1} , αλλά δεν ήταν ικανή να απομακρύνει τα άλατα από τη ριζόσφαιρα. Τους πρώτους μήνες άρδευσης παρατηρείται σημαντική πτώση της ECse, αλλά η επακόλουθη αύξηση της εξατμισοδιαπνοής μειώνει το διαθέσιμο κλάσμα στράγγισης και οδηγεί σε συσσώρευση αλάτων στη ριζόσφαιρα. Η σχέση της συσσώρευση αλάτων με την ECw δεν είναι μονότονη, αφού λαμβάνουν χώρα δυο αλληλοαναιρούμενοι μηχανισμοί.

4.2 Σενάρια Κλιματικής Αλλαγής

4.2.1 Επίδραση Κλιματικής Αλλαγής στην καλλιέργεια τομάτας

Στην **Εικόνα 4.5** φαίνεται η εξέλιξη της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας (Crop ET), της δυνητικής διαπνοής βλάστησης (Crop Transpiration), της δυνητικής εδαφικής εξάτμισης (Soil Evaporation) και της δυνητικής απαιτήσης της καλλιέργειας σε άρδευση (Required water) για τις υπάρχουσες και τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες που προσομοιώθηκαν με το μοντέλο SALTMED. Η διαπνοή της βλάστησης είναι μηδενική τις πρώτες 30 ημέρες της καλλιέργειας, ενώ αρχίζει να αυξάνει με τη βλάστηση του φυτού. Αντίθετα, η εδαφική εξάτμιση λαμβάνει υψηλές τιμές την περίοδο μεταξύ σποράς και βλάστησης, ενώ μειώνεται αισθητά από την εμφάνιση του φυτού και έπειτα εξαιτίας της φυτοκάλυψης. Κατά την υπάρχουσα κατάσταση, παρατηρείται ότι η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας και η διαπνοή βλάστησης παρουσιάζουν μια αυξητική τάση κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, καθώς πλησιάζει η θερινή περίοδος. Επιπλέον, οι απαιτήσεις της καλλιέργειας σε άρδευσης παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις εξαιτίας της μεταβολής των κλιματικών συνθηκών και γενικά ακολουθούν την αυξητική πορεία της εξατμισοδιαπνοής.

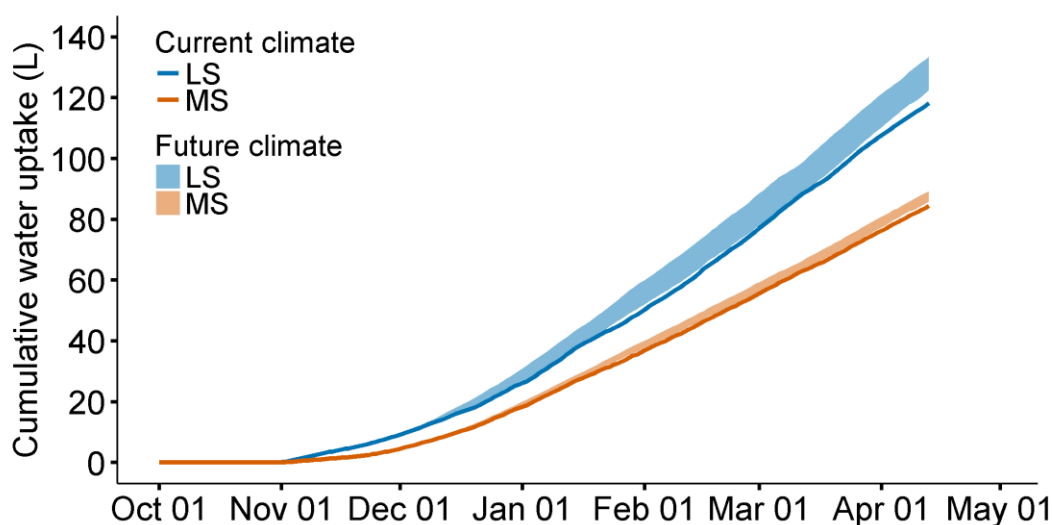


Εικόνα 4.5: Αθροιστική προσομοιωμένη εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας, διαπνοή βλάστησης, εξάτμιση εδάφους και απαιτούμενο νερό καλλιέργειας τομάτας για τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες και τα μελλοντικά σενάρια κλιματικής αλλαγής κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου.

Η μεταβολή του κλίματος οδήγησε σε σημαντικές αλλαγές στην πορεία του ύδατος στο καλλιεργητικό σύστημα στην παρούσα εργασία, ανεξάρτητα από την ποιότητα άρδευσης. Εξετάζοντας αθροιστικά τα παραπάνω στοιχεία, σημειώνεται ότι η προσομοιωμένη διαπνοή παρουσιάζει αύξηση 5 με 15%, η εξατμισοδιαπνοή αυξάνει κατά 5 με 17% και οι απαιτήσεις σε νερό προβλέπεται να αυξηθούν από 4 έως 14% (**Εικόνα 7.5** στο **Παράρτημα 7.3**). Οι μεταβολές αυτές περιγράφουν μια ενίσχυση στη δρώσα δύναμη για την πρόσληψη νερού από το φυτό. Οι Hirich et al. (2016) βαθμονόμησαν το μοντέλο SALTMED για την καλλιέργεια καλαμποκιού στο Μαρόκο και στη συνέχεια διερεύνησαν σενάρια κλιματικής αλλαγής, τα οποία είχαν προσδιοριστεί από το λογισμικό MarkSimGCM. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των βαθμομερών, κατέληξαν σε αύξηση της προσομοιωμένης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και εδαφικής εξάτμισης κατά 15 και 21% αντίστοιχα, ενώ προσδιόρισαν μείωση της δυνητικής διαπνοής και των αναγκών άρδευσης κατά 14 και 13% αντίστοιχα έως το 2090 εξαιτίας του περιορισμού των ημερών καλλιέργειας. Οι Tanasijevic et al. (2014) υπολόγισαν 8% αύξηση για την εξατμισοδιαπνοή της ελιάς στην περιοχή της Μεσογείου έως το 2050, με περιοχές στα νότια και ανατολικά να παρουσιάζουν έως και διπλάσιες τιμές. Στην ίδια κατεύθυνση, οι Saadi et al. (2015) προσδιόρισαν αύξηση της ετήσιας εξατμισοδιαπνοής αναφοράς κατά 6.7% για την περιοχή της Μεσογείου έως το 2050, ενώ

ανέφεραν μείωση κατά 6 και 5% της εξατμισοδιαπνοής σιτηρών και τομάτας εξαιτίας του περιορισμού της καλλιεργητικής περιόδου.

Στην **Εικόνα 4.6** απεικονίζεται η προσομοιωμένη αθροιστική πρόσληψη ύδατος για τις δύο μεταχειρίσεις άρδευσης (LS και MS) κάτω από τις υπάρχουσες κλιματικές και μελλοντικές συνθήκες (**Εικόνα 3.5**). Κάτω από τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες, το SALTMED προσδιόρισε πρόσληψη ύδατος ίση με 118.3 L φυτό⁻¹ για τη μεταχείριση LS, ενώ για την μεταχείριση MS ίση με 84.4 L φυτό⁻¹. Κάτω από άρδευση ποιότητας LS η πρόσληψη ύδατος προβλέπεται να αυξηθεί από 4 έως 13% εξαιτίας της μεταβολής του κλίματος, ενώ για άρδευση MS η αύξηση περιορίζεται στο εύρος 2 με 6%. Συγκρίνοντας την αύξηση των αναγκών νερού (**Εικόνα 4.5**) με την αύξηση της πρόσληψης νερού (**Εικόνα 4.6**) κάτω από τα διαφορετικά κλιματικά σενάρια, παρατηρείται ταύτιση των δυο κάτω από την αρδευτική μεταχείριση LS. Επομένως, για δεδομένη ποσότητα άρδευσης, εάν η ποιότητα είναι ικανοποιητική η βλάστηση προβλέπεται να κατορθώνει την κάλυψη των αυξημένων αναγκών της σε νερό. Αντίθετα, η πρόσληψη ύδατος κάτω από μεταχείριση MS δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις αυξημένες ανάγκες νερού λόγω κλιματικής αλλαγής, αφού ακόμα και κάτω από το σημερινό, πιο ήπιο, κλίμα οδηγεί σε μείωση κατά 28.6% σε σύγκριση με την LS. Στην **Εικόνα 7.2** παρουσιάζεται η ημερήσια προσομοιωμένη πρόσληψη ύδατος για τις μεταχειρίσεις LS MS και τα εξεταζόμενα σενάρια κλιματικής αλλαγής (**Παράρτημα 7.1**).



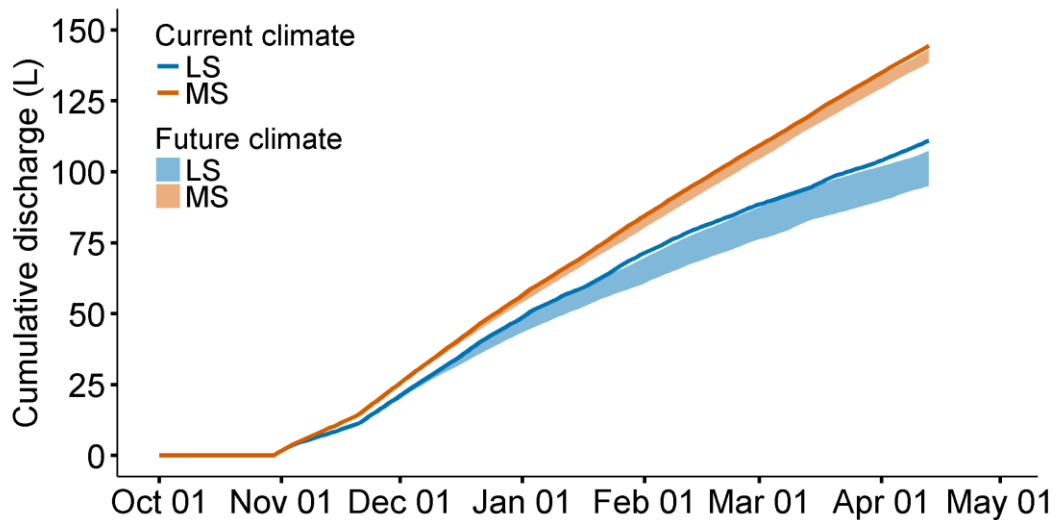
Εικόνα 4.6: Αθροιστική προσομοιωμένη πρόσληψη ύδατος για την καλλιέργεια τομάτας υπό τις μεταχειρίσεις χαμηλής (LS) και μέσης (MS) ποιότητας άρδευσης κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου. Η αθροιστική πρόσληψη ύδατος προσδιορίστηκε με χρήση του μοντέλου SALTMED για τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες και τα εξεταζόμενα μελλοντικά σενάρια κλιματικής αλλαγής.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου SALTMED, το μοντέλο SMHI οδήγησε σε υψηλότερες αυξήσεις στην πρόσληψη ύδατος από την καλλιέργεια σε σύγκριση με το KNMI, ενώ και τα δυο μοντέλα υπό τη δρώσα δύναμη 8.5 (RCP 8.5) κατέληξαν σε εντονότερες αυξήσεις σε σύγκριση με τη δρώσα δύναμη 4.5 (**Πίνακας 4.3**). Η συμπεριφορά αυτή ήταν αναμενόμενη σύμφωνα με την **Εικόνα 3.6**, **Εικόνα 3.7** και **Εικόνα 3.8** όπου φαίνεται ότι το σενάριο SMHI 8.5 περιγράφει την πιο έντονη κλιματική αλλαγή, ακολουθούμενο από το σενάριο KNMI 8.5, το SMHI 4.5 και τέλος το KNMI 4.5. Πιο συγκεκριμένα, για άρδευση LS το SMHI 8.5 οδήγησε σε αύξηση της πρόσληψης ύδατος κατά 13%, ενώ τα άλλα σενάρια KNMI 8.5, SMHI 4.5 και KNMI 4.5 κατά περίπου 5, 5 και 4%, αντίστοιχα. Για άρδευση ποιότητα MS τα τέσσερα μοντέλα οδήγησαν σε αυξήσεις 6, 2, 2 και 1% σύμφωνα με την προαναφερθείσα σειρά.

Πίνακας 4.3: Ολική αθροιστική προσομοιωμένη πρόσληψη και στράγγιση ύδατος για την καλλιέργεια τομάτας υπό της αρδευτικές μεταχειρίσεις LS και MS και τα μελλοντικά σενάρια Κλιματικές Αλλαγής.

Κλιματικές συνθήκες	Μεταχείριση LS		Μεταχείριση MS	
	Πρόσληψη νερού (L φυτό ⁻¹)	Στράγγιση (L)	Πρόσληψη νερού (L φυτό ⁻¹)	Στράγγιση (L φυτό ⁻¹)
Current	118.3	111.1	84.4	144.6
KNMI 4.5	122.5	107.4	85.8	143.3
KNMI 8.5	124.1	104.9	86.3	142.3
SMHI 4.5	123.8	105.9	86.3	142.6
SMHI 8.5	133.5	95.0	89.3	138.6

Η **Εικόνα 4.7** παρουσιάζει την προσομοιωμένη αθροιστική στράγγιση για τις δύο μεταχειρίσεις άρδευσης (LS και MS) κάτω από τις υπάρχουσες κλιματικές και μελλοντικές συνθήκες που απεικονίζονται στην **Εικόνα 3.5**, ενώ η ολική στράγγιση παρατίθεται στον **Πίνακας 4.3**. Τα αποτελέσματα του μοντέλου SALTMED σημείωσαν στράγγιση στο ύψος 111.1 L φυτό⁻¹ για τη μεταχείριση LS κάτω από τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες, ενώ για την MS στο ύψος 144.6 L φυτό⁻¹. Η στράγγιση ύδατος κάτω από μεταχείριση άρδευσης LS μεταβλήθηκε εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής από 3 έως 15%, ενώ κάτω από άρδευση MS η μεταβολή ήταν στο εύρος 1-4%. Η μείωση του διαθέσιμου κλάσματος στράγγισης αναμένεται να οδηγήσει σε αύξηση της ECse και ενδεχομένως πτώση της παραγωγής. Στην **Εικόνα 7.4** απεικονίζεται η ημερήσια προσομοιωμένη στράγγιση για τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες και τα σενάρια κλιματικής αλλαγής (**Παράρτημα 7.2**).

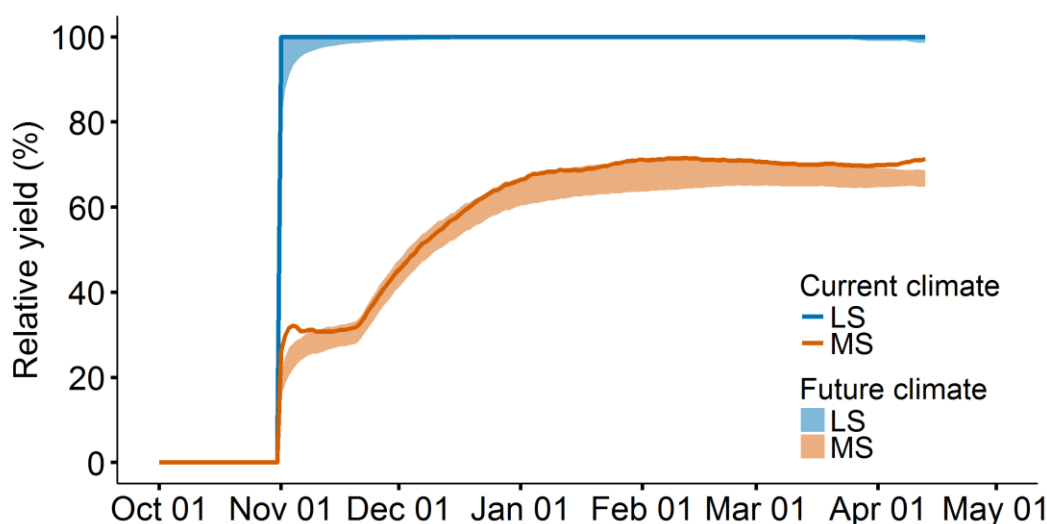


Εικόνα 4.7: Αθροιστική στράγγιση ύδατος για την καλλιέργεια τομάτας υπό τις μεταχειρίσεις χαμηλής (LS) και μέσης (MS) ποιότητας άρδευσης κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου. Η αθροιστική πρόσληψη ύδατος προσδιορίστηκε με χρήση του μοντέλου SALTMED για τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες και τα εξεταζόμενα μελλοντικά σενάρια κλιματικής αλλαγής.

Κάτω από τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες, το μοντέλο SALTMED υπολογίζει παραγωγή τομάτας 105.0 και 74.9 t ha⁻¹ για τις μεταχειρίσεις LS και MS αντίστοιχα (**Πίνακας 4.4**). Γενικά, τα εξεταζόμενα σενάρια κλιματικής αλλαγής οδήγησαν σε πτώση της παραγωγής τομάτας, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.8**. Για άρδευση ποιότητας LS η απώλεια παραγωγής είναι < 1%, παρατήρηση που δικαιολογείται αφού η αύξηση της πρόσληψης ύδατος (4-13%, **Εικόνα 4.6**) ήταν ικανή να ικανοποιήσει την αύξηση των αναγκών νερού (4-14%, **Εικόνα 4.5**). Αντίθετα, η αρδευτική μεταχείριση MS παρουσίασε μεγαλύτερη ευαισθησία στην κλιματική αλλαγή. Πιο συγκεκριμένα, η πτώση της παραγωγής τομάτας κατά ca. 28% εξαιτίας της υποβάθμισης της ποιότητας άρδευσης μεταξύ LS και MS, αυξήθηκε κατά 3 με 7% εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής. Όπως και στην πρόσληψη ύδατος, οι πιο έντονες μεταβολές στην παραγωγή τομάτας προκλήθηκαν από το σενάριο SMHI 8.5, ενώ ακολούθησαν τα σενάρια SMHI 4.5, KNMI 8.5 και KNMI 4.5 (**Πίνακας 4.4**).

Οι Daliakopoulos et al. (2016) χρησιμοποιώντας το μοντέλο SALTMED παρατήρησαν πτώση στην παραγωγή τομάτας 63% εξαιτίας της υποβαθμισμένης ποιότητας άρδευσης ($EC_w = 2 \text{ dS m}^{-1}$) και μια επιπρόσθετη μείωση στο εύρος 0-7% λόγω της κλιματικής αλλαγής (τέσσερις προσομοιώσεις υπό δρώσα δύναμη RCP 8.5). Τα αποτελέσματα του SALTMED από την παρούσα εργασία συμφωνούν με την μελέτη των Daliakopoulos et al. (2016) όσον αφορά την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην καλλιέργεια τομάτας, ενώ οι διαφορές στην επίπτωση της υποβαθμισμένης EC_w ενδεχομένως να οφείλονται στη χρήση εδάφους διαφορετικής κοκκομετρίας. Οι Montenegro et al. (2010) χρησιμοποίησαν το μοντέλο SALTMED για τη μελέτη

των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην καλλιέργεια καρότου και λάχανου στην Βραζιλία θεωρώντας δυο απλοϊκά σενάρια αύξησης της θερμοκρασίας κατά 2 και 4°C, αντίστοιχα, και δεν παρατήρησαν διαφορές στην σχετική απόδοση καλλιέργειας ούτε κάτω από DI με άρδευση στο 80% της ETc. Η μηδενική επίπτωση κλιματικής αλλαγής που προσδιόρισαν οι Montenegro et al. (2010), ενδεχομένως να οφείλεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των επιλεγμένων καλλιεργειών ή στο τρόπο ανάπτυξης των σεναρίων κλιματικής αλλαγής.



Εικόνα 4.8: Προσομοιωμένη σχετική απόδοση καλλιέργειας κατά την εξέλιξη του πειράματος για αρδευτικές μεταχειρίσεις LS και MS κάτω από τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες και τα εξεταζόμενα σενάρια κλιματικής αλλαγής.

Πίνακας 4.4: Προσομοιωμένη τελική παραγωγή τομάτας για αρδευτικές μεταχειρίσεις LS και MS κάτω από τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες και τα εξεταζόμενα σενάρια κλιματικής αλλαγής.

Κλιματικό σενάριο	Τελική παραγωγή (t ha ⁻¹)	
	Μεταχείριση LS	Μεταχείριση MS
Current	105.0	74.9
KNMI 4.5	104.2	72.1
KNMI 8.5	104.9	72.0
SMHI 4.5	104.2	68.5
SMHI 8.5	103.5	68.1

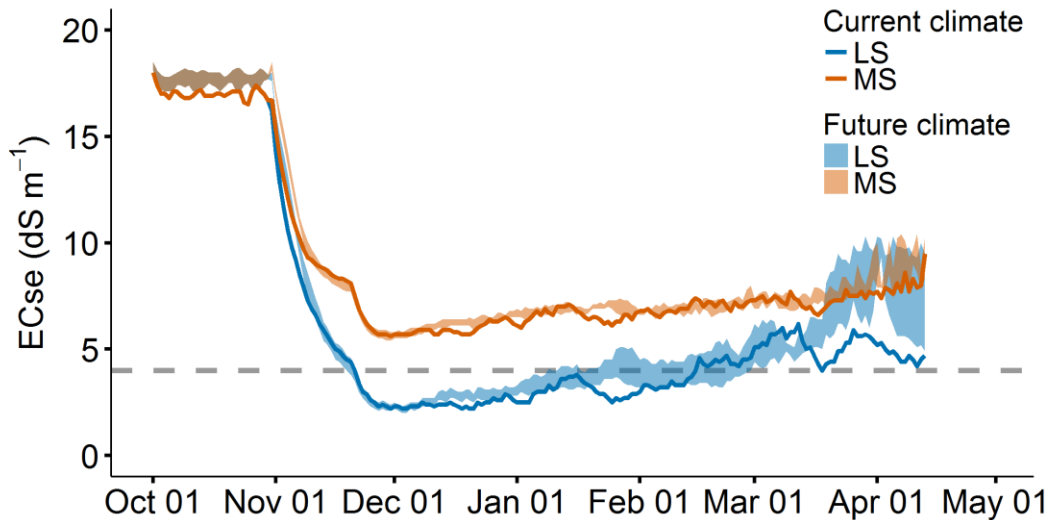
Εφαρμόζοντας τη μέθοδο βαθμοημερών που διαθέτει το μοντέλο SALTMED (Ragab, 2015), οι Pulvento et al. (2015) και οι Hirich et al. (2016) προσομοίωσαν την καλλιέργεια αμάρανθου και καλαμποκιού στην Ιταλία και το Μαρόκο, αντίστοιχα, με σκοπό τη διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα καλλιεργητικά συστήματα. Αναφορικά με την περίοδο ανάπτυξης των φυτών παρατήρησαν μείωση κατά 16 (Pulvento et al. 2015) και 20 ημέρες (Hirich et al. 2016) στο τέλος του 21^{ου} αιώνα για σενάρια έντονης κλιματικής αλλαγής, αντίστοιχα, ενώ οι τελευταίοι προσδιόρισαν μια μείωση 15% στο απαιτούμενο νερό άρδευσης. Σχετικά με την απόδοση της

παραγωγής, οι (Pulvento et al. 2015) προσδιόρισαν πτώση κατά 20% και οι (Hirich et al. 2016) μια απώλεια 2.5% έως το τέλος του 21^{ου} αιώνα. Η μελέτη της κλιματικής αλλαγής με τη μέθοδο των βαθμοημερών απαντά σε σημαντικά ερωτήματα σχετικά με τη βιωσιμότητα των καλλιεργητικών συστημάτων. Το βαθμονομημένο μοντέλο SALTMED της παρούσας εργασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με τη μέθοδο αυτή για περεταίρω ανάλυση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην καλλιέργεια τομάτας στην περιοχή του Τυμπακίου Κρήτης.

4.2.2 Επίδραση Κλιματικής Αλλαγής στο έδαφος

Η **Εικόνα 4.9** απεικονίζει την εξέλιξη της ECse για άρδευση ποιότητας LS και MS κάτω από τις υπάρχουσες και μελλοντικές κλιματικές συνθήκες, ενώ η θέση μελέτης βρίσκεται σε απόσταση 10 cm από την πηγή στάγδην άρδευσης και για βάθος 0-25 cm. Εξετάζοντας τα κλιματικά σενάρια, το μοντέλο SALTMED προβλέπει σημαντική αύξηση της ECse για την άρδευση LS ειδικά κατά το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου. Αρχικά, η ECse για τη μεταχείριση LS δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές εξαιτίας των κλιματικών συνθηκών, ενώ μετά τις 10-03-2016 τα μελλοντικά σενάρια οδηγούν σε μια σημαντική αύξηση που φτάνει έως και στο διπλασιασμό της. Κατά τη λήξη της καλλιέργειας, η ECse είναι 4.7 dS m^{-1} για τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες, ενώ τα κλιματικά σενάρια καταλήγουν σε αυξήσεις στο εύρος $4.9\text{-}9.5 \text{ dS m}^{-1}$ (**Πίνακας 4.5**). Η αύξηση της ECse που παρατηρείται στα μελλοντικά σενάρια οφείλεται στην αύξηση της πρόσληψης ύδατος (**Εικόνα 4.6**) και της ανάλογης μείωσης της στράγγισης (**Εικόνα 4.7**) λόγω των αυξημένων αναγκών νερού της καλλιέργειας (**Εικόνα 4.5**). Αναφορικά με τη μεταχείριση άρδευσης MS, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές της ECse με το μοντέλο SALTMED. Πιο αναλυτικά, κάτω από τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες, η τελική ECse ήταν 9.5 dS m^{-1} και τα μελλοντικά κλιματικά σενάρια κατέληξαν στο εύρος $8.3\text{-}10.3 \text{ dS m}^{-1}$ (**Πίνακας 4.5**).

Παρά την σημαντική αύξηση της ECse λόγω της κλιματικής αλλαγής, η μεταχείριση LS επιτυγχάνει να αυξήσει την πρόσληψη ύδατος (**Εικόνα 4.6**) ικανοποιώντας τις αυξημένες ανάγκες (**Εικόνα 4.5**) και να διατηρήσει την παραγωγή της σημειώνοντας μικρές μόνο απώλειες ($< 1\%$, **Πίνακας 4.4**). Αντίθετα, η κλιματική αλλαγή δεν επηρέασε σημαντικά την ECse της μεταχείριση άρδευσης MS, ενώ οδήγησε σε απώλειες παραγωγής έως και 7% (**Πίνακας 4.4**).



Εικόνα 4.9: Εδαφική ECse σε βάθος 0-25 cm και απόσταση 10 cm από την πηγή άρδευσης κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου για τις μεταχειρίσεις χαμηλής (LS) και μέσης (MS) ποιότητας άρδευσης. Η εδαφική ECse προσδιορίστηκε με χρήση του μοντέλου SALTMED για τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες και τα εξεταζόμενα μελλοντικά σενάρια κλιματικής αλλαγής. Η οριζόντια διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί σε 4.0 dS m⁻¹ πάνω από την οποία ένα έδαφος χαρακτηρίζεται ως αλατούχο.

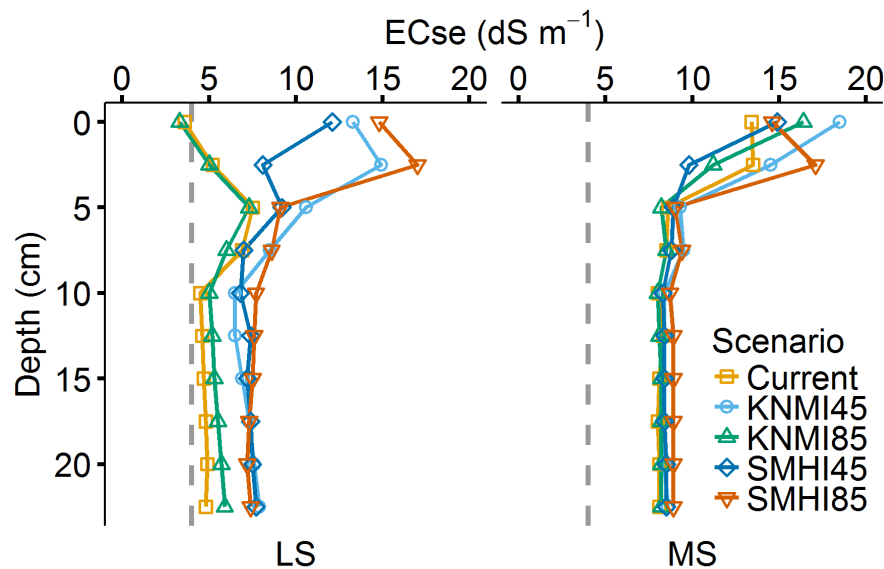
Πίνακας 4.5: Προσομοιωμένη τελική ECse σε βάθος 0-25 cm και απόσταση 10 cm από την πηγή άρδευσης για αρδευτικές μεταχειρίσεις LS και MS κάτω από τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες και τα εξεταζόμενα σενάρια κλιματικής αλλαγής.

Κλιματικό σενάριο	Τελική ECse (dS m ⁻¹)	
	Μεταχείριση LS	Μεταχείριση MS
Current	4.7	9.5
KNMI 4.5	9.0	10.2
KNMI 8.5	4.9	8.3
SMHI 4.5	8.6	9.5
SMHI 8.5	9.5	10.3

Για τη μελέτη της επίδραση της κλιματικής αλλαγής προσδιορίστηκε η κατανομή της τελικής ECse με το βάθος μέσω του μοντέλου SALTMED (**Εικόνα 4.10**). Η μέγιστες τιμές ECse συναντώνται στα 0-5 cm και για τις δυο εξεταζόμενες ποιότητες άρδευσης LS και MS. Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την κατανομή της ECse στην περίπτωση της LS, με τα σενάρια KNMI 4.5, SMHI 4.5 και SMHI 8.5 να οδηγούν σε αυξήσεις από 100 έως και 200% στο βάθος 0-10 cm. Για βάθος 10-22 cm η ECse παραμένει σχετικά σταθερή για κάθε κλιματικό σενάρια, με τα KNMI 4.5, SMHI 4.5 και SMHI 8.5 να προκαλούν αυξήσεις στο εύρος 44 με 67%, ενώ το KNMI 8.5 παρουσίασε τιμές ECse πολύ κοντά σε αυτές της υπάρχουσας κατάστασης σε όλο το βάθος παρατήρησης. Σχετικά με τη μεταχείριση MS, τα σενάρια κλιματικής αλλαγής οδήγησαν σε μεταβολές της ECse μόνο στο βάθος 0-5 cm, ενώ και εκεί δεν ήταν τόσο έντονες όσο στη

μεταχείριση LS. Πιο συγκεκριμένα η αύξηση της ECse ήταν έως και 29% και μειώνονταν με το βάθος έως 7%.

Εξετάζοντας την κατανομή της αλατότητας συναρτήσει του βάθους έως τα 0.8 m, οι Zhai et al. (2016) διαπίστωσαν ότι η αύξηση της άρδευσης τομάτας κατά 14 και 28% οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης αλάτων στο βάθος 0.0-0.2 m κατά 6 και 12% για ECw ίσο με 1.0 dS m^{-1} , ενώ κατά 11 και 19% για ECw 3.0 dS m^{-1} . Επιπλέον, η μελέτη του έδειξε μέγιστες τιμές ECse να εμφανίζονται στο βάθος 0.0-0.2 m για όλες τις μεταχειρίσεις, αν και παρατηρήθηκε μια μικρή αύξηση στο εύρος 0.4-0.6 m χωρίς ωστόσο να ξεπερνά τις τιμές στα 0.0-0.2 m. Οι Daliakopoulos et al. (2016) παρατήρησαν μέγιστη μεταβολή της ECse ίση με 10% στο βάθος 0.7-0.8 m ως αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής στην καλλιέργεια τομάτας στην περιοχή της Μεσογείου. Τα αποτελέσματα του SALTMED της παρούσας εργασίας συμφωνούν με αυτά των Zhai et al. (2016), στη βάση ότι το επιφανειακό έδαφος τείνει να χαρακτηρίζεται από υψηλότερες τιμές ECse. Ωστόσο, το βάθος ελέγχου αποτελεί σημαντική παράμετρο της μοντελοποίησης και ενδεχομένως να προκαλούσε σημαντικές αλλαγές στην κατανομή των αλάτων στο εδαφικό προφίλ.

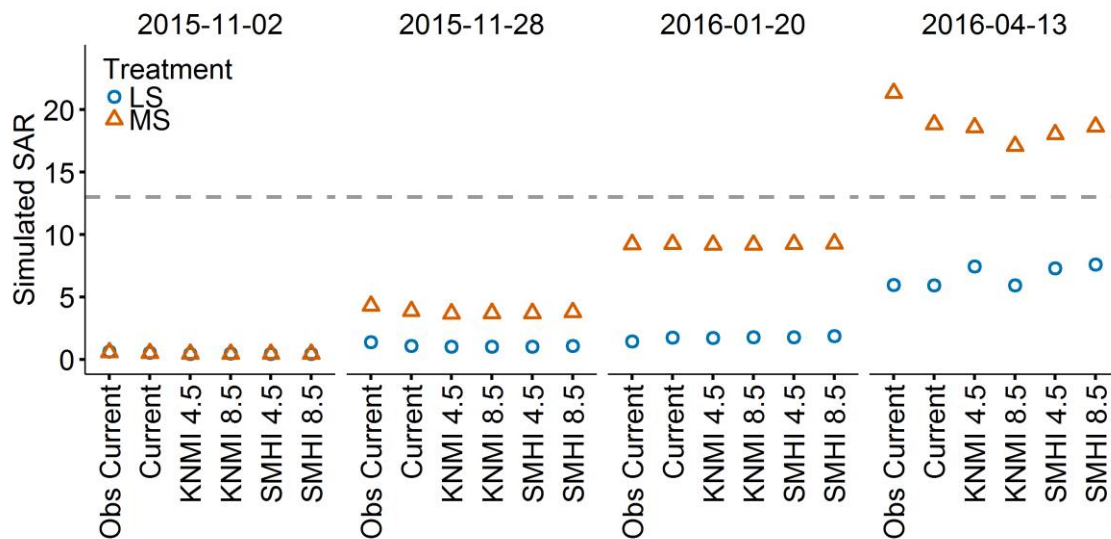


Εικόνα 4.10: Προφίλ εδαφικής ECse σε απόσταση 10 cm από την πηγή άρδευσης στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου για τις μεταχειρίσεις χαμηλής (LS) και μέσης (MS) ποιότητας άρδευσης. Η εδαφική ECse προσδιορίστηκε με χρήση του μοντέλου SALTMED για τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες και τα εξεταζόμενα μελλοντικά σενάρια κλιματικής αλλαγής. Η κάθετη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο όριο των 4.0 dS m^{-1} πάνω από το οποίο ένα έδαφος χαρακτηρίζεται ως αλατούχο.

Οι πειραματικές εργασίες των Βάγκνερ & Τσάνης (2016), Δεληγιάννη & Τσάνης (2016) και Κουτσκουδής & Τσάνης (2016) κατέληξαν ότι η χρήση της ECse για την αξιολόγηση της εδαφικής αλατότητας δεν ενδείκνυται για (ημι)ξηρικές και παράκτιες περιοχές. Οι παραπάνω, πρότειναν τη

συμπληρωματική χρήση του δείκτη SAR που εκφράζει την παρουσία του Na στα εδάφη, κανονικοποιημένη ως προς την παρουσία των Ca και Mg. Για τις παράκτιες (ημι)ξηρικές περιοχές, όπου η αλατότητα των υπογείων υδάτων συχνά οφείλεται σε φαινόμενα υφαλμύρισης, η συνδυαστική χρήση των δυο αυτών παραμέτρων είναι ιδιαίτερα σημαντική. Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκε, αξιολογήθηκε και εφαρμόστηκε μέθοδος για τη μετατροπή των αποτελεσμάτων ECse του μοντέλου SALTMED στον δείκτη SAR (Κεφάλαιο 3.3.3).

Στην **Εικόνα 4.11** παρουσιάζονται η προσομοιωμένη SAR για τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες και τα μελλοντικά σενάρια κλιματικής αλλαγής. Στις πρώτες τρεις δειγματοληψίες, δεν παρατηρούνται διαφορές είτε μεταξύ της παρατηρούμενης και της προσομοιωμένης SAR για τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες, είτε ανάμεσα στις υπάρχουσες και τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες. Στο τέλος του πειράματος, η παρατηρούμενη και η προσομοιωμένη SAR λαμβάνουν τις τιμές 21.3 και 18.8 για την μεταχείριση MS αντίστοιχα, ενώ κάτω από τη μεταχείριση LS ταυτίζονται στην τιμή 6.0. Τα κλιματικά σενάρια οδηγούν σε υψηλότερες τιμές SAR, με μέγιστη την 7.6, για τη μεταχείριση LS, ενώ χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται για τη μεταχείριση MS έως και 17.1. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και για την προσομοιωμένη ECse (**Εικόνα 4.9**), στην οποία και βασίζεται η προσομοίωση της SAR.



Εικόνα 4.11: Προσομοιωμένη SAR σε βάθος 0-25 cm και απόσταση 10 cm από την πηγή άρδευσης κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου για τις μεταχειρίσεις χαμηλής (LS) και μέσης (MS) ποιότητας άρδευσης. Η SAR προσδιορίστηκε βάση των εργαστηριακών μετρήσεων συγκέντρωσης κατιόντων και της προσομοιωμένης ECse από το μοντέλο SALTMED για τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες και τα εξεταζόμενα μελλοντικά σενάρια κλιματικής αλλαγής. Η οριζόντια διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί σε 13.0 πάνω από την οποία ένα έδαφος χαρακτηρίζεται ως νατριούχο.

5 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη επιστράτευσε το μοντέλο SALTMED για την προσομοίωση της θερμοκηπιακής καλλιέργειας τομάτας με στόχο τον προσδιορισμό των επιπτώσεων της υποβαθμισμένης ποιότητας άρδευσης και της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή της καλλιέργειας και στη γονιμότητα του εδάφους. Κατά την διεκπεραίωση της μελέτης λήφθηκαν ορισμένες υποθέσεις που περιορίζουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων ως έναν βαθμό. Αρχικά, αν και η περιοχή μελέτης είναι το Τυμπάκι, Κρήτης το θερμοκηπιακό πείραμα που παρείχε τα απαραίτητα δεδομένα για τη λειτουργία του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν στο ΠΚ, Χανιά. Ωστόσο, η περιοχή του Τυμπακίου είναι ελαφρώς θερμότερη από αυτή των Χανιά, και προβλέπεται να γίνει ακόμα πιο θερμή στο μέλλον. Ένας δεύτερος περιορισμός προκύπτει από τη χρήση γλαστρών (ύψους 35 cm και διαμέτρου 30 cm) για την εκτέλεση του πειράματος, καθώς αυτές οι συνθήκες μπορεί να επηρέασαν την ανάπτυξη του φυτού αλλά και την υγρασία και την αλατότητα του εδάφους. Η επανάληψη του πειράματος σε μεγαλύτερο δοχείο ή πραγματικό έδαφος απαιτείται για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Πέρα των πειραματικών μετρήσεων, το πείραμα γλάστρας θέτει περιορισμούς και στην χρήση του μοντέλου SALTMED όπου στη βιβλιογραφία δεν αναφέρεται χρήση του για τόσο ρηχό έδαφος. Τέλος, η κλιματική αλλαγή αναμένεται να προωθήσει το φαινόμενο της θαλάσσιας σφήνας υφαλμύρισης υποβαθμίζοντας ακόμα περισσότερο την ποιότητα των διαθέσιμων υδατικών πόρων. Το ενδεχόμενο αυτό δεν λήφθηκε υπόψη κατά την εκτέλεση των μελλοντικών σεναρίων, όπου εξετάστηκαν ποιότητες ύδατος άρδευσης που συναντώνται και σήμερα στην περιοχή μελέτης.

Παρά τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν, το μοντέλο SALTMED παρουσίασε ικανοποιητική δυνατότητα προσομοίωσης του καλλιεργητικού συστήματος, ακόμα και κάτω από θερμοκηπιακές συνθήκες για τις οποίες η βιβλιογραφία είναι περιορισμένη. Πιο αναλυτικά, το SALTMED έδειξε μεγάλη ευαισθησία στην προσομοίωση της καλλιεργητικής παραγωγής και προσομοίωσε ικανοποιητικά την εδαφική υγρασία με τα βαθύτερα στρώματα (**Εικόνα 3.10**) να εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά σε σύγκριση με τα επιφανειακά (**Εικόνα 3.9**). Σχετικά με την εδαφική αλατότητα, τα αποτελέσματα (**Εικόνα 3.12** και **Εικόνα 3.13**) έδειξαν ότι το SALTMED τείνει να την υποεκτιμά, αν και η συνολική συμπεριφορά του κρίνεται ως ικανοποιητική.

Αναφορικά με την επίδραση της ποιότητας άρδευσης, το μοντέλο SALTMED προσδιόρισε σημαντικές μεταβολές στην παραγωγή της καλλιέργειας. Πιο συγκεκριμένα, δεν παρατηρήθηκε απώλεια παραγωγής για EC_w έως 1.5 dS m^{-1} , ενώ για μεγαλύτερες τιμές η προσομοιωμένη σχετική παραγωγή μειώνεται κατά 17% ανά μοναδιαία αύξηση του EC_w (**Εικόνα 4.3**). Απώλεια

παραγωγής κατά 50% εμφανίζεται για $EC_w = 4.5 \text{ dS m}^{-1}$, ενώ παύση της καλλιέργειας αναμένεται για $EC_w > 8 \text{ dS m}^{-1}$. Τα χαρακτηριστικά αυτά κατατάσσουν την καλλιέργεια στην κατηγορία των μέτρια ευαίσθητων στην αλατότητα καλλιεργειών, παρατήρηση σε συμφωνία με την βιβλιογραφία (Εικόνα 1.1). Οι διεθνής βιβλιογραφία παρουσιάζει πιο ήπια μεταβολή της σχετικής απόδοσης με την EC_w , στο ύψος του 10% ανά μοναδιαία αύξηση της EC_w . Οι διαφορές αυτές κρίνονται αποδεκτές και πιθανόν να οφείλονται στην χρήση διαφορετικών ποικιλιών τομάτας, τύπο εδάφους, κλιματικές συνθήκες αλλά και στο πρόγραμμα άρδευσης.

Η πτώση της παραγωγής εξαιτίας της αυξημένης EC_w οφείλεται στη μειωμένη πρόσληψη ύδατος λόγω ωσμωτικού στρες. Το παραμετροποιημένο μοντέλο SALTMED προσδιόρισε πτώση της πρόσληψης ύδατος με την αύξηση της EC_w (Πίνακας 4.1), με μη σταθερό ρυθμό μεταβολής στο εύρος $1.10\text{-}7.00 \text{ dS m}^{-1}$. Για χαμηλές τιμές $EC_w (< 3.25 \text{ dS m}^{-1})$ η πτώση πρόσληψης ύδατος χαρακτηρίζεται από ρυθμό 17% ανά μοναδιαία αύξηση της EC_w , ενώ για υψηλότερες τιμές ($> 3.5 \text{ dS m}^{-1}$) ο ρυθμός σταδιακά αυξάνει και ξεπερνά απώλεια της τάξης του 30% ανά μοναδιαία αύξηση του EC_w . Η μείωση της πρόσληψης ύδατος από την καλλιέργεια οδηγεί σε αυξημένο διαθέσιμο κλάσμα στράγγισης (Πίνακας 4.1) με ενδεχόμενες αρνητικές συνέπειες στην ποιότητα των υπόγειων υδατικών πόρων λόγω της έκπλυσης θρεπτικών ουσιών και αγροχημικών από το έδαφος και την κατείσδυσή τους σε βαθύτερα στρώματα.

Η άρδευση με ύδατα υποβαθμισμένης ποιότητας επιδρά αρνητικά στην γονιμότητα του εδάφους. Εξετάζοντας την ημέρα παύσης της καλλιέργειας, το μοντέλο SALTMED προβλέπει αύξηση της EC_{se} με την αύξηση της EC_w έως την τιμή των 3.25 dS m^{-1} , ενώ για μεγαλύτερες τιμές EC_w η εδαφική EC_{se} φαίνεται να παραμένει σχετικά σταθερή ή και να μειώνεται σε ορισμένες περιπτώσεις. Η μη γραμμική σχέση που παρατηρείται μεταξύ της EC_w και της EC_{se} ενδεχομένως να οφείλεται στην δράση δυο διακριτών παραμέτρων που ελέγχουν το ισοζύγιο άλατος στον εδαφικό όγκο ελέγχου. Γενικά, η αύξηση της EC_w αυξάνει την είσοδο του άλατος και για χαμηλές τιμές ($< 3.5 \text{ dS m}^{-1}$) έχει ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση άλατος στο έδαφος αφού η έξοδος δεν επηρεάζεται σημαντικά. Ωστόσο, καθώς το EC_w λαμβάνει τιμές που ξεπερνούν την ανθεκτικότητα του φυτού (εκφρασμένη ως π_{50}), η αύξηση του ύδατος στράγγισης αυξάνει την έξοδο άλατος από τον όγκο ελέγχου σταθεροποιώντας το ισοζύγιο. Συνεπώς, η υποβάθμιση του εδάφους κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες άρδευσης ενδέχεται να είναι πεπερασμένη. Έτσι το πρόβλημα της αλάτωσης μετατρέπεται (α) σε πρόβλημα παραγωγής λόγω τοξικότητας και ωσμωτικών φαινομένων και (β) σε πρόβλημα ποιότητας των υπογείων υδάτων καθώς το έδαφος χάνει τη ρυθμιστική του ικανότητα.

Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στο καλλιεργητικό σύστημα βασίζεται στην μεταβολή της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας. Το βαθμονομημένο μοντέλο SALTMED προσδιόρισε αύξηση της ETc κατά 5 με 17% έως το 2090, που μεταφράζεται σε αύξηση των αναγκών άρδευσης κατά 4 με 14% για την ίδια περίοδο (**Εικόνα 4.5**). Κάτω από πάγια άρδευση 1.5 L d^{-1} , η απόδοση της παραγωγής αναμένεται να μην μεταβληθεί (μείωση $< 1\%$) εάν η ποιότητα της άρδευσης είναι ικανοποιητική (μεταχείριση LS), αφού τότε η καλλιέργεια επιτυγχάνει να προσλάβει περισσότερο νερό κατά 4 με 13% (**Πίνακας 4.3**). Αντίθετα, η υποβαθμισμένη ποιότητα άρδευσης (μεταχείριση MS) στο μέλλον οδηγεί σε μια μείωση της παραγωγής στο εύρος 31 με 35%, ενώ στο παρόν η απώλεια περιορίζεται στο 28%. Επιπλέον, το ωσμωτικό στρες περιορίζει την αύξηση πρόσληψης ύδατος που επιβάλει η κλιματική αλλαγή στο εύρος 1 με 6%. Συνεπώς, η κλιματική αλλαγή αναμένεται να επιβαρύνει τις ήδη υποβαθμισμένες καλλιέργειες ακόμα περισσότερο, ενώ αντίθετα, η ορθότερη διαχείριση της ποιότητας των αρδευτικών υδάτων θα ενισχύσει τη δυνατότητα προσαρμογής των θερμοκηπιακών καλλιεργειών.

Η μεταβολή της κατανομής του αρδευτικού ύδατος μεταξύ πρόσληψης και στράγγισης εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής, οδήγησε σε σημαντικές μεταβολές στην εδαφική ποιότητα. Η κλιματική αλλαγή έως το 2100 προβλέπεται να μεταβάλει την προσομοιωμένη τελική ECse του καλλιεργητικού συστήματος από 4.7 dS m^{-1} στο εύρος 4.9 έως 9.5 dS m^{-1} για την εδαφική μεταχείριση LS ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο κλιματικής αλλαγής. Αντίθετα, τα ίδια σενάρια κλιματικής αλλαγής οδηγούν σε μικρές μεταβολές της τελικής ECse από 9.5 dS m^{-1} στο εύρος 8.3 με 10.3 dS m^{-1} για την αρδευτική μεταχείριση MS. Συμπερασματικά, οι ποιότητα των εδαφικών πόρων αναμένεται να υποβαθμιστεί σημαντικά στο μέλλον ανεξάρτητα από την ποιότητα της άρδευσης, ενώ η παραγωγή τομάτας προβλέπεται να πληγεί μόνο εάν ποιότητα της άρδευσης είναι υποβαθμισμένη. Ωστόσο, η ικανότητα του εδάφους να υποστηρίξει διαδοχικές καλλιεργητικές περιόδους τίθεται υπό αμφισβήτηση αφού η γονιμότητα του υποβαθμίζεται σε κάθε εξεταζόμενο σενάριο. Σε κάθε περίπτωση, η χρήση αρδευτικού ύδατος ικανοποιητικής ποιότητας αποτελεί τον πλέον ενδεδειγμένο τρόπο διατήρησης της παραγωγής και προσφέρει στον καλλιεργητή ευελιξία, αφού μπορεί να συνδυαστεί με άλλες μεθόδους στοχεύοντας στην προστασία του εδάφους.

Με βάση εργαστηριακές μετρήσεις ECse, των μετάλλων Na, Ca, Mg και K και τα αποτελέσματα ECse του μοντέλου SALTMED, αναπτύχθηκε μέθοδος μετατροπής των τελευταίων σε τιμές του δείκτη SAR για την βαθύτερη μελέτη της αλάτωσης ως αποτέλεσμα υφαλμύρισης των υπογείων υδάτων. Σύμφωνα με βιβλιογραφική μελέτη των συγγραφέων, αυτή είναι η πρώτη προσπάθεια μετατροπής των αποτελεσμάτων ECse του SALTMED σε SAR ως σήμερα. Η μέθοδος

βαθμονομήθηκε με δεδομένα της πειραματικής διάταξης και προσδιόρισε ικανοποιητικά την πραγματική SAR, αν και μεγαλύτερο πλήθος δειγμάτων απαιτείται για την βελτίωση της μεθόδου. Η μέθοδος εφαρμόστηκε στα σενάρια κλιματικής αλλαγής, με μεταβολές μεταξύ της υπάρχουσας κατάστασης και των μελλοντικών σεναρίων να σημειώνονται μόνο κατά την λήξη της καλλιεργητικής περιόδου.

Ξεπερνώντας τα πλαίσια της παρούσας εργασίας, το βαθμονομημένο μοντέλο SALTMED μπορεί να βρει νέες και εναλλακτικές χρήσεις στην βελτιστοποίηση του καλλιεργητικού συστήματος της περιοχής μελέτης. Για παράδειγμα, η διερεύνηση διαφορετικών ποικιλιών τομάτας, ή και άλλων καλλιεργητικών ειδών, μπορεί να οδηγήσει στον εντοπισμό πιο ανθεκτικών καλλιεργειών που να ανταπεξέλθουν καλύτερα και αποδοτικότητα στην υποβαθμισμένη άρδευση σε σύγκριση με την ποικιλία τομάτας Elpida. Επιπρόσθετα, στοχεύοντας στην διατήρηση της ποιότητας των εδαφών, ιδιαίτερα χρήσιμος είναι ο ακριβέστερος προσδιορισμός των επιπρόσθετων αναγκών άρδευσης που διατηρούν την ECse σε επίπεδα μικρότερα των 4 dS m^{-1} κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου ή της απαιτούμενης ποσότητας ύδατος για την μείωση της ECse πριν την φύτευση του επόμενου κύκλου καλλιεργειών μέσω έκπλυσης. Τέλος, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής δύναται να μελετηθούν και με τη μέθοδο των βαθμομερών που περιλαμβάνεται στο μοντέλο SALTMED. Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατός ο προσδιορισμός του χρονικού μήκους καλλιέργειας στο μέλλον αλλά και της χρονικής περιόδου αιχμής της παραγωγής προσφέροντας ένα εμπορικό πλεονέκτημα στους καλλιεργητές.

Καταλήγοντας, η ορθή διαχείριση των καλλιεργητικών συστημάτων παρουσιάζει πολλαπλά οφέλη, με την προστασία της αγροτικής παραγωγής να εξασφαλίζει την οικονομική ανάπτυξη σε τοπικό και εθνικό επίπεδο και την προστασία του περιβάλλοντος να διασφαλίζει την μελλοντική εξέλιξη του συστήματος και την ποιότητα διαβίωσης των ανθρώπων. Η ποιότητα, η επάρκεια και η διαχείριση των αρδευτικών υδάτων αποτελούν καθοριστικό στοιχείο για την βιώσιμη εκμετάλλευση των καλλιεργητικών συστημάτων, καθώς συνδέουν τα στοιχεία που το απαρτίζουν, δηλαδή τους εδαφικούς πόρους, τους υδατικούς πόρους και τη βλάστηση. Στα πλαίσια του Ερευνητικού Έργου RECARE, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας θα διαχυθούν στους ενδιαφερόμενους φορείς με σκοπό την προστασία του εδάφους και την παραγωγή τροφής.

6 Βιβλιογραφία

- Αγγελάκης & Tsombanoglou, 1995. Υγρά Απόβλητα: Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας και Ανάκτησης, Επαναχρησιμοποίηση και Διάθεση Εκροών. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ελλάδα.
- Βάγκνερ, Κ. & Τσάνης, Ι., 2016. Εγκατάσταση πειραματικής θερμοκηπιακής καλλιέργειας τομάτας και μελέτη επίδρασης του συμβιοτικού μύκητα *T. harzianum* υπό συνθήκες αλάτωσης, Χανιά, Κρήτης.
- Δεληγιάννη, Α. & Τσάνης, Ι., 2016. Επίδραση της αλατότητας άρδευσης και του μύκητα *T. harzianum* στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του εδάφους για θερμοκηπιακή καλλιέργεια, Χανιά, Κρήτης.
- Κουτσκουδής, Δ. & Τσάνης, Ι., 2016. Έλεγχος ποιότητας και απόδοσης παραγωγής καλλιέργειας τομάτας σε θερμοκήπιο, ύστερα από άρδευση με αλμυρό νερό και την επίδραση του ωφέλιμου μύκητα *T. harzianum*, Χανιά, Κρήτης.
- Abdel Gawad, G., Arslan, A., Gaihbe, A. & Kadouri, F., 2005. The effects of saline irrigation water management and salt tolerant tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria (1999-2002). *Agricultural Water Management*, 78(1–2), pp.39–53.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M., 1989. *Crop Evapotranspiration, Food and Agriculture Organization Irrigation and Drainage Paper No. 56*, Rome, Italy.
- Allison, L.E., 1964. Salinity in relation to irrigation. *Advances in Agronomy*, 16, pp.139–180.
- Aly, A.A., Al-Omran, A. & Khasha, A.A., 2015. Water management for cucumber : Greenhouse experiment in Saudi Arabia and modeling study using SALTMED model., 70(1), pp.1–11.
- Del Amor, F.M., Martinez, V. & Cerda, A., 2001. Salt tolerance of tomato plants as affected by stage of plant development. *HortScience*, 36, pp.1260–1263.
- Amundson, S., Deyton, D.E., Kopsell, D.A., Hitch, W., Moore, A. & Sams, C.E., 2012. Optimizing plant density and production systems to maximize yield of greenhouse-grown “Trust” tomatoes. *HortTechnology*, 22(1), pp.44–48.
- Apostolakis, A., Wagner, K., Daliakopoulos, I.N., Kourgialas, N.N. & Tsanis, I.K., 2016. Greenhouse Soil Moisture Deficit under Saline Irrigation and Climate Change. *Procedia Engineering*, 162, pp.537–544.

- Ayers, R.S. & Westcot, D.W., 1985. Water quality for agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Banwart, S., 2011. Save our soils. *Nature*, 474(7350), pp.151–152.
- Bastiaanssen, W.G.M., Allen, R.G., Droogers, P., D’Urso, G. & Steduto, P., 2007. Twenty-five years modeling irrigated and drained soils: State of the art. *Agricultural Water Management*, 92(3), pp.111–125.
- Battilani, A., Bonetti, G. & Di Lucca, G., 2002. Tomato root growth under different soil and climate conditions. *Acta Horticulturae*, 613, pp.47–56.
- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S. & Schlegel, J., 2009. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management*, 96(7), pp.1146–1154.
- van Beek, C.L. & Toth, G., 2012. Risk Assessment Methodologies of soil Threats in Europe, Office for Official Publication of the European Communities, Luxembourg, 2012. DOI:10.2788/47096
- Benton, J.J., 2008. *Tomato Plant Culture: In the Field, Greenhouse and Home Garden*, Second edition., CRC Press.
- Bolarin, M., Perex-Alfocea, F., Cano, E., Estan, M. & Caro, M., 1993. Growth, fruit yield and ion concentration in tomato epotypes after pre- and post-emergence salt treatment. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 167, pp.655–660.
- Brady, N. & Weil, R., 2011. *The nature & properties of soils*, 3rd edition. Pearson.
- Cardon, E.G. & Letey, J., 1992. Plant water uptake terms evaluated for soil water and solute movement models. *Soil Science Society of America Journal*, 56, pp.1887–1892.
- Daliakopoulos, I.N., Pappa, P., Grillakis, M.G., Varouchakis, E.A. & Tsanis, I.K., 2016. Modeling Soil Salinity in Greenhouse Cultivations Under a Changing Climate With SALTMED: Model Modification and Application in Timpaki, Crete. *Soil Science*, 181(6), pp.241–251.
- Daliakopoulos, I.N., Tsanis, I.K., Koutroulis, A., Kourgialas, N.N., Varouchakis, A.E., Karatzas, G.P. & Ritsema, C.J., 2016. The threat of soil salinity: A European scale review. *Science of the Total Environment*, 573, pp.727–739.
- van Dam, J.C., Stricker, J.N.M. & Droogers, P., 1994. Inverse method to determine soil hydraulic functions from multi-step outflow experiments. *Soil Science Society of America Journal*, 58, pp.647–652.

Davies, W.J., Kudoyarova, G. & Hartung, W., 2005. Long-distance ABA signaling and its relation to other signaling pathways in the detection of soil drying and the mediation of the plant's response to drought. *Journal of Plant Growth Regulation*, 24(4), pp.285–295.

DERM, 2011. Salinity management handbook, 2nd edition. The State of Queensland, Australia.

FAO, 2005. Global network on integrated soil management for sustainable use of salt-affected soils, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Fghire, R., Wahbi, S., Anaya, F., Ali, O.I. & Benlhabib, O., 2015. Response of quinoa to different water management strategies: field experiments and SALTMED model application results, *Irrigation and Drainage* 64(1): 29-40. DOI:10.1002/ird.1895.

Flowers, T.J., 2004. Improving crop salt tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 55, pp.307–319.

Flowers, T.J., Ragab, R., Malash, N., Gawad, G.A., Cuartero, J. & Arslan, A., 2005. Sustainable strategies for irrigation in salt-prone Mediterranean: SALTMED. *Agricultural Water Management*, 78(1–2), pp.3–14.

Flowers, T.J. & Yeo, A.R., 1986. Ion relations of plants under drought and salinity. *Journal of Plant Physiology*, 13, pp.75–91.

Fricke, W., 2004. Rapid and tissue specific accumulation of solutes in the growth zone of barley leaves in response to salinity. *Planta*, 219, pp.515–525.

van Genuchten, M.T., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), p.892.

Golabi, M., Naseri, A.A. & Kashkuli, H.A., 2009. Evaluation of SALTMED model performance in irrigation and drainage of sugarcane farms in Khuzestan province of Iran. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 7(2), pp.874–880.

Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Konzmann, M., Ludwig, F., Masaki, Y., Schewe, J., Stacke, T., Tessler, Z.D., Wada, Y. & Wisser, D., 2014. Global water resources affected by human interventions and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), pp.3251–3256.

Heiss, J.W., Ullman, W.J. & Michael, H.A., 2014. Swash zone moisture dynamics and unsaturated infiltration in two sandy beach aquifers. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 143, pp.20–31.

- Hirich, A., Fatnassi, H., Ragab, R. & Choukr-allah, R., 2016. Prediction of Climate Change impact on corn grown in the south of Morocco using the SALTMED model. 18, pp.9–18.
- Hirich, a., Choukr-Allah, R., Ragab, R., Jacobsen, S.-E.S.-E., El Youssfi, L. & El omari, H., 2012. The SALTMED model calibration and validation using field data from Morocco. *Journal of Materials and Environmental Science*, 3(2), pp.342–359.
- Ignacio, R.I. & Porporato, A., 2004. *Ecohydrology of Water-Controlled Ecosystems: Soil Moisture and Plant Dynamics*, Cambridge.
- Ioslovich, I., Gutman, P. & Seginer, I., 1996. A non-linear optimal greenhouse control problem with heating and ventilation. *Opt. Cont. Appl. Methods*, 17, pp.157–169.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*,
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*,
- Kaoutar, F., Abdelaziz, H., Ouafae, B., Redouane, C.-A. & Ragab, R., 2017. Yield and Dry Matter Simulation Using the Saltmed Model for Five Quinoa (*Chenopodium Quinoa*) Accessions Under Deficit Irrigation in South Morocco. *Irrigation and Drainage* (2017). DOI:10.1002/ird.2116
- Katerji, N., Van Hoorn, J.W., Hamdy, A. & Mastrorilli, M., 1998. Response of tomatoes, a crop of indeterminate growth, to soil salinity. *Agricultural Water Management*, 38(1), pp.59–68.
- Kaya, Ç.I. & Yazar, A., 2016. SALTMED model performance for quinoa irrigated with fresh and saline water in a Mediterranean environment. *Irrigation and Drainage*, 65, pp.29–37.
- Kaya, Ç.I., Yazar, A. & Sezen, S.M., 2015. SALTMED Model Performance on Simulation of Soil Moisture and Crop Yield for Quinoa Irrigated Using Different Irrigation Systems, *Irrigation Strategies and Water Qualities in Turkey. Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, pp.108–118.
- Koutroulis, A.G., Tsanis, I.K., Daliakopoulos, I.N. & Jacob, D., 2013. Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece. *Journal of Hydrology*, 479, pp.146–158.
- Kroes, J.G., Dam, J.C. Van, Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A. & Jacobs, C.M.J., 2008. *Theory description and user manual*. , p.262.

- Maas, E.V. & Hoffman, G.J., 1977. Crop salt tolerance, current assessment. *Irrigation and Drainage*, 103, pp.115–134.
- Maggio, A., Raimondi, G., Martino, A. & De Pascale, S., 2007. Salt stress response in tomato beyond the salinity tolerance threshold. *Environmental and Experimental Botany*, 59(3), pp.276–282.
- Mehanna, H.M. & Pipars, S.K., 2015. Validation of SALTMED Model under Different Water Regimes and N Fertilizer Rates for Snap Bean. , 8(10), pp.1–10.
- Mizrahi, Y., Taleisnik, E., Kagan-Zur, V., Zohas, Y., Offenbach, R., Matan, E. & Golan, R., 1988. A saline irrigation regime for improving tomato fruit quality without reductions yield. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 113, pp.202–205.
- Montenegro, S.G., Montenegro, A. & Ragab, R., 2010. Improving agricultural water management in the semi-arid region of Brazil: Experimental and modelling study. *Irrigation Science*, 28(4), pp.301–316.
- Munns, R., 2005. Genes and Salt Tolerance. *New Phytologist*, 167(3), pp.645–663.
- Munns, R. & Tester, M., 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual review of plant biology*, 59, pp.651–81.
- Paritsis, S., 2005. Simulation of seawater intrusion into the Tympaki aquifer, South Central Crete, Greece, Heraklion, Crete, Greece.
- Psarras, G., Bertaki, M. & Chartzoulakis, K., 2008. Response of greenhouse tomato to salt stress and K + supplement. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 142(1), pp.149–153.
- Pulvento, C., Lavini, A., Riccardi, M., d’Andria, R. & Ragab, R., 2015. Assessing Amaranth Adaptability in a Mediterranean Area of South Italy under Different Climatic Scenarios. *Irrigation and Drainage*, 64(1), pp.50–58.
- Pulvento, C., Riccardi, M., Lavini, A., D’andria, R. & Ragab, R., 2013. Saltmed model to simulate yield and dry matter for quinoa crop and soil moisture content under different irrigation strategies in south Italy. *Irrigation and Drainage*, 62(2), pp.229–238.
- R Core Team, 2014. R: a Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

- Ragab, R., 2002. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: The SALTMED model. *Environmental Modelling & Software*, 17, pp.345–361.
- Ragab, R., 2015. Integrated Management Tool for Water, Crop, Soil and N-Fertilizers: The Saltmed Model. *Irrigation and Drainage*, 64(1), pp.1–12.
- Ragab, R., 2013. User 's Guide for SALTMED 2013 Model.
- Ragab, R., Battilani, A., Matovic, G., Stikic, R., Psarras, G. & Chartzoulakis, K., 2015. SALTMED Model as an integrated management tool for water, crop, soil and N-fertilizer water management strategies and productivity: field and simulation study. 61, pp.13–28.
- Ragab, R. & Prudhomme, C., 2002. Climate Change and Water Resources Manegement in Arid and Semi-arid Regions: Prospective and Challenges for 21st Century. *Biosystem Engineering*, 81(1), pp.3–34.
- Rameshwaran, P., Tepe, A., Yazar, A. & Ragab, R., 2016. Effects of drip-irrigation regimes with saline water on pepper productivity and soil salinity under greenhouse conditions. *Scientia Horticulturae*, 199, pp.114–123.
- Rameshwaran, P., Tepe, A., Yazar, A. & Ragab, R., 2015. The Effect of Saline Irrigation Water on the Yield of Pepper: Experimental and Modelling Study. *Irrigation and Drainage*, 64(1), pp.41–49.
- Rath, K.M. & Rousk, J., 2015. Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling : A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 81, pp.108–123.
- Reina-Sánchez, A., Romero-Aranda, R. & Cuartero, J., 2005. Plant water uptake and water use efficiency of greenhouse tomato cultivars irrigated with saline water. *Agricultural Water Management*, 78(1–2), pp.54–66.
- Rengasamy, P., 2010. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology*, 37(7), pp.613–620.
- Rengasamy, P., 2006. World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57(5), pp.1017–1023.
- Rochdane, S., Bounoua, L., Zhang, P., Imhoff, M., Messouli, M. & Yacoubi-Khebiza, M., 2014. Combining Satellite Data and Models to Assess Vulnerability to Climate Change and Its Impact on Food Security in Morocco. *Sustainability*, 6(4), pp.1729–1746.
- Romero-Aranda, R., Soria, T. & Cuartero, J., 2001. Tomato plant-water uptake and plant-water relationships under saline growth conditions. *Plant Science*, 160(2), pp.265–272.

- Saadi, S., Todorovic, M., Tanasijevic, L., Pereira, L.S., Pizzigalli, C. & Lionello, P., 2015. Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural Water Management*, 147(June 2014), pp.103–115.
- Scholberg, J.M.S. & Locascio, S.J., 1999. Growth Response of Snap Bean and Tomato as Affected by Salinity and Irrigation Method. *HortScience*, 34(3), pp.259–264.
- Silva, L.L., Ragab, R., Duarte, I., Lourenço, E., Simões, N. & Chaves, M.M., 2013. Calibration and validation of SALTMED model under dry and wet year conditions using chickpea field data from Southern Portugal. *Irrigation Science*, 31(4), pp.651–659.
- Simunek, J., Genuchten, M. Van & Sejna, M., 2012. HYDRUS: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(1987), pp.1261–1274.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.T. & Šejna, M., 2008. Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. *Vadose Zone Journal*, 7(2), p.587.
- Simunek, J., Sejna, M., Saito, H., Sakai, M. & van Genuchten, M.T., 2009. “The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 4.08. HYDRUS Softw. Ser. 3. Dep. of Environ. Sci., Univ. of Calif., Riverside., (January), p.332.
- Singh, K., 2015. Microbial and Enzyme Activities of Saline and Sodic Soils. *Land degradation & development*.
- Snyder, R.G., 2007. *Greenhouse Tomato Handbook*. Mississippi State University Extension Service.
- Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E. & Raes, D., 2012. Crop yield response to water,
- 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, pp.54–68.
- Taylor, R.G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J.S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T.R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M.F.P., MacDonald, A., Fan, Y., Maxwell, R.M., Yechieli, Y., Gurdak, J.J., Allen, D.M., Shamsudduha, M., Hiscock, K., Yeh, P.J.-F., Holman, I. & Treidel, H., 2012. Ground water and climate change. *Nat. Clim. Chang.*, 3, pp.322–329.

Thanopoulos, R., Samaras, S., Ganitis, K., Gatzelakis, C., Kotaki, E., Psaras, E., Kipriotakis, Z., Tzitzikas, E., Kalaitzis, P., Terzopoulos, P. & Mpempeli, P., 2008. Local varieties of cultivated species in Crete emphasizing on vegetables: A potential for multiple use. *Agriculture - Livestock*, 9.

United Nations, 2006. *World Population Prospects The 2006 Revision Highlights - Working Paper No. ESA/p/WP.202*. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, pp.1–114.

Vafidis, A., Andronikidis, N., Hamdan, H., Kritikakis, G., Economou, N. Panagopoulos, G., Souprios, P., Steiakakis, E. ManoutVafidis, A. Andronikidis, N., Hamdan, H., Kritikakis, G., Economou, N. Panagopoulos, G., Souprios, P. & Steiakakis, E. Manoutsoglou, E., 2013. The Clearwater Project: Preliminary results from the geophysical survey in Tympaki, Crete, Greece. *Bull. Geol. Soc. Greece*, 47.

Vrochidou, A.E.K., Tsanis, I.K., Grillakis, M.G. & Koutroulis, A.G., 2013. The impact of climate change on hydrometeorological droughts at a basin scale. *Journal of Hydrology*, 476, pp.290–301.

Wan, S., Kang, Y., Wang, D., Liu, S.P. & Feng, L.P., 2007. Effect of drip irrigation with saline water on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) yield and water use in semi-humid area. *Agricultural Water Management*, 90(1–2), pp.63–74.

Yurtseven, E., Kesmez, G.D. & Ünlükara, A., 2005. The effects of water salinity and potassium levels on yield, fruit quality and water consumption of a native central anatolian tomato species (*Lycopersicon esculantum*). *Agricultural Water Management*, 78(1–2), pp.128–135.

Zappa, M. & Gurtz, J., 2003. during the 1999 MAP-Riviera Campaign. *Landscape Research*, 7(6), pp.903–919.

Zhai, Y., Yang, Q. & Hou, M., 2015. The effects of saline water drip irrigation on tomato yield, quality, and blossom-end rot incidence - a 3a case study in the South of China. *PLoS ONE*, 10(11), pp.1–17.

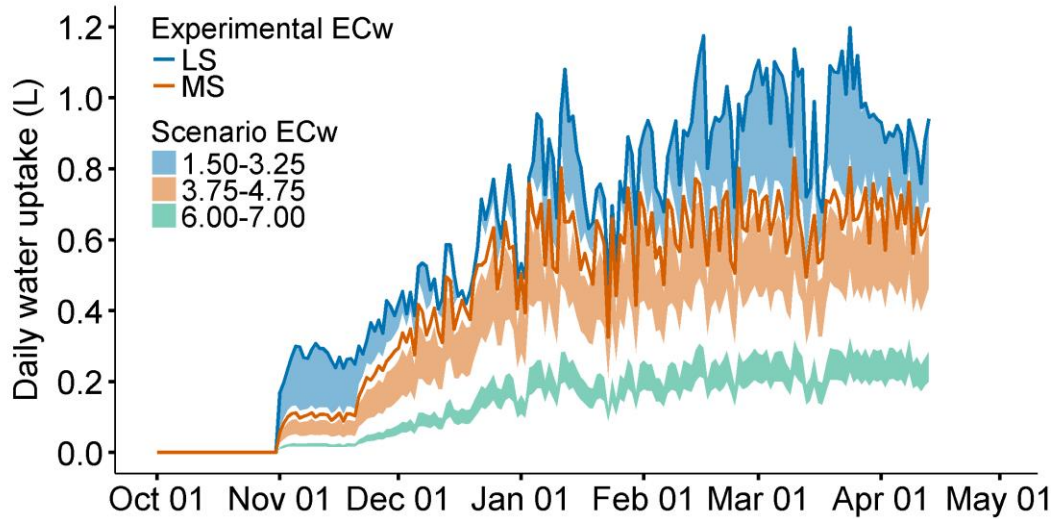
Zhai, Y., Yang, Q. & Wu, Y., 2016. Soil salt distribution and tomato response to saline water irrigation under straw mulching. *PLoS ONE*, 11(11), pp.1–17.

Zhang, P., Senge, M. & Dai, Y., 2017. Effects of Salinity Stress at Different Growth Stages on Tomato Growth, Yield, and Water-Use Efficiency. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(6), pp.624–634.

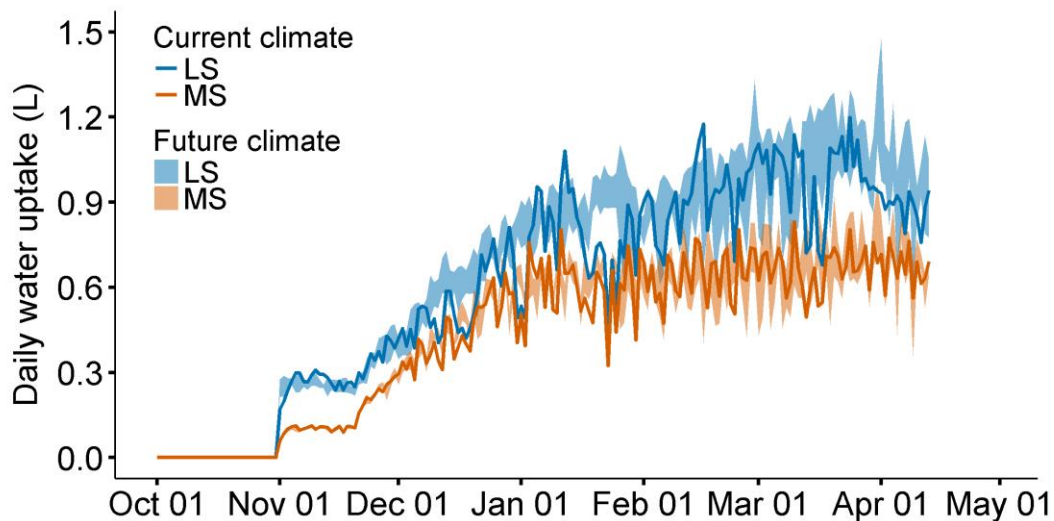
Zhu, J.K., 2001. Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science*, 6(2), pp.66–71.

7 Παράρτημα

7.1 Πρόσληψη ύδατος σε ημερήσιο βήμα

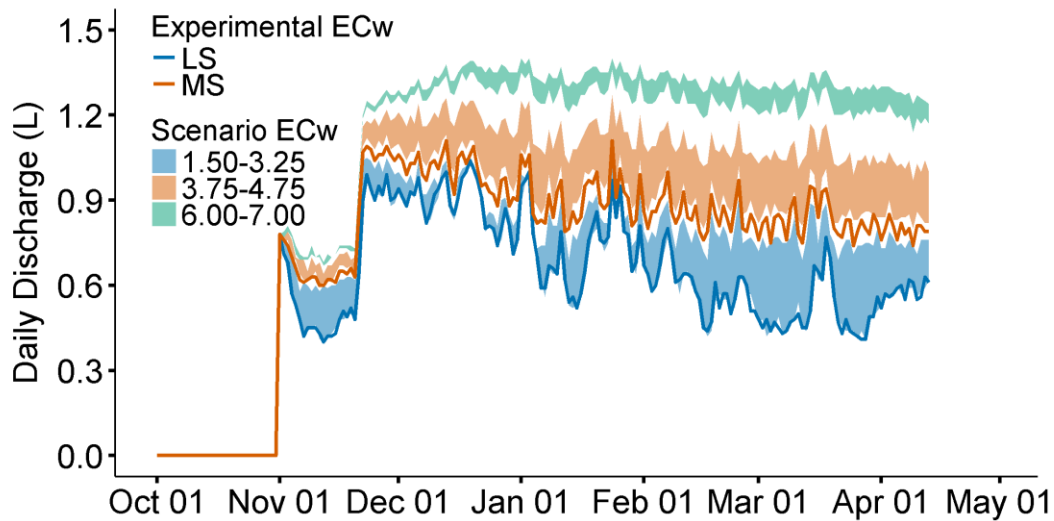


Εικόνα 7.1: Ημερήσια προσομοιωμένη πρόσληψη ύδατος για την καλλιέργεια τομάτας υπό άρδευση διαφορετικών ποιοτήτων ύδατος κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου. Οι εφαρμοζόμενες ποιότητες άρδευσης χαρακτηρίζονταν από EC_w 1.10 και 3.50 $dS\ m^{-1}$ που αποτελούν τις μεταχειρίσεις LS και MS και επιπλέον από τρεις ομάδες σεναρίων που περιλάμβαναν τα 1.50, 2.00, 2.50, 3.00, 3.25, τα 3.75, 4.00, 4.25, 4.50, 4.75 και τα 6.00, 6.50, 7.00 $dS\ m^{-1}$, αντίστοιχα.

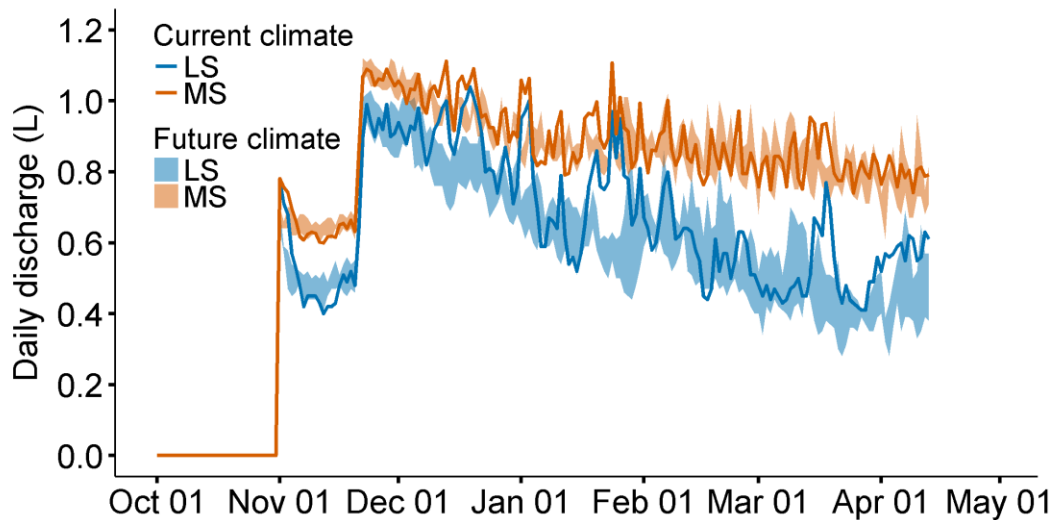


Εικόνα 7.2: Ημερήσια προσομοιωμένη πρόσληψη ύδατος για την καλλιέργεια τομάτας υπό τις μεταχειρίσεις χαμηλής (LS) και μέσης (MS) ποιότητας άρδευσης κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου. Η αθροιστική πρόσληψη ύδατος προσδιορίστηκε με χρήση του μοντέλου SALTMED για τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες και τα εξεταζόμενα μελλοντικά σενάρια κλιματικής αλλαγής.

7.2 Στράγγιση ύδατος σε ημερήσιο βήμα

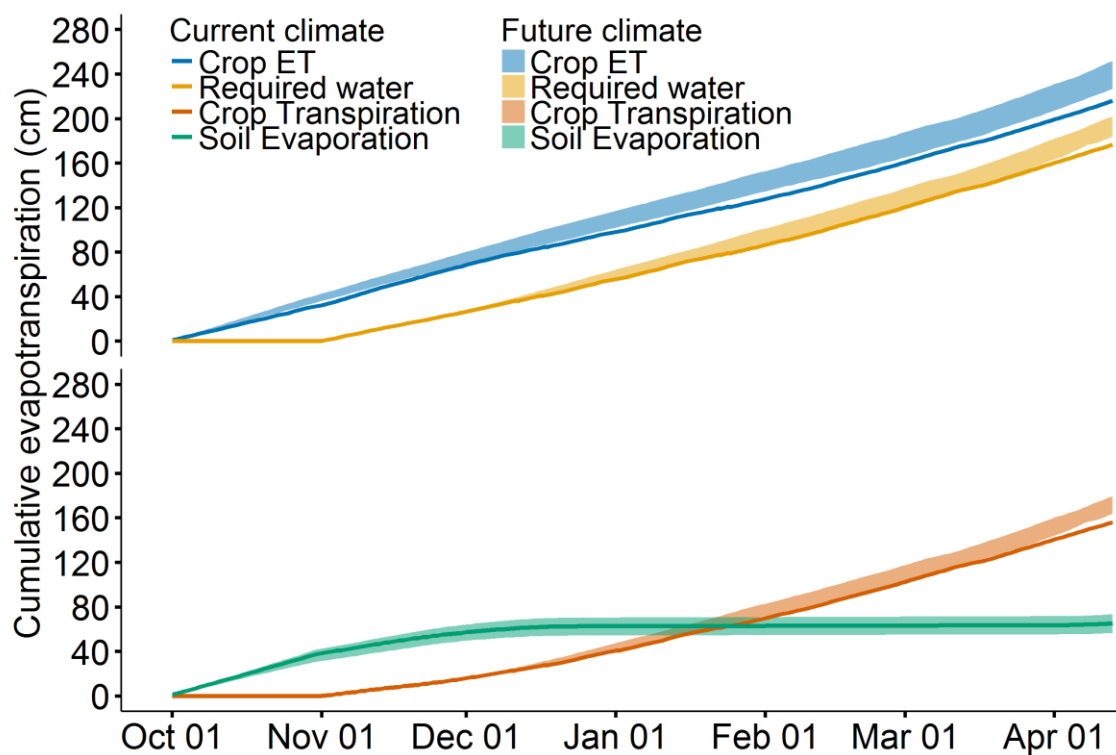


Εικόνα 7.3: Ημερήσια προσομοιωμένη στράγγιση για την καλλιέργεια τομάτας υπό άρδευση διαφορετικών ποιότητων ύδατος κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου. Οι εφαρμοζόμενες ποιότητες άρδευσης χαρακτηρίζονταν από EC_w 1.10 και 3.50 $dS\ m^{-1}$ που αποτελούν τις μεταχειρίσεις LS και MS και επιπλέον από τρεις ομάδες σεναρίων που περιλάμβαναν τα 1.50, 2.00, 2.50, 3.00, 3.25, τα 3.75, 4.00, 4.25, 4.50, 4.75 και τα 6.00, 6.50, 7.00 $dS\ m^{-1}$, αντίστοιχα.



Εικόνα 7.4: Ημερήσια προσομοιωμένη στράγγιση για την καλλιέργεια τομάτας υπό τις μεταχειρίσεις χαμηλής (LS) και μέσης (MS) ποιότητας άρδευσης κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου. Η αθροιστική πρόσληψη ύδατος προσδιορίστηκε με χρήση του μοντέλου SALTMED για τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες και τα εξεταζόμενα μελλοντικά σενάρια κλιματικής αλλαγής.

7.3 Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας σε αθροιστικό βήμα



Εικόνα 7.5: Αθροιστική προσομοιωμένη εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας, διαπνοή βλάστησης, εξατμηση εδάφους και απαιτούμενο νερό καλλιέργειας τομάτας για τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες και τα μελλοντικά σενάρια κλιματικής αλλαγής κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου.