



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ:**

**ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΕΔΑΦΗ  
ΕΠΙΒΑΡΥΜΕΝΑ ΜΕ ΑΛΑΤΩΣΗ**

**ΠΑΠΠΑ ΠΟΛΥΞΕΝΗ**

**A.M.: 2013057326**

Καθηγητής Τσάνης Ιωάννης (Επιβλέπων)

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος

Δρ. Κουτρούλης Αριστείδης

**ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2015**



# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	8
Summary .....	9
Ευχαριστίες.....	10
1. Εισαγωγή.....	11
1.1 Υποβάθμιση εδαφών και αλάτωση.....	11
1.2 Επίδραση της αλάτωσης στα φυτά .....	13
1.3 Η ντομάτα.....	14
1.4 Μοντελοποίηση αλάτωσης.....	17
1.5 Κλιματικά μοντέλα.....	17
1.6 Η χάραξη πολιτικής από την Ε.Ε.....	20
2 Μεθοδολογία .....	22
2.1 Βασικές εξισώσεις SALTMED .....	22
2.2 Χρήση μοντέλου SALTMED – εισαγωγή δεδομένων .....	26
2.2.1 Καρτέλα κλίματος (Climate) .....	27
2.2.2 Καρτέλα εξατμισοδιαπνοής (Evapotranspiration).....	28
2.2.3 Καρτέλα άρδευσης (Irrigation).....	29
2.2.4 Καρτέλα καλλιεργειών (Crops).....	32
2.2.5 Καρτέλα αζώτου (Nitrogen) .....	35
2.2.6 Καρτέλα γενικών δεδομένων (General) .....	36
2.2.7 Καρτέλα των προφίλ (Profiles) .....	37
3 Περιοχή μελέτης.....	39
3.1 Τυμπάκι .....	39
3.2 Επεξεργασία σεναρίων .....	42
3.2.1 Σενάρια διαφορετικών συνθηκών αγωγιμότητας .....	42
3.2.2 Σενάρια διαφορετικών συνθηκών κλίματος .....	43
4 Αποτελέσματα .....	45
4.1 Αποτελέσματα σεναρίων μεταβαλλόμενης αγωγιμότητας.....	45

4.1.1	Προφίλ της αλάτωσης .....	45
4.1.2	Απόδοση καλλιέργειας .....	50
4.2	Αποτελέσματα σεναρίων μεταβαλλόμενων συνθηκών κλίματος.....	53
4.2.1	Προφίλ της αλάτωσης .....	53
4.2.2	Απόδοση καλλιέργειας .....	55
5	Συμπεράσματα και προτάσεις .....	57
5.1	Συμπεράσματα.....	57
5.2	Προτάσεις.....	58
	Βιβλιογραφία.....	59

## Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1: Μεθοδολογία της εργασίας .....	26
Εικόνα 2: Η καρτέλα Global Parameters.....	27
Εικόνα 3: Η εισαγωγή των δεδομένων καιρού στην καρτέλα κλίματος (Climate).....	28
Εικόνα 4: Η καρτέλα υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής (Evapotranspiration).....	29
Εικόνα 5: Η καρτέλα άρδευσης.....	30
Εικόνα 6: Παράδειγμα από κατανομή υγρασίας (Output του μοντέλου) στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου .....	31
Εικόνα 7: Παράδειγμα από κατανομή αλάτωσης (Output του μοντέλου) στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου .....	31
Εικόνα 8: Παράδειγμα από προφίλ αλάτωσης εδάφους (Output του μοντέλου) .....	32
Εικόνα 9: Η καρτέλα των καλλιεργειών.....	32
Εικόνα 10: Η καρτέλα New για τη δημιουργία καλλιέργειας .....	33
Εικόνα 11: Η καρτέλα του αζώτου (Nitrogen).....	35
Εικόνα 12: Η καρτέλα General που περιλαμβάνει τα γενικά χαρακτηριστικά του εδάφους ..	36
Εικόνα 13: Παράδειγμα κατανομής σχετικής συγκέντρωσης αλατιού στο έδαφος (Output μοντέλου) (drip irrigation).....	37
Εικόνα 14: Η καρτέλα Profiles στην οποία εισάγονται οι αποστάσεις των προφίλ από το σημείο άρδευσης .....	38
Εικόνα 15: Η περιοχή μελέτης του Τυμπακίου .....	39
Εικόνα 16: Τιμές αγωγιμότητας νερού γεώτρησης στην περιοχή μελέτης .....	40
Εικόνα 17: Το σταθμήμετρο κατά τη διάρκεια μετρήσεων σε γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης. ....	40
Εικόνα 18: Κατανομές παρούσας (πράσινο) και μελλοντικής (κόκκινο) θερμοκρασίας για τα 4 μοντέλα που εξετάζονται.....	44
Εικόνα 19: Προφίλ αλάτωσης για τα όλα τα εξεταζόμενα σενάρια αγωγιμότητας για την καλλιέργεια της ντομάτας .....	46
Εικόνα 20: Το ριζικό σύστημα του φυτού της ντομάτας.....	47
Εικόνα 21: Προφίλ αλάτωσης για τα όλα τα εξεταζόμενα σενάρια αγωγιμότητας για την καλλιέργεια της μελιτζάνας.....	47
Εικόνα 22: Το ριζικό σύστημα του φυτού της μελιτζάνας.....	48
Εικόνα 23: Προφίλ αλάτωσης για τα όλα τα εξεταζόμενα σενάρια αγωγιμότητας για την καλλιέργεια της πιπεριάς.....	48
Εικόνα 24: Το ριζικό σύστημα του φυτού της πιπεριάς. ....	49
Εικόνα 25: Απόδοση καλλιέργειας ντομάτας για την παρούσα κλιματική κατάσταση (όλα τα σενάρια).....	50

Εικόνα 26: Απόδοση καλλιέργειας μελιτζάνας για την παρούσα κλιματική κατάσταση (όλα τα σενάρια).....	50
Εικόνα 27: Απόδοση καλλιέργειας πιπεριάς για την παρούσα κλιματική κατάσταση (όλα τα σενάρια).....	51
Εικόνα 28: Πτώση απόδοσης καλλιέργειας της ντομάτας συγκρίνοντας τα δύο ακραία σενάρια.....	52
Εικόνα 29: Πτώση απόδοσης καλλιέργειας της μελιτζάνας συγκρίνοντας τα δύο ακραία σενάρια.....	52
Εικόνα 30: Πτώση απόδοσης καλλιέργειας της πιπεριάς συγκρίνοντας τα δύο ακραία σενάρια.....	53
Εικόνα 31: Προφίλ αλάτωσης με αρδευτικά ύδατα αγωγιμότητας 2dS/m για την καλλιέργεια της ντομάτας για την παρούσα (πράσινη γραμμή) και τη μελλοντική (κόκκινη γραμμή) κλιματική κατάσταση.....	54
Εικόνα 32: Προφίλ αλάτωσης με αρδευτικά ύδατα αγωγιμότητας 2dS/m για την καλλιέργεια της μελιτζάνας για την παρούσα (πράσινη γραμμή) και τη μελλοντική (κόκκινη γραμμή) κλιματική κατάσταση.....	54
Εικόνα 33: Προφίλ αλάτωσης με αρδευτικά ύδατα αγωγιμότητας 2dS/m για την καλλιέργεια της πιπεριάς για την παρούσα (πράσινη γραμμή) και τη μελλοντική (κόκκινη γραμμή) κλιματική κατάσταση.....	54
Εικόνα 34: Σύγκριση απόδοσης καλλιέργειας ντομάτας παρόν (μπλε καμπύλη) – μέλλον (πορτοκαλί καμπύλη) (αγωγιμότητα νερού 2dS/m).....	55
Εικόνα 35: Σύγκριση απόδοσης καλλιέργειας μελιτζάνα παρόν (μπλε καμπύλη) – μέλλον (πορτοκαλί καμπύλη) (αγωγιμότητα νερού 2dS/m).....	56
Εικόνα 36: Σύγκριση απόδοσης καλλιέργειας πιπεριά παρόν (μπλε καμπύλη) – μέλλον (πορτοκαλί καμπύλη) (αγωγιμότητα νερού 2dS/m).....	56



## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι επιπτώσεις της αλάτωσης του εδάφους σε καλλιέργειες θερμοκηπίων. Τα εξεταζόμενα σενάρια είναι τα εξής: (α) νερό άρδευσης σε εύρος αγωγιμότητας μεταξύ 1 dS/m και 3 dS/m, (β) αντικατάσταση καλλιέργειας για αυξημένη αντοχή και (γ) κλιματική ποικιλία με σκοπό να υπολογιστεί η επίδραση της κλιματικής αλλαγής. Προκειμένου να εξαχθούν ουσιαστικά συμπεράσματα, είναι απαραίτητη η χρήση ενός μοντέλου που λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση της αλάτωσης με παράγοντες όπως: η βλάστηση, το έδαφος, το νερό άρδευσης και οι κλιματικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε το μοντέλο SALTMED.

Το μοντέλο SALTMED είναι ένα αξιόπιστο και δοκιμασμένο μοντέλο φυσικών διεργασιών που προσομοιώνει την εξατμισοδιαπνοή, την πρόσληψη νερού και διαλυτών στοιχείων από το φυτό με σκοπό τον υπολογισμό της απόδοσης καλλιέργειας και της παραγόμενης βιομάζας από όλα τα αρδευτικά συστήματα. Το SALTMED δοκιμάστηκε με τα παραπάνω σενάρια στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος RECARE (FP7) με περιοχή μελέτης το Τυμπάκι, στην περιφερειακή ενότητα Ηρακλείου Κρήτης. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για κάποιες από τις τυπικές καλλιέργειες της περιοχής των ειδών *Solanum lycopersicum* (ντομάτα), *Capsicum annuum* (πιπεριά) και *Solanum melongena* (μελιτζάνα).

Τα αποτελέσματα αφορούν τη δημιουργία των προφίλ της αλάτωσης και την απόδοση της καλλιέργειας. Όπως, αποδείχθηκε, η αλάτωση είναι εντονότερη όταν η αγωγιμότητα του νερού και του εδάφους είναι υψηλή. Αυτό σημαίνει ότι είναι αποτέλεσμα της ποιότητας του νερού άρδευσης επηρεάζοντας και την απόδοση της καλλιέργειας. Η καλλιέργεια της ντομάτας παρουσίασε τη μεγαλύτερη πτώση απόδοσης σε σχέση με τις υπόλοιπες εξεταζόμενες καλλιέργειες. Πιο συγκεκριμένα, βάσει σεναρίων η πτώση μπορεί να ξεπεράσει το 67% σε σχέση με την μέγιστη δυνατή απόδοση καλλιέργειας. Επιπλέον, η αλάτωση και η έκτασή της στο έδαφος εξαρτάται από το είδος της καλλιέργειας. Η καλλιέργεια της ντομάτας, βάσει των αποτελεσμάτων δείχνει να συμβάλλει σε μεγαλύτερο βαθμό στην αλάτωση σε σχέση με τις καλλιέργειες της μελιτζάνας και της πιπεριάς. Η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι επίσης ένας παράγοντας που συμβάλλει στην όξυνση του φαινομένου.



## Summary

In this study we assess the effects of soil salinization on greenhouse crops. The study deals with the following scenarios: (a) variation of irrigation water salinity from 1 dS/m to 3 dS/m, (b) crop substitution for increased tolerance and (c) climatic variability to account for the impact of climate change. In order to draw meaningful conclusions, a model that takes into account vegetation interaction, soil, irrigation water and climate variables is required. The SALTMED model is a reliable and tested physical process model that simulates evapotranspiration, plant water uptake, water and solute transport to estimate crop yield and biomass production under all irrigation systems. SALTMED is tested with the above scenarios under the European FP7 funded Project **RECARE**, (case study Timpaki, Crete, Greece). Simulations are conducted for typical cultivations of *Solanum lycopersicum*, *Capsicum annuum* and *Solanum melongena*.

The results of this study include the creation of the salinization profiles in soil and the crop yield of the cultivations of tomato, eggplant, and pepper. Results indicate that salinization is more acute when water and soil salinity have high values. It is also observed that salinization depends on the irrigation water quality and the crop and diminishes the crop yield. The cultivation of tomato had the highest crop yield decline in comparison to the rest of the examined cultivations. More specifically, according to the examined scenarios the crop yield decline of tomato can be over 67% compared with the highest possible crop yield. In addition, the cultivation of tomato has the biggest impact on the soil salinization amongst the examined cultivations. Finally, the temperature change is a factor that triggers the salinization effects.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Ιωάννη Τσάνη, ο οποίος ήταν επιβλέπων στη μεταπτυχιακή διατριβή μου, για τη γνώση και τη καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Γεώργιο Καρατζά και τον Δρ. Αριστείδη Κουτρούλη για τη συνεισφορά τους κατά τη συζήτηση των αποτελεσμάτων της εργασίας μου και για τα σχόλιά τους στο κείμενο της μεταπτυχιακής διατριβής.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής για τη συμπαράσταση σε όλα τα θέματα που προκύπτουν σε ένα εργασιακό περιβάλλον. Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Δαλιακόπουλο για την επιπλέον καθοδήγηση και για την υποστήριξη της ερευνητικής μου δραστηριότητας καθ' όλη τη διάρκειά της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς και τις αδερφές μου για την ηθική στήριξή τους και πάνω από όλα το σύζυγό μου Σωτήρη Παπαντωνίου που πιστεύει σε μένα και με στηρίζει σε ό,τι δυσκολία και να αντιμετωπίζω.

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Υποβάθμιση εδαφών και αλάτωση

Η υποβάθμιση εδαφών είναι η επιδείνωση της ποιότητάς τους που καταστρέφει μέρος ή όλες τις λειτουργίες τους. Η έννοια «λειτουργίες του εδάφους» περιλαμβάνει τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 1: Οι λειτουργίες του εδάφους [1], [2]

Λειτουργίες του εδάφους	Επεξήγηση
Παραγωγή βιομάζας	Παραγωγή τροφίμων ή фураμάτων, καύσιμης ύλης, κλπ.
Αποθήκευση, φιλτράρισμα και μετατροπή υλικών	Διεργασίες κατά τις οποίες συγκρατούνται στερεές, υγρές ή αέριες, οργανικές και ανόργανες ουσίες
Ενδιαίτημα πολλών οργανισμών	Τα εδάφη είναι η βάση της βιοποικιλότητας
Φυσικό και πολιτισμικό περιβάλλον για την ανθρωπότητα	Το έδαφος είναι η φυσική βάση για την τεχνική, τεχνολογική, βιομηχανική και κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη και τις κατασκευές
Πηγή πρώτων υλών	Οι πρώτες ύλες είναι η βάση για την τεχνική , τεχνολογική και την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη
Δεξαμενή άνθρακα	Αποθήκευση και ανακύκλωση οργανικών ουσιών
Αρχείο γεωλογικής και αρχαιολογικής κληρονομιάς	Είναι βασικό μέρος του τοπίου, κρύβει και προστατεύει παλαιοντολογικά και αρχαιολογικά ευρήματα υψηλής αξίας

Ο κίνδυνος της υποβάθμισης εξαρτάται είτε από φυσικά αίτια (ιδιότητες του εδάφους, κλίμα κλπ), που μπορούν να την ευνοήσουν, είτε από ανθρωπογενείς παράγοντες (γεωργία, βιομηχανία, αστική ανάπτυξη κλπ). Οι κύριοι κίνδυνοι υποβάθμισης των εδαφών [2], είναι:

1. Η μείωση της οργανικής ύλης
2. Η διάβρωση του εδάφους
3. Η συμπίεση του εδάφους

4. Οι κατολισθήσεις
5. Οι πλημμύρες
6. Η ρύπανση
7. Η κάλυψη του εδάφους με έργα υποδομής
8. Η αλάτωση

Στην Ευρώπη εντοπίζονται σε πολλά σημεία προβλήματα υποβάθμισης εδάφους και (ανά περιοχές) αλάτωσης. Η αλάτωση έχει προκύψει είτε φυσικά, είτε λόγω ανθρωπογενών παραγόντων, όπως μη αποδοτικές πρακτικές άρδευσης, χρήση αρδευτικού ύδατος με υψηλή συγκέντρωση αλάτων, περιορισμένη αποστράγγιση των καλλιεργειών. Έχει υπολογιστεί ότι η αλάτωση έχει επηρεάσει περίπου 3.8 εκατ. ha στην Ευρώπη. Τα σημεία όπου έχει προκύψει φυσικά βρίσκονται σε χώρες όπως η Ισπανία, η Ουγγαρία, η Βουλγαρία και η Ελλάδα. Η ανθρωπογενής αλάτωση έχει επηρεάσει σημαντικά τμήματα της Σικελίας, την πεδιάδα του Έβρου στην Ισπανία και αρκετά σημεία στην Ιταλία, Ουγγαρία, Πορτογαλία, Γαλλία, Σλοβακία, Ρουμανία και Ελλάδα [3].

Η αλάτωση (salinization) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο συγκεντρώνονται άλατα στην επιφάνεια του εδάφους. Χαρακτηρίζεται σύμφωνα με τις συγκεντρώσεις των διαλυτών αλάτων και διακρίνεται σε κατηγορίες ανάλογα με την τιμή της αγωγιμότητας (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Χαρακτηρισμός εδάφους ως προς την αλάτωση [4]

Χαρακτηρισμός	Αγωγιμότητα (dS/m)
Χωρίς αλάτωση	0-2
Ελαφρά αλάτωση	2-4
Ασθενής αλάτωση	4-8
Μέτρια αλάτωση	8-15
Μεγάλη αλάτωση	>15

Η αλάτωση μπορεί να προκύψει με φυσικό τρόπο σε περιοχές χαμηλού γεωργικού ενδιαφέροντος ή μέσω της αποψίλωσης των δασών και των αντλήσεων (δευτερογενής αλάτωση). Οι επιδράσεις στη βλάστηση περιλαμβάνουν τη μείωση του δυναμικού του νερού, την τοξικότητα λόγω των ιόντων Na και Cl, καθώς και την παρέμβαση στην απορρόφηση των θρεπτικών [5]. Η αλάτωση προκαλεί καθιζήσεις, διάβρωση του εδάφους και διαταραχή στην πρόσληψη νερού και θρεπτικών από τις ρίζες του φυτού [4]. Τέλος, συμβάλλει στη διόγκωση και στη διασπορά της αργίλου επηρεάζοντας τις υδραυλικές ιδιότητες και τη δομή του εδάφους.

Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο υπόγεια ύδατα για την κάλυψη των υδατικών αναγκών. Οι υδροφορείς βρίσκονται κυρίως σε ανθρακικά πετρώματα (καρστικά) και χονδρόκοκκες Νεογενείς και Τεταρτοταγείς εναποθέσεις (πορώδη). Έχει παρατηρηθεί εντατικοποίηση των αντλήσεων τις τελευταίες δεκαετίες λόγω αστικοποίησης, τουριστικής ανάπτυξης και επέκτασης των αρδευόμενων εκτάσεων, ιδιαίτερα σε παράκτιες περιοχές. Η εντατικοποίηση έχει προκαλέσει υφαλμύριση σε πολλούς υδροφορείς, ιδίως σε περιοχές τα νότιας Ελλάδας, όπου επικρατούν ξηροθερμικές κλιματικές συνθήκες [6].

Παρόλο που η άρδευση με νερό υψηλής αγωγιμότητας ελλοχεύει περιορισμούς στις καλλιέργειες, σε ορισμένα μέρη του κόσμου γίνεται χρήση αυτού του νερού, καθώς είναι λύση ανάγκης σε περιπτώσεις υδατικής ανεπάρκειας. Για να επιτευχθεί η καλλιέργεια με υφάλμυρο νερό για μεγάλο χρονικό διάστημα είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται κατάλληλες μέθοδοι καλλιέργειας. Το κλειδί για τη διαχείριση της αλάτωσης είναι η ολοκληρωμένη διαχείριση του αρδευτικού νερού, η σωστή επιλογή της καλλιέργειας και ο συνυπολογισμός του κύκλου του νερού [7], [8]. Η κατανόηση των επιλογών βελτίωσης του εδάφους που έχει υποστεί αλάτωση είναι σημαντικό βήμα για μια βιώσιμη καλλιέργεια. Η έκπλυση των αλάτων από τα ανώτερα στα κατώτερα στρώματα είναι η επικρατέστερη μέθοδος μεταξύ άλλων για τη βελτίωση από το φαινόμενο. Παρόλο που μια τέτοια πρακτική μπορεί να δώσει προσωρινά αποτελέσματα, η αλόγιστη χρήση του νερού που προέρχεται από την έκπλυση είναι ένας από τους λόγους που οδήγησε σταδιακά σε υποβάθμιση της γης [9].

## 1.2 Επίδραση της αλάτωσης στα φυτά

Η αλάτωση έχει αρνητικές επιπτώσεις στα εδαφικά οικοσυστήματα και στην ανοχή τους στα άλατα, καθώς οι υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων προκαλούν θάνατο στα φυτά ή δραστική μείωση της παραγωγής.

Με τη συσσώρευση αλάτων στο έδαφος αυξάνει η ωσμωτική πίεση της ακόρεστης ζώνης. Το φαινόμενο αυτό συνεπάγεται μικρή λήψη θρεπτικών ουσιών, μειωμένη ανάπτυξη και μαρασμό του φυτού, ακόμα και αν το έδαφος έχει αρκετή υγρασία. Η αλάτωση του εδάφους μειώνει την εξατμισοδιαπνοή καθιστώντας το νερό λιγότερο βιοδιαθέσιμο. Όταν η συγκέντρωση των αλάτων στο έδαφος ξεπερνά αυτή των ριζών, τότε προκαλείται αφυδάτωση[4].

Τα φυτά προκειμένου να επιβιώσουν έχουν αναπτύξει μηχανισμούς είτε για να απομακρύνουν τα άλατα είτε να ανέχονται τις υψηλές τιμές αγωγιμότητας [10]. Η δράση των αλάτων ξεκινάει από το ριζικό σύστημα, καθώς επηρεάζει τον τρόπο πρόσληψης νερού και ιόντων και στη συνέχεια την παραγωγή ορμονών. Οι ορμόνες είναι οι μεταφορείς των σημάτων από τις ρίζες στο βλαστό [11]. Οι επιδράσεις των αλάτων στο φυτό φαίνονται σε

κύριες διεργασίες του φυτού, όπως η φωτοσύνθεση, η πρωτεϊνοσύνθεση, ο μεταβολισμός ενέργειας και λιπιδίων [10] και η λήψη θρεπτικών ουσιών. Η χαμηλή λήψη θρεπτικών από μια καλλιέργεια οδηγεί σε αργό ρυθμό ανοργανοποίησης του οργανικού αζώτου [4]. Η αντοχή των φυτών στα άλατα είναι αποτέλεσμα πολλαπλών βιοχημικών μονοπατιών που διευκολύνουν την απορρόφηση του νερού, προστατεύουν τις λειτουργίες της χλωροφύλλης και διατηρούν την ομοιόσταση των ιόντων. Τα πιο σημαντικά μονοπάτια είναι εκείνα που έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή μεταβολιτών, πρωτεϊνών και ελεύθερων ριζών. Το ζητούμενο είναι τα φυτά να μπορούν να αποδομούν τις ελεύθερες ρίζες υπό συνθήκες αλάτωσης. Αρκετά φυτικά είδη που παρουσιάζουν αντοχή στα άλατα έχουν το χαρακτηριστικό ότι συσσωρεύουν μετουσιωμένους μεταβολίτες που προστατεύουν τις ρίζες. Τέλος, η ανάπτυξη των φυτών μειώνεται εξ' αιτίας της φραγής των στομάτων. Ο λόγος  $\text{CO}_2$  προς  $\text{O}_2$  μειώνεται και εμποδίζεται η δέσμευση  $\text{CO}_2$ , με αποτέλεσμα να μειώνεται η αύξηση του ύψους του φυτού, η μεγέθυνση και η διαίρεση των κυττάρων [4].

Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη όλους αυτούς τους παράγοντες, ως αντοχή στην αλάτωση θεωρείται η ικανότητα του φυτού να αναπτύσσεται και να ολοκληρώνει τον κύκλο ζωής του σε υπόστρωμα με υψηλές συγκεντρώσεις διαλυτών αλάτων. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η μείωση της ανάπτυξης του φυτού δε μπορεί να περιοριστεί στην περιγραφή μιας και μόνο διεργασίας. Η σπουδαιότερη φυσιολογική διεργασία ενός φυτού είναι η φωτοσύνθεση. Η ανάπτυξη ενός φυτού με την έννοια της παραγωγής φυτικής βιομάζας είναι ένα μέτρο της καθαρής φωτοσύνθεσης. Αυτές οι δύο παράμετροι είναι αλληλένδετες και έτσι ο περιορισμός της ανάπτυξης επηρεάζει και τη φωτοσύνθεση. Οι περιοριστικές συνθήκες της αλάτωσης μπορούν να επιδράσουν βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα τη φωτοσύνθεση. Τα φυτά που καταφέρνουν να επιβιώσουν και να αναπτυχθούν ικανοποιητικά με άλατα στη ριζόσφαιρα ονομάζονται αλόφυτα. Ανάλογα με την ανοχή τους στα άλατα είναι είτε υποχρεωτικά αλόφυτα, που σημαίνει ότι χαρακτηρίζονται από χαμηλή μορφολογική και ταξινομική ποικιλότητα, είτε προαιρετικά αλόφυτα που βρίσκονται συνήθως σε λιγότερο ή καθόλου αλατωμένα εδάφη και χαρακτηρίζονται από ευρύτερη ποικιλότητα της φυσιολογίας τους, πράγμα που τα κάνει πιο ευέλικτα [10].

Όσο η αλάτωση που οφείλεται στις καλλιεργητικές πρακτικές και στις υψηλές απαιτήσεις για γλυκό νερό συνεχίζει και αποτελεί εμπόδιο στην ανάπτυξη και την απόδοση των καλλιεργειών είναι σημαντικό να συνεχίζουν οι έρευνες με σκοπό την αύξηση της αντοχής των φυτών σε τέτοιου είδους φαινόμενα.

### 1.3 Η ντομάτα

Η ντομάτα (*Solanum lycopersicum*) είναι ένα φυτό που καλλιεργείται για τους καρπούς του. Αποτελεί το δεύτερο πιο σημαντικό οπωροκηπευτικό είδος στον κόσμο, μετά από την

πατάτα. Υπολογίζεται ότι η παραγωγή της ντομάτας παγκοσμίως είναι περίπου 152 εκατομμύρια τόνοι από 4.4 εκατομμύρια εκτάρια. Οι περισσότεροι καλλιεργητές βρίσκονται σε εύκρατες και υπο-τροπικές περιοχές, όπως η Κίνα, οι Η.Π.Α., η Ινδία, η Τουρκία, η Αίγυπτος, η Ιταλία, το Ιράν, η Ισπανία, η Βραζιλία και το Μεξικό [12]. Η καλλιέργεια της ντομάτας αποτελεί μια από τις σημαντικότερες θερμοκηπιακές καλλιέργειες στη Μεσόγειο [13]. Στην Ελλάδα όπως και στην υπόλοιπη Μεσόγειο, υπάρχει αρκετή ανάπτυξη των καλλιεργειών θερμοκηπίου με τη ντομάτα να αποτελεί ένα από τα πιο εμπορικά προϊόντα. Οι περιοχές με μεγάλη θερμοκηπιακή δραστηριότητα είναι η Πελοπόννησος, η Μακεδονία και η Κρήτη [14].

Το φυτό της ντομάτας αποτελεί ουδέτερο ως προς τη φωτοπερίοδο, ποώδες πολυετές, το οποίο αναπτύσσεται και ως ετήσιο σε εύκρατες περιοχές. Φωτοπερίοδος ορίζεται η διάρκεια παροχής του φωτός και συμβάλλει στο σχηματισμό των ανθών. Ανήκει στα οπωροκηπευτικά είδη της θερμής περιόδου (θ.π.), το οποίο σημαίνει ευαισθησία στον παγετό και στους ψυχρούς ανέμους, λόγω τρυφερής βλάστησης. Προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή παραγωγικότητα, το φυτό απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες ιδιαίτερα κατά την περίοδο ανθοφορίας, καρπόδεσης και ανάπτυξης των καρπών. Για το λόγο αυτό η ντομάτα ανήκει στις εμπορικότερες θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Τα οπωροκηπευτικά αυτής της κατηγορίας (θ.π.) διακρίνονται σε: α) είδη που μεταφυτεύονται (μελιτζάνα, πιπεριά, ντομάτα, γλυκοπατάτα) και β) είδη που συνήθως δε μεταφυτεύονται (αγγούρι, καρπούζι, κολοκύθι, πεπόνι, μπάμια, φασόλι) [14]. Οι τύποι της ντομάτας διακρίνονται ανάλογα με τη φυσιολογία και τους καρπούς σε τρεις κατηγορίες: ακαθόριστα, ημικαθορισμένα και καθορισμένα. Τα ακαθόριστα φυτά είναι ψηλά (συνήθως άνω των 2 m), η βλαστική ανάπτυξη συνεχίζει πολύ πιο μετά από την έναρξη της ανθοφορίας σε σύγκριση με τους άλλους τύπους φυτού και το φρούτο ωριμάζει σταδιακά ξεκινώντας από τις βασικές συστάδες. Τα ημικαθορισμένα φυτά είναι λιγότερο ψηλά (ύψος μεταξύ 0.9-1.5 m), τα φρούτα στις κύριες συστάδες ωριμάζουν ταυτόχρονα, αλλά το φυτό συνεχίζει να παράγει επιπλέον. Οι δύο αυτοί τύποι απαιτούν υποστηρικτικούς πασσάλους ή δικτυώματα για την καλλιέργειά τους, προορίζονται για πώληση ως φρέσκα προϊόντα και συλλέγονται με το χέρι. Τα καθορισμένα φυτά που ονομάζονται και θαμνώδεις ντομάτες ακουμπούν στο έδαφος, έχουν σχετικά πυκνή κατανομή ανθών και φρούτων και διαρκούν για περίπου τρεις εβδομάδες που κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου συνεχίζει η βλαστική περίοδος. Τα περισσότερα φρούτα αυτού του τύπου φυτών ωριμάζουν σε μικρό χρονικό διάστημα και αυτό τα καθιστά ιδανικά για μηχανική συλλογή [12].

Η ντομάτα απαιτεί εδάφη που να έχουν την ικανότητα να συγκρατούν νερό και αέρα και προτιμώνται εκείνα που μπορούν να αποστραγγίζουν καλά το νερό (κυρίως αμμώδεις μάργες), χωρίς αυτό να καθιστά τα βαρύτερα εδάφη μη παραγωγικά υπό συγκεκριμένες

καλλιεργητικές μεθόδους. Το φυτό δεν είναι ανεκτικό στη συμπίκνωση του εδάφους, ούτε στην υπερ-άρδευση, έτσι το ανώτερο στρώμα εδάφους (15-20 cm) πρέπει να είναι περατό. Η άρωση είναι απαραίτητη σε περίπτωση αργιλώδους εδάφους, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται στράγγιση και διήθηση του νερού [12]. Οι χημικές παράμετροι του εδάφους που ενδιαφέρουν έναν καλλιεργητή είναι το ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ), η αλκαλικότητα, το pH, οι οργανικές ουσίες και η αλατότητα. Στη διατήρηση των οργανικών ουσιών του εδάφους συμβάλλει η λίπανση του εδάφους και η προσθήκη θρεπτικών ουσιών, όπως άζωτο (N), κάλιο (K) και φώσφορος (P). Κάθε φυτικό είδος έχει διαφορετικές απαιτήσεις σε θρεπτικές ουσίες και κατηγοριοποιούνται ανάλογα. Έτσι, τα λαχανικά διακρίνονται σε: 1) αρκετά απαιτητικά σε N (όπως είναι η ντομάτα), 2) μετρίως απαιτητικά σε N, 3) λιγότερο απαιτητικά σε N (όπως είναι η πιπεριά και η μελιτζάνα) και σε: 1) αρκετά απαιτητικά σε P και N (όπως είναι η ντομάτα, μελιτζάνα και η πιπεριά), 2) μετρίως απαιτητικά σε P και K, 3) λιγότερο απαιτητικά σε P και K, 4) ελάχιστα απαιτητικά σε P και K [14]. Επιπλέον, για τη διατήρηση των θρεπτικών και την αποφυγή κινδύνων χρησιμοποιείται η αμειψισπορά (εναλλαγή καλλιεργειών ανά διαστήματα). Σε ορισμένες περιοχές είναι απαραίτητη η τριετής εναλλαγή της καλλιέργειας με κάποια που δεν ανήκει στα σολανώδη ή σολανίδες (οικογένεια Solanaceae, όπως πατάτα, πιπεριά, μελιτζάνα, καπνός), προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν ασθένειες που οφείλονται σε νηματοειδή, ιούς και βακτήρια. Σε γενικές γραμμές, η ντομάτα αναπτύσσεται με αμειψισπορά σε διετή κύκλο [12]. Όσον αφορά την αλατότητα, τα λαχανικά κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες: 1) ευαίσθητα (1–1.2 dS/m), 2) μετρίως ανθεκτικά (1.3–3 dS/m), στα οποία περιλαμβάνονται η ντομάτα και η πιπεριά, 3) ανθεκτικά (4 dS/m) και 4) πολύ ανθεκτικά (4.7 dS/m) [14].

Έχει παρατηρηθεί ότι τα εδάφη που είναι επιβαρυνμένα με αλάτωση συμβάλλουν στη διαταραχή των φυσιολογικών διαδικασιών με αποτέλεσμα τη μείωση του μεγέθους του καρπού και της συγκομιδής. Παρόλα αυτά για τη ντομάτα ειδικά έχει προκύψει ότι το υφάλμυρο νερό μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του καρπού κάποιων φυτών. Η αλάτωση προκαλεί παρόμοια ανεπάρκεια νερού στο ριζικό σύστημα, όπως η ξηρασία. Η ανάπτυξη των ριζών της ντομάτας είναι δυνατόν να συνεχίζεται ακόμα και υπό συνθήκες ανεπάρκειας νερού. Οι επιπτώσεις των άνδρων συνθηκών αντισταθμίζονται από την ωσμωτική προσαρμογή με σάκχαρα και αμινοξέα, καθώς και νιτρικά, φωσφορικά, νατρίουχα και κάλιο. Η αλάτωση επιβραδύνει την ανάπτυξη της ντομάτας και αυξάνει το μήκος των νεκρών ριζών στις ευπαθείς στα άλατα ποικιλίες. Έχει παρατηρηθεί ότι η υψηλή συγκέντρωση αλάτων στο έδαφος προκαλεί ανισορροπία στις θρεπτικές ουσίες του φυτού της ντομάτας, πράγμα που σημαίνει εμφάνιση χαμηλότερων συγκεντρώσεων στοιχείων, όπως το άζωτο (N), ο φώσφορος (P), το ασβέστιο (Ca) και το κάλιο (K). Η ανάκτηση των στοιχείων στις απαιτούμενες συγκεντρώσεις μπορεί να επιτευχθεί με εφαρμογή μεγαλύτερης ποσότητας



λιπάσματος στις ρίζες. Οι συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων στα φύλλα, όπως σίδηρος (Fe), μαγγάνιο (Mn) και ψευδάργυρος (Zn) αυξάνονται με την αλάτωση και υπάρχει πιθανότητα να οφείλεται στη μειωμένη ανάπτυξη του φυτού [11].

Η ντομάτα είναι ένα κατάλληλο φυτό για μοντελοποίηση σε περίπτωση επιβαρυνμένου με αλάτωση εδάφους και χρήσης χαμηλής ποιότητας αρδευτικού νερού, καθώς υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία σχετικά με τη φυσιολογία και τη γενετική του είδους [15].

#### 1.4 Μοντελοποίηση αλάτωσης

Η κατανόηση του φαινομένου της αλάτωσης είναι σημαντική, ώστε να υπάρξει ένα σχέδιο για την πρόληψη και την αντιμετώπισή της. Για τη διαχείρισή της απαιτούνται δεδομένα και οι κατάλληλες διεργασίες. Ο τελικός αποδέκτης των αποτελεσμάτων είναι οι καλλιεργητές και οι φορείς χάραξης πολιτικής. Στοχεύοντας στα παραπάνω, διάφορα φυσικά και εμπειρικά μοντέλα έχουν δημιουργηθεί και υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Το καθένα έχει σκοπό την πρόβλεψη παραμέτρων, όπως η μακροπρόθεσμη συμπεριφορά των υπογείων υδάτων, ο δείκτης αλατότητας της ριζόσφαιρας, η αφαλάτωση του προφίλ του εδάφους, η ποιότητα των υπογείων υδάτων και της απορροής, καθώς και η αποδοτική μεταφορά των διαλυμένων ουσιών. Επιπλέον, υπάρχουν μοντέλα που προσομοιώνουν την ανταπόκριση των καλλιεργειών στην αλάτωση και τις επιπτώσεις στην παραγωγή τους [4].

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει λίστα με τα μοντέλα που μπορούν να υπολογίσουν μεταξύ άλλων και την αλάτωση στο έδαφος. Η πρώτη στήλη παραθέτει το όνομα κάθε μοντέλου, η δεύτερη το τύπο του, δηλαδή αν είναι φυσικό ή εμπειρικό και η τρίτη τη βασική διεργασία της. Για τις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο SALTMED το οποίο είναι εμπειρικό και βασικός υπολογισμός του είναι το κλάσμα της έκπλυσης (Leaching Fraction).

#### 1.5 Κλιματικά μοντέλα

Ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει την πορεία και την ανάπτυξη μιας καλλιέργειας είναι οι καιρικές συνθήκες και το κλίμα. Η θερμοκρασία, οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας, ο άνεμος, το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και η ηλιοφάνεια συνιστούν τις παραμέτρους του κλίματος που επηρεάζουν και διαμορφώνουν μια καλλιέργεια. Κάθε φυτό έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις κατά τα στάδια ανάπτυξής του και χαρακτηρίζεται από ελάχιστη και βέλτιστη θερμοκρασία, υγρασία και ένταση-διάρκεια φωτισμού [14]. Επομένως, η μελέτη του κλίματος και των πιθανών μελλοντικών αλλαγών σχετικά με τη μεταβλητότητα είναι ζωτικής σημασίας προκειμένου να εξεταστεί η πιθανή κατάσταση της καλλιέργειας και του εδάφους.

Πίνακας 3: Λίστα μοντέλων που μπορούν να προσομοιώσουν την αλάτωση [16], [17]

Όνομα μοντέλου	Τύπος	Κύρια Διεργασία	Αναφορά
<b>2CSALT</b>	Φ	YY/ΜΔΟ	Stenson et al., 2001
<b>BC2C</b>	E	IY/ΜΔΟ/ΧΓ	Dawes et al.,
<b>BUDGET</b>	E	IY/B	Raes 2002
<b>CATSALT</b>	E	BA/ΧΓ/ΧΚ	Tuteja et al., 2001
<b>CROPSYST</b>	E	B/IY	Dep.Biological Systems Engin., Washington State University
<b>DRAINMOD-S</b>	E	IY/E/B	Kandil et al., 1995
<b>ENVIRO-GRO</b>	E	ΜΔΟ/IY	Pang and Letey, 1998
<b>FEFLOW</b>	Φ	YY/ΜΔΟ/ΧΚ	Diersch, 2014
<b>FLOWTUBE</b>	E	YY	Dawes et al., 2000
<b>HYDRUS</b>	Φ		Kool and Van Genuchten, 1991
<b>LEACHM</b>	Φ	YY/ΜΔΟ/ΧΚ	Hutson and Wagenet, 1989
<b>MODFLOW</b>	Φ	YY	McDonald and Harbaugh, 1984
<b>MOCDENS3D</b>	Φ	YY	De Louw and Oude Essink 2006
<b>MT3DMS</b>	Φ	ΜΔΟ/ΧΚ	Zheng and Wang, 1999
<b>SAHYSMOD</b>	E/Φ	YY/IY/E/B	Oosterbaan, 2005
<b>SALTIRSOIL</b>	E	IY/ΧΚ/B	Visconti et al., 2010
<b>SALT</b>	E	B	USDA
<b>SALTMED</b>	E/Φ	ΜΔΟ/E/B	Ragab, 2002
<b>SALTMOD</b>	E	IY/E/B	Oosterbaan , 2001
<b>SGMP</b>	Φ	YY	ILRI, the Netherlands
<b>SIMPACT</b>	E	YY	DEH, South Australia
<b>SIWATRE</b>	Φ	IY	ILRI, the Netherlands
<b>SWAGMAN</b>	E	IY/ΧΓ/B	Timsina & Humphreys, 2003
<b>SWAGSIM</b>	E	YY/IY	Prathapar et al., 1996
<b>SWAM</b>	E	ΔY	Singh et al., 1996
<b>SWAP</b>	Φ	EBA	Dam et al., 1997
<b>SWAP-WOFOST</b>	Φ	EBA	Kroes and Supit, 2011
<b>SWATRE</b>	Φ	YY/IY/B	Belmans et al., 1983
<b>SWMS-3D</b>	Φ	YY/ΜΔΟ	USDA, Salinity Laboratory
<b>OASISMOD</b>	E	IY	Askri et al., 2010
<b>PHREEQC</b>	Φ	ΜΔΟ/ΧΚ	Parkhurst and Appelo, 2013
<b>UNSATCHEM</b>	E/Φ	YY/ΜΔΟ/ΧΚ/B	Šimůnek et al., 1996
<b>WATSUIT</b>	E	E	Rhoades and Merrill, 1975
<b>WAVES</b>	Φ	EBA	Zhang and Dawes, 1998

Συντομογραφίες: Φ: Φυσικά; E: Εμπειρικά; EBA: Έδαφος – Βλάστηση – Ατμόσφαιρα; BA: Βροχόπτωση – Απορροή, YY: Ροή υπόγειου Ύδατος; ΧΓ: Χρήσεις Γης; ΧΚ: Χημική Κινητική, ΜΔΟ: Μεταφορά Διαλυμένων Ουσιών, B: Σύσταση Βλάστησης, E: Εκπλυση, IY: Ισοζύγιο Υδάτων, ΔY: Διαχείριση Υδάτων.

Τα βασικά εργαλεία για τη βέλτιστη προσέγγιση, μελέτη και κατανόηση του κλίματος είναι τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα (Global Circulation Models – GCMs), τα οποία αποτελούν μαθηματικά μοντέλα αναπαράστασης της παγκόσμιας γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας και του κλιματικού συστήματος βασισμένα σε φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς νόμους. Το κλιματικό σύστημα αποτελείται από χωρικές κλίμακες που πραγματοποιούν ανάλυση από τη μικροφυσική των νεφών ως την κλίμακα της γης και από χρονικές κλίμακες που περιγράφουν μια αντίδραση που είναι δυνατόν να διαρκέσει από μερικά δευτερόλεπτα έως και αιώνες [18]. Τα GCMs έχουν τη δυνατότητα να αναπαριστούν τα χαρακτηριστικά

μεγάλης κλίμακας του κλίματος (γενική κυκλοφορία ατμόσφαιρας και ωκεανών), γιατί έχουν περιορισμένη χωρική και χρονική ανάλυση. Σε τοπική κλίμακα, τα GCMs δε μπορούν να εκτιμήσουν τις κλιματικές συνθήκες, καθώς η χωρική διακριτοποίηση του πλέγματός τους δεν παρέχει την απαιτούμενη λεπτομέρεια [19].

Για πιο λεπτομερή προσέγγιση και προσομοίωση του κλίματος σε τοπικό επίπεδο χρησιμοποιούνται τα περιοχικά κλιματικά μοντέλα (Regional Climate Models – RCMs). Έχουν περιορισμένη χωρική έκταση και χρησιμοποιούνται ευρέως για κλιματικά πειράματα που πραγματοποιούνται για περιοχές σε όλο σχεδόν τον πλανήτη. Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται από τα RCMs προέρχονται από GCMs και περιλαμβάνουν κυρίως τη θερμοκρασία, την υγρασία, την κυκλοφορία αερίων μαζών κλπ. Τα RCMs βοηθούν στην κατανόηση του κλίματος, έτσι ώστε να υπάρχει σαφέστερη εικόνα των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής σε τοπικό επίπεδο. Βάσει των αποτελεσμάτων τους δημιουργούνται σχέδια διαχείρισης για το περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων των υδάτων και των εδαφών. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής μελετώνται βάσει σεναρίων που λαμβάνουν υπόψη περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές συνθήκες ανά τον κόσμο [20]. Τα σενάρια βασίζονται στην υπόθεση ότι οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου θα αυξηθούν. Οι μελλοντικές συγκεντρώσεις των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου ακολουθούν βάσει σεναρίων τέσσερα αντιπροσωπευτικά μονοπάτια (Representative Concentration Pathways – RCPs). Σε αυτά τα σενάρια λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της ακτινοβολίας ( $\Delta W/m^2$ ) που προκαλείται από την αλλαγή του παγκόσμιου οικονομικού και κοινωνικού γίγνεσθαι. Τα τέσσερα σενάρια διακρίνονται ανάλογα με τη διαφορά στη μέση δρώσα ακτινοβολία που θα επιτευχθεί μέχρι το 2100 σε RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5. Το καθένα υποθέτει αύξηση στη μέση παγκόσμια ακτινοβολία στην επιφάνεια του εδάφους κατά  $2.6 W/m^2$ ,  $4.5 W/m^2$ ,  $6 W/m^2$  και  $8.5 W/m^2$  αντίστοιχα. Στην παρούσα διατριβή για την διεξαγωγή αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται το σενάριο RCP 8.5 [21].

Η εισερχόμενη στην ατμόσφαιρα μεγάλου μήκους ακτινοβολία (Atmospheric downward longwave radiation  $L_d$ ) συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου το οποίο σχετίζεται με τα σύννεφα, τους υδρατμούς και την κατανομή της θερμοκρασίας στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας [22]. Σε περίπτωση καθαρού ουρανού η ακτινοβολία  $L_d$  εξαρτάται σημαντικά από τα αέρια του θερμοκηπίου στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, όπως οι υδρατμοί και το  $CO_2$ . Η ικανότητα των αερίων του θερμοκηπίου να εκπέμπουν μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία είναι συνάρτηση της τέταρτης δύναμης της θερμοκρασίας ( $T^4$ ) και διέπεται από το νόμο Stefan–Boltzmann. Επομένως, η μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία είναι συνδεδεμένη με τα αυξημένα επίπεδα των αερίων του θερμοκηπίου και την υπερθέρμανση. Υπό συνθήκες νέφωσης η ακτινοβολία προσδιορίζεται από τη χωρική και την

κάθετη κατανομή των νεφών και συγκεκριμένα τα χαμηλά νέφη. Η ακτινοβολία  $L_d$  είναι ένα από τα τέσσερα στοιχεία της επιφανειακής καθαρής ακτινοβολίας (Surface net radiation  $R_n$ ):

$$R_n = S_d - S_u + L_d - L_u = G + H + \lambda E$$

Όπου  $S_d$  η εισερχόμενη στην ατμόσφαιρα μικρού μήκους ακτινοβολία,

$S_u$  η ανακλώμενη μικρού μήκους ακτινοβολία

$L_u$  η μεγάλου μήκους ακτινοβολία που ανακλάται από την επιφάνεια.

Η  $L_d$  επηρεάζει το ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη και τον κύκλο του νερού. Η  $R_n$  έχει τιμή κατά μέσο όρο παγκοσμίως περίπου  $100 \text{ W/m}^2$  και εξισορροπείται από τη ροή θερμότητας ( $H \sim 20 \text{ W/m}^2$  κατά μέσο όρο παγκοσμίως) και η λανθάνουσα ροή θερμότητας ( $\lambda E \sim 80 \text{ W/m}^2$  κατά μέσο όρο παγκοσμίως, όπου  $\lambda$  η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης και  $E$  η εξατμισοδιαπνοή. Η ροή θερμότητας από το έδαφος ( $G$ ), η οποία είναι η αποθηκευμένη ενέργεια στο έδαφος και τους ωκεανούς είναι κοντά στο μηδέν σε ετήσια βάση. Οι παράμετροι  $H$  και  $\lambda E$  θερμαίνουν και υγραίνουν τον αέρα πάνω από την επιφάνεια που προσδίδει πηγή ενέργειας και νερού για τα νέφη και τις κατακρημνίσεις. Η συνολική ποσότητα του νερού που εξατμίζεται σε παγκόσμιο επίπεδο στην ατμόσφαιρα ( $E$ ) πρέπει να είναι ίση με το υδατικό ισοζύγιο στην επιφάνεια, δηλαδή την κατακρήμνιση ( $P$ ) [23].

## 1.6 Η χάραξη πολιτικής από την Ε.Ε.

Η υποβάθμιση των εδαφών οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην αδυναμία σύστασης του θεσμικού πλαισίου και της πολιτικής (policy) εκείνης που θέτει σαφή κριτήρια και όρια για την αειφορική χρήση τους. Τα θεσμικά εργαλεία που αφορούν την υποβάθμιση των εδαφών, συνεπώς και την αλάτωση, πρέπει να είναι εφαρμόσιμα σε διαφορετικά επίπεδα διοίκησης και διαχείρισης. Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 το 5<sup>ο</sup> Ενωσιακό Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον (5<sup>th</sup> Environment Action Programme – EAP) έθεσε στόχους και σχέδια δράσης που αφορούν το περιβάλλον που ενσωματώνουν επιστημονικούς κλάδους, πολιτικές και διαβούλευση των ενδιαφερόμενων μερών. Στα πλαίσια του 5<sup>ου</sup> Προγράμματος εκδόθηκε η Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα (Water Framework Directive – WFD) 2000/60/EK [24] η οποία καθιέρωσε την προστασία των επιφανειακών, μεταβατικών, παραθαλάσσιων και υπόγειων υδάτων, συμπεριλαμβανομένων των σχετικών πληροφοριών για τις επιφανειακές εναποθέσεις και εδάφη σε κλίμακα λεκάνης απορροής. Με αυτόν τον τρόπο υποδεικνύεται η σημαντικότητα της ολιστικής προσέγγισης της διαχείρισης υδάτων και εδαφών, καθώς και της συλλογής δεδομένων. Η Οδηγία αντιμετωπίζει το έδαφος απλά ως το μέσον με το οποίο επιτυγχάνεται η καλή ποιότητα όλων των υδάτων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις σημειακής και διάχυτης ρύπανσης που είναι δυνατόν να επηρεάσει υδάτινα οικοσυστήματα [25],

παραβλέποντας τις ουσιώδεις παρεχόμενες λειτουργίες και υπηρεσίες. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτή η έλλειψη, το 6<sup>ο</sup> Ενωσιακό Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον (2002 – 2012) [24] καθιέρωσε τη Θεματική Στρατηγική για τα Εδάφη [1] στοχεύοντας στην πρόληψη και μείωση της υποβάθμισης και απειλής των εδαφών. Στη συνέχεια, η Θεματική Στρατηγική για την Προστασία των Εδαφών [26] αναγνώρισε την αλάτωση ως μια εκ των απειλών του εδάφους. Το 2012 η Ευρωπαϊκή Ένωση αναγνώρισε την αυξανόμενη τάση υποβάθμισης των εδαφών και δόμησε τη Στρατηγική [27] σε 4 πυλώνες: την ευαισθητοποίηση, την έρευνα, την ακεραιότητα και τη νομοθεσία. Είναι αξιοσημείωτο ότι η αλάτωση των εδαφών είναι ικανή να θέσει σε υψηλό κίνδυνο τους μακροπρόθεσμους στόχους της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής (ΚΑΠ) (Common Agricultural Policy, CAP), (η οποία περιλαμβάνει βιώσιμη παραγωγή τροφίμων, αειφόρο διαχείριση των φυσικών πόρων και της κλιματικής δράσης και ισορροπημένη εδαφική ανάπτυξη). Στο 7<sup>ο</sup> Ενωσιακό Πρόγραμμα για το Περιβάλλον του οποίου η δράση ξεκίνησε το 2014 και θα ηγείται της Ευρωπαϊκής Περιβαλλοντικής Πολιτικής μέχρι το 2020, το γόνιμο έδαφος και η παραγωγική γη θεωρούνται μέρος του ‘φυσικού κεφαλαίου’ που πρέπει να τεθούν υπό αειφόρο διαχείριση και επαρκή προστασία, ενώ παράλληλα θα πρέπει να ενθαρρύνονται δράσεις για την εξυγίανση των ρυπασμένων περιοχών, τη μείωση της διάβρωσης του εδάφους και την αύξηση της οργανικής ύλης στο έδαφος. Αυτά τα κείμενα πολιτικής και χαλαρού δικαίου υποδεικνύουν την πρόθεση της Ε.Ε. για περαιτέρω και πιο συγκεκριμένη προστασία για το έδαφος, αλλά είναι ένα κείμενο αυστηρού δικαίου (Οδηγία, Κανονισμός) ζωτικής σημασίας προκειμένου να τεθούν οι οριακές τιμές για την αλάτωση.

Η αλάτωση είναι ένας παράγοντας υποβάθμισης του εδάφους που έχει επηρεάσει σημαντικά τις χώρες της Ευρώπης και για αυτό λαμβάνονται μέτρα για τον περιορισμό της. Όμως είναι σημαντικό να επιτευχθεί η κατανόηση του φαινομένου της αλάτωσης και η γνώση γύρω από τους μηχανισμούς και τις επιπτώσεις της. Οι μη αποδοτικές πρακτικές διαχείρισης των υδάτων οδηγούν σε φαινόμενα αλάτωσης υποβαθμίζοντας έτσι τη γεωργική γη και κατ’ επέκταση την παραγωγή. Έχοντας λάβει υπόψη όλα τα παραπάνω, η διατριβή αυτή στοχεύει στη μελέτη των επιπτώσεων της αλάτωσης σε καλλιέργειες θερμοκηπίου που βρίσκονται σε περιοχές με επιβαρυνμένο έδαφος.

## 2 Μεθοδολογία

### 2.1 Βασικές εξισώσεις SALTMED

Οι υψηλές απαιτήσεις των σύγχρονων καλλιεργητικών μεθόδων είναι υπεύθυνες για τις αυξημένες ανάγκες σε νερό και την κακή διαχείριση των υπογείων υδάτων. Η συσσώρευση αλάτων στο έδαφος είναι αποτέλεσμα των δραστηριοτήτων αυτών και σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται για την άρδευση νερό με υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων. Το μοντέλο SALTMED έχει δημιουργηθεί από τον R. Ragab και αποτελεί γενική εφαρμογή για την περίπτωση της αλάτωσης σε συνδυασμό όλων των παραπάνω παραμέτρων. Παρόλο που τα περισσότερα μοντέλα προσομοιώνουν μια παράμετρο, το SALTMED περιγράφει την επίδραση του συστήματος άρδευσης, την κατανομή της υγρασίας, καθώς και την παραγωγή της καλλιέργειας. Το SALTMED είναι ένα εμπειρικό μοντέλο και σκοπός του είναι να περιγράψει τον τρόπο με τον οποίο επιδρά το σύστημα άρδευσης στο υδατικό ισοζύγιο του εδάφους. Έτσι, αποτελεί ένα αποτελεσματικό μέσο για τις πρακτικές διαχείρισης του νερού άρδευσης. [28] [29].

Το μοντέλο SALTMED είναι αξιόπιστο και δοκιμασμένο σε περιπτώσεις αλάτωσης εδάφους και έχει χρησιμοποιηθεί σε πλήθος περιπτώσεων. Το SALTMED έχει τις εξής εφαρμογές:

1. Πρόβλεψη των επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής (βροχοπτώσεις, θερμοκρασία, CO<sub>2</sub>, εισχώρηση του θαλασσινού νερού στο έδαφος) στο έδαφος, στη βλάστηση και στην ασφάλεια της τροφής.
2. Βελτίωση της απόδοσης της χρήσης νερού (μείωση του νερού στη γεωργία και αύξηση της παραγωγικότητας προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες του πληθυσμού).
3. Βελτιστοποίηση των αρδευτικών πρακτικών.
4. Καθοδήγηση των χρηστών του μοντέλου, ώστε να επιλέξουν την καταλληλότερη καλλιέργεια και στρατηγική άρδευσης και το καταλληλότερο σύστημα άρδευσης, όταν χρησιμοποιείται χαμηλής ποιότητας νερό (αλατούχο, υφάλμυρο, υπόγειο, στραγγίσματα καλλιεργειών και επεξεργασμένο νερό).
5. Πρόβλεψη της επίδρασης του χαμηλής ποιότητας νερού στο περιβάλλον και καθοδήγηση του χρήστη στις καλύτερες στρατηγικές ελαχιστοποίησης των αρνητικών επιδράσεων, της ρύπανσης υδάτων και τη βελτίωση της βιοποικιλότητας.

Για τη χρήση του αλατούχου/υφάλμυρου νερού απαιτείται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση ως προς την ταυτόχρονη διαχείριση της καλλιέργειας, του εδάφους και του νερού.

Τα κριτήρια με τα οποία θα πραγματοποιηθεί η προσέγγιση των παραμέτρων αυτών αφορούν:

α) την ικανότητα διήθησης που επηρεάζει τη μεταφορά νερού και διαλυμένων ουσιών στο έδαφος,

β) τα όρια ανοχής σε υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων των καλλιεργειών στα διάφορα στάδια ανάπτυξης του φυτού και την επιλογή της πιο ανθεκτικής καλλιέργειας στην οποία εφαρμόζεται υψηλή συγκέντρωση αλάτων στο λιγότερο ευαίσθητο στάδιο,

γ) την εφαρμογή της κατάλληλης στρατηγικής για τη διαχείριση του νερού που μπορεί να περιλαμβάνει την ανάμιξη υφάλμυρου και καθαρού νερού ή χρήση υφάλμυρου νερού μόνο κατά τα λιγότερο ευαίσθητα στάδια ανάπτυξης,

δ) την επιλογή του καταλληλότερου αρδευτικού συστήματος,

ε) το συνδυασμό του καταλληλότερου υπολογισμού των αρδευτικών απαιτήσεων που συμβάλλουν ουσιαστικά στην εξοικονόμηση του νερού.

Το SALTMED βασίζει τους υπολογισμούς του σε μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν την πρόσληψη του νερού παρουσία υψηλής αλατότητας, την πραγματική και σχετική απόδοση της καλλιέργειας, την εξατμισοδιαπνοή, το ριζικό σύστημα κ.α. [7]. Όλη η φιλοσοφία του βασίζεται στον υπολογισμό του κλάσματος έκπλυσης ή αλλιώς τις απαιτήσεις έκπλυσης (Leaching Requirements, LR):

$$LR = \frac{D_d}{D_i} = \frac{C_i}{C_d} \quad (1)$$

Όπου  $D_d$  το ύψος του ύδατος αποστράγγισης που περνά κάτω από τις ρίζες

$D_i$  το ύψος του ύδατος από τις βροχοπτώσεις και την άρδευση

$C_d$  η αγωγιμότητα του ύδατος αποστράγγισης πάνω από την οποία η απόδοση της καλλιέργειας μειώνεται

$C_i$  η αγωγιμότητα του ύδατος άρδευσης.

Το μοντέλο υπολογίζει το λόγο της αγωγιμότητας του αρδευτικού ύδατος προς τη μέση αγωγιμότητα στις ρίζες. Η εξίσωση αυτή δείχνει τη σχέση της ποσότητας του αρδευτικού και όμβριου ύδατος που εφαρμόστηκε στο φυτό και της ποσότητας που κινήθηκε κάτω από το βάθος των ριζών. Για την πρόσληψη του νερού το μοντέλο κάνει τους υπολογισμούς σύμφωνα με τους Cardon–Letey που καθορίζουν την παράμετρο της πραγματικής πρόσληψης του νερού  $S$  ( $\text{day}^{-1}$ ):

$$S_{(z,t)} = \left[ \frac{S_{\max(t)}}{1 + \frac{a(t)h + \pi}{\pi_{50}(t)}} 3 \right] \lambda(z,t) \quad (2)$$

όπου  $\lambda(z) = 5/3L$  για  $z \leq 0.21$

$\lambda(z) = 25/12L * (1-z/L)$  για  $0.2L < z \leq L$

$\lambda(z) = 0.0$  για  $z > L$ .

$S_{\max}(t)$  η μέγιστη ικανότητα πρόσληψης νερού από τις ρίζες κατά το χρόνο  $t$ ,  $z$  το κάθετο βάθος με θετική φορά προς τα κάτω,  $\lambda(z,t)$  είναι η συνολική μάζα της ρίζας που εξαρτάται από το βάθος και το χρόνο,  $L$  είναι το μέγιστο βάθος της ρίζας,  $h$  το δυναμικό κατακράτησης των πόρων,  $\pi$  η ωσμωτική πίεση,  $\pi_{50}(t)$  η τιμή της ωσμωτικής πίεσης που εξαρτάται από το χρόνο και στην οποία η  $S_{\max}(t)$  μειώνεται κατά 50%,  $\alpha(t)$  ο σταθμισμένος συντελεστής που υπολογίζει διαφορική απόκριση μιας καλλιέργειας στην πίεση κατακράτησης και διαλυμένων ουσιών και ισούται με  $\pi_{50}(t)/h_{50}(t)$ , όπου  $h_{50}(t)$  η πίεση κατακράτησης στην οποία μειώνεται κατά 50% η  $S_{\max}(t)$ .

Η μέγιστη πρόσληψη νερού  $S_{\max}(t)$  υπολογίζεται ως εξής:

$$S_{\max}(t) = ET_0(t) * K_{cb}(t) \quad (3)$$

όπου  $K_{cb}$  ο συντελεστής εξάτμισης το εδάφους

Η πρόσληψη του νερού σε ένα φυτό επηρεάζεται από τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες και από τον κύκλο του στην ατμόσφαιρα και στο έδαφος. Έτσι, η εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται βάσει της εξίσωσης Penman-Monteith σύμφωνα με την προσαρμογή που πραγματοποιήθηκε από το FAO-56 (1998) και είναι η εξής:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 e_s - e_a}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4)$$

όπου  $ET_0$  η εξατμισοδιαπνοή (mm/day),  $R_n$  η καθαρή ακτινοβολία (MJ/m<sup>2</sup>day),  $G$  η πυκνότητα ροής θερμότητας από το έδαφος (MJ/m<sup>2</sup>day),  $T$  η μέση θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2 m (°C),  $\Delta$  η κλίση της καμπύλης τάσης του κορεσμένου ατμού (kPa/°C),  $\gamma$  η ψυχομετρική σταθερά που ισούται με 66 Pa/°C,  $e_s$  η τάση των κορεσμένων ατμών σε θερμοκρασία αέρα (kPa),  $e_a$  η επικρατούσα τάση ατμών (kPa),  $U_2$  η ταχύτητα ανέμου στο ύψος των 2 m (m/s).

Η εξατμισοδιαπνοή σε μια καλλιέργεια εξαρτάται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Στο μοντέλο SALTMED ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής πραγματοποιείται βάσει των κλιματικών δεδομένων (που εισάγονται από το χρήστη) και της εξίσωσης Penman-Monteith (κατά FAO-56). Η θερμοκρασία είναι πολύ βασική παράμετρος της εξίσωσης. Το μοντέλο έχει δημιουργηθεί για την προσομοίωση καλλιεργειών ανοιχτού πεδίου, ενώ η παρούσα εργασία εξετάζει τις συνθήκες σε μια θερμοκηπιακή καλλιέργεια. Οι συνθήκες εντός και



εκτός θερμοκηπίου είναι διαφορετικές, Οι τιμές της εξωτερικής θερμοκρασίας προσαρμόστηκαν έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες θερμοκηπίου με τη χρήση της εξίσωσης:

$$T_i(t) = T_o(t) + \frac{bs(t) + h(t)}{U(t) + q(t)} \quad (5)$$

όπου  $t$  είναι ο χρόνος (h),  $T_i$  η θερμοκρασία εντός του θερμοκηπίου ( $^{\circ}\text{K}$ ),  $T_o$  η θερμοκρασία εκτός του θερμοκηπίου ( $^{\circ}\text{K}$ ),  $s$  η ηλιακή ακτινοβολία ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $b$  η απόδοση της ηλιακής θέρμανσης, που λαμβάνει τιμές από 0 ως 1,  $h$  η μεταβλητή ελέγχου της θέρμανσης εντός του θερμοκηπίου ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $U$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το εσωτερικό του θερμοκηπίου προς το εξωτερικό περιβάλλον (θεωρείται θετικός αριθμός) ( $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{K})$ ), και  $q$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, λόγω αερισμού ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{K}$ ) [30].

Ομοίως, για τη μετατροπή της εξωτερικής υγρασίας σε εσωτερική βασίζεται στην εξίσωση:

$$RH_{in} = 1.36096 * \frac{(RH_{out})^{0.923}(H)^{0.086}}{(V_r)^{0.002}(V_s)^{0.005}(LI_{out})^{0.0072}(U_{out})^{0.0029}} \quad (6)$$

όπου  $RH_{in}$  η σχετική υγρασία εντός του θερμοκηπίου (%),  $RH_{out}$  η σχετική υγρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος (%),  $V_r$  ο αερισμός από την οροφή (% της επιφάνειας του δαπέδου),  $V_s$  ο αερισμός από τις πλευρές του θερμοκηπίου (% της επιφάνειας του δαπέδου),  $LI_{out}$  η εξωτερική ένταση του φωτός (lux),  $H$  το ύψος του θερμοκηπίου (m),  $U_{out}$  η ταχύτητα του ανέμου στο εξωτερικό περιβάλλον (m/s) [31].

Το βάθος του ριζικού συστήματος ακολουθεί το συντελεστή καλλιέργειας  $K_c$  και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$R_d(t) = [R_{dmin} + (R_{dmax} - R_{dmin})] * K_c(t)/K_{cmax} \quad (7)$$

όπου  $R_d$  το βάθος του ριζικού συστήματος και η τιμή του μέγιστου βάθους μπορεί να βρεθεί είτε από επί τόπου μέτρηση είτε από τη βιβλιογραφία. Το πλάτος του ριζικού συστήματος περιγράφεται από την εξίσωση:

$$R_w(t) = [R_w/R_d] * R_d(t) \quad (8)$$

Ο λόγος  $[R_w/R_d]$  εξαρτάται από τον τύπο της καλλιέργειας και του εδάφους και άλλους παράγοντες. Η σχετική απόδοση της καλλιέργειας χάρη στη μοναδική και δυνατή σχέση μεταξύ της βιομάζας και της πρόσληψης νερού. Έτσι, η σχετική απόδοση της καλλιέργειας  $RY$  (Relative Crop Yield) υπολογίζεται ως το σύνολο της πραγματικής πρόσληψης νερού κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου διαιρεμένη με το σύνολο της μέγιστης πρόσληψης νερού υπό φυσιολογικές (δηλαδή χωρίς αλάτωση) συνθήκες:

$$RY = \frac{\sum S(x, z, t)}{\sum S_{max}(x, z, t)} \quad (9)$$

Η πραγματική απόδοση της καλλιέργειας AY (Actual Yield) συνδέεται με τη σχετική απόδοση (RY) ως εξής:

$$AY = RY * Y_{max} \quad (10)$$

όπου  $Y_{max}$  η μέγιστη παρεχόμενη απόδοση υπό βέλτιστες και φυσιολογικές συνθήκες.

Το παρακάτω σχεδιάγραμμα περιγράφει περιεκτικά τη φιλοσοφία πάνω στην οποία πραγματοποιήθηκε η εργασία:



Εικόνα 1: Μεθοδολογία της εργασίας.

## 2.2 Χρήση μοντέλου SALT MED – εισαγωγή δεδομένων

Το γραφικό περιβάλλον του μοντέλου περιλαμβάνει δύο κεντρικές καρτέλες: 1) Global Parameters (Καθολικές παράμετροι) και 2) Field Parameters (Παράμετροι πεδίου). Η πρώτη χωρίζεται σε επιμέρους καρτέλες: 1) Global Parameters (Καθολικές παράμετροι), 2) Locations (Θέσεις), 3) Outputs (Δεδομένα εξόδου), 4) Fields (Αγροί), 5) Soils (Εδάφη) και 6) Crops (Καλλιέργειες). Στην καρτέλα Global Parameters (Εικόνα 2), στο input field με το όνομα Model run dates φαίνεται η περίοδος για την οποία τρέχει το μοντέλο (ημερομηνία έναρξης και λήξης) και στο input field Soil and Crop Database φαίνεται ο φάκελος στον οποίο είναι εγκατεστημένο το πρόγραμμα.

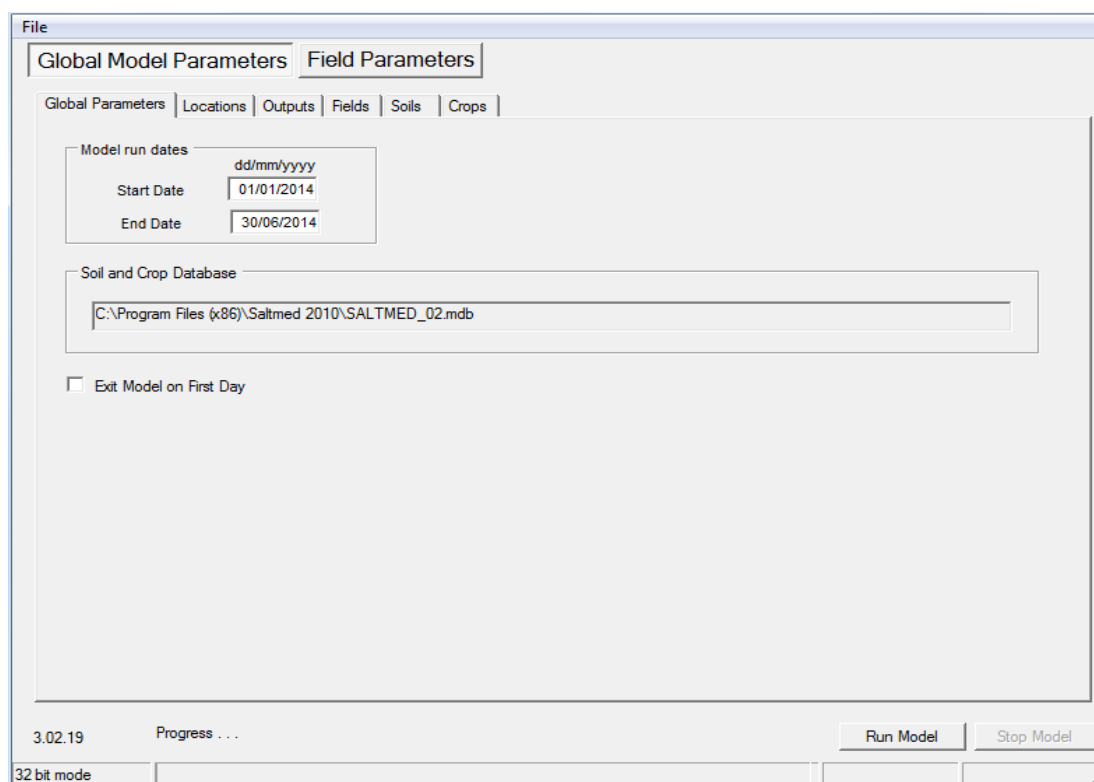
Τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται στο μοντέλο αφορούν:

- 1) χαρακτηριστικά των φυτών
- 2) χαρακτηριστικά του εδάφους
- 3) μετεωρολογικά δεδομένα
- 4) δεδομένα διαχείρισης υδάτων

5) παραμέτρους για το μοντέλο (αριθμός κάθετων και οριζόντιων διαμερισμάτων, μέγιστος αριθμός χρονικών βημάτων).

Το μοντέλο περιλαμβάνει τρεις ενσωματωμένες βάσεις δεδομένων:

- 1) βάση δεδομένων καλλιεργειών, η οποία έχει επιμέρους καρτέλες διάφορων καλλιεργειών που περιγράφουν βασικά χαρακτηριστικά τους και συντελεστές ανά στάδιο
- 2) βάση δεδομένων εδαφών, η οποία απαρτίζεται από καρτέλες με την περιγραφή διαφόρων τύπων εδαφών ως προς τα φυσικά και τα χημικά χαρακτηριστικά τους
- 3) βάση δεδομένων για συστήματα άρδευσης, η οποία δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει ένα είδος άρδευσης, ώστε το μοντέλο να το χρησιμοποιήσει κατάλληλα για τους υπολογισμούς.



Εικόνα 2: Η καρτέλα Global Parameters

### 2.2.1 Καρτέλα κλίματος (Climate)

Πριν τη μοντελοποίηση είναι σημαντικό να δημιουργηθούν οι χρονοσειρές με τα δεδομένα καιρικών συνθηκών, άρδευσης και λίπανσης με άζωτο. Το SALTMED μπορεί να διαθέτει βάση δεδομένων για καλλιέργειες και εδάφη, αλλά ταυτόχρονα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει καινούρια καρτέλα με τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά για την εξεταζόμενη περιοχή. Τα ημερήσια δεδομένα καιρού, άρδευσης και λίπανσης αζώτου εισάγονται υπό τη μορφή αρχείου Excel το οποίο προετοιμάζεται από το χρήστη.

Αρχικά, προετοιμάζεται το αρχείο Excel με τα μετεωρολογικά δεδομένα που περιλαμβάνουν ημερήσιες τιμές για τη μέγιστη ( $T_{\max}$ ) και ελάχιστη θερμοκρασία ( $T_{\min}$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ ), την ταχύτητα του ανέμου (m/s), την ηλιοφάνεια (h), τη βροχόπτωση (mm), την υγρασία (%), την ακτινοβολία ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) και στη συνέχεια εισάγεται στο μοντέλο στην καρτέλα του κλίματος (Climate) (Εικόνα 3). Το μοντέλο δημιουργήθηκε για την προσομοίωση καλλιεργειών σε ανοιχτό πεδίο. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί προσομοίωση για την παρούσα διατριβή υπό συνθήκες θερμοκηπίου, ήταν απαραίτητοι οι υπολογισμοί για τη συσχέτιση των παραμέτρων του εξωτερικού περιβάλλοντος με αυτές εντός του θερμοκηπίου. Η βροχόπτωση για τη μοντελοποίηση σε θερμοκήπιο είναι μηδενική. Η ταχύτητα ανέμου είναι απαραίτητη για την εξίσωση μετατροπής της εξωτερικής υγρασίας σε εσωτερική (Εξίσωση 6) και για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής (Εξίσωση 4).

The screenshot shows the 'Climate' tab of the Saltmed 2010 software. The 'Select Field' dropdown is set to '01 tomato'. The 'Select Radiation Data Option' section has three radio buttons: 'Use total radiation from climate data' (selected), 'Use total and net radiation from climate data', and 'Calculate radiation from sunshine hours climate data'. The 'Initialise with Degree Days at start of climate data' is set to 0. The 'Import Climate Data' button is visible, along with 'First Date' (01/01/2014) and 'Last Date' (30/06/2014). A table displays daily weather data for 2014, with columns for Date, Tmax [°C], Tmin [°C], Windspeed [m/s], Sunshine [h], Rainfall [mm], Humidity [%], Radiation MJ, and Radiation MJ/m². The table shows data from 01/01/2014 to 14/01/2014. The 'File' path at the bottom is 'C:\Program Files (x86)\Saltmed 2010\Example Files\NOAA 2014\_import.xlsx'. The 'Run Model' and 'Stop Model' buttons are at the bottom right.

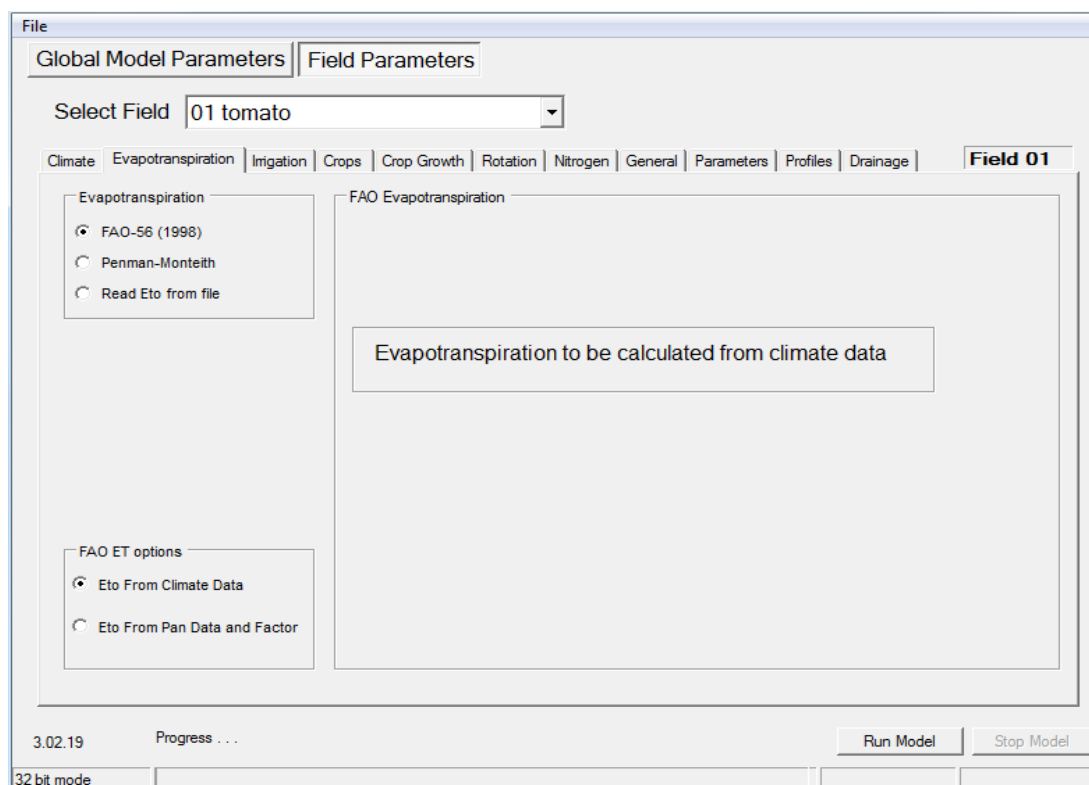
Date	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Windspeed [m/s]	Sunshine [h]	Rainfall [mm]	Humidity [%]	Radiation MJ	Radiation MJ/m²
01/01/2014	15.9153406	8.80612215	3.22601936	9	0	72.3472275	34.516	1.659
02/01/2014	17.1400698	7.60162161	3.15583092	9	0	73.8116778	37.734	4.323
03/01/2014	17.0938371	14.1313166	1.84079101	9	0	86.5586142	36.7156	3.214
04/01/2014	16.1549311	13.3894015	2.96049519	9	0	86.9580457	35.8927	2.560
05/01/2014	16.0811282	13.5727703	3.77428373	9	0	76.5020390	35.4887	2.198
06/01/2014	17.1209302	13.4786002	4.93702798	9	0	79.4329496	36.4109	2.884
07/01/2014	17.0250904	12.8969815	1.11705555	9	0	78.8809494	35.0317	1.738
08/01/2014	17.0880124	14.0141638	2.93268467	9	0	78.8332627	36.0556	2.725
09/01/2014	17.7575520	13.5481748	5.30187541	9	0	86.7029074	33.9555	0.811
10/01/2014	18.9441564	13.8070448	7.32409691	9	0	88.9824105	38.8225	4.310
11/01/2014	15.3871953	12.1258162	7.67371477	9	0	77.0569210	29.9182	-1.671
12/01/2014	14.4226550	11.7365322	4.51523522	9	0	88.4160224	30.2283	-1.261
13/01/2014	16.3846101	12.3866892	3.50743525	9	0	83.7385763	35.3689	2.266
14/01/2014	18.1645196	11.8926729	1.32894516	9	0	71.8294396	36.9916	3.151

Εικόνα 3: Η εισαγωγή των δεδομένων καρού στην καρτέλα κλίματος (Climate)

## 2.2.2 Καρτέλα εξατμισοδιαπνοής (Evapotranspiration)

Η εξατμισοδιαπνοή εκφράζεται στο μοντέλο κατά κάποιο τρόπο σαν υδατικό ισοζύγιο και υποδεικνύει την απαίτηση της καλλιέργειας σε νερό για την υπό φυσιολογικές συνθήκες ανάπτυξη και απόδοσή της. Στην καρτέλα της εξατμισοδιαπνοής (Evapotranspiration) (Εικόνα 4) δίνεται η δυνατότητα επιλογής υπολογισμού σύμφωνα με την εξίσωση Penman–Monteith (Εξίσωση 4) που είναι προσαρμογή της πρώτης βάσει FAO-56. Αρχικά, για την εξίσωση Penman – Monteith απαιτούνται παράμετροι από τη βιβλιογραφία που αφορούν την επίδραση του περιβάλλοντος στα φυτά και στο έδαφος, π.χ. η αγωγιμότητα των στομάτων, η

θερμοκρασία, η πίεση κ.α. Για την Εξίσωση 4, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει για τους υπολογισμούς μεταξύ της χρήσης των δεδομένων καιρού που εισήχθησαν στην προηγούμενη καρτέλα ή της εισαγωγής δεδομένων από λυσίμετρο. Το τελευταίο αποτελεί όργανο που μπορεί να εγκατασταθεί στο πεδίο και να συλλέξει δεδομένα (εδαφικής υγρασίας, ταχύτητα ανέμου κ.α.) που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής. Τέλος, μπορεί να εισαχθεί χρονοσειρά με δεδομένα που περιλαμβάνουν την ημερομηνία και την ημερήσια εξωτερικά υπολογισμένη τιμή σε mm/day.



Εικόνα 4: Η καρτέλα υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής (Evapotranspiration)

Για την παρούσα εργασία ο υπολογισμός της παραμέτρου αυτής έγινε με τη χρήση των δεδομένων της καρτέλας κλίματος.

### 2.2.3 Καρτέλα άρδευσης (Irrigation)

Για την άρδευση (Irrigation) (Εικόνα 5) εισάγονται δεδομένα σε αρχείο Excel που αφορούν την παροχή του (L/h), την ώρα έναρξης και λήξης της άρδευσης και της βασικής λίπανσης, την αλατότητα του νερού (dS/m) και η συγκέντρωση του αζώτου (Nitrogen) (mg/L) και της ουρίας (Urea) (mg/L). Η διάρκεια της άρδευσης είναι ο απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής του νερού που ισούται με το βάθος άρδευσης και είναι συνάρτηση της διηθητικότητας του εδάφους, συνεπώς όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μικρότερη η διάρκεια άρδευσης. Στη συνέχεια, μπορεί να εισάγει την επί τοις εκατό (%) περιεκτικότητα σε NO<sub>3</sub> στη βασική λίπανση και

συμπληρώνεται αυτομάτως η περιεκτικότητα σε  $\text{NH}_4$ . Το αρχείο Excel είναι κατά κάποιο τρόπο το πρόγραμμα άρδευσης. Με τον όρο πρόγραμμα άρδευσης ορίζεται:

- 1) ο αριθμός των αρδεύσεων που πρέπει να πραγματοποιηθούν κατά τη διάρκεια μιας καλλιεργητικής περιόδου,
- 2) οι ημερομηνίες εφαρμογής,
- 3) η ποσότητα του νερού ανά εφαρμογή ώστε να διατηρείται η επιθυμητή εδαφική υγρασία [32].

Για να καταστρωθεί ένα πρόγραμμα άρδευσης λαμβάνονται υπόψη όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν το ισοζύγιο νερού σε ένα χωράφι. Ο χρήστης του SALTMED μπορεί να συμβουλευτεί το πρόγραμμα άρδευσης του εξεταζόμενου χωραφιού, εφόσον αυτό υπάρχει. Όμως το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης των επιμέρους πληροφοριών και δεδομένων νερού και πρακτικών άρδευσης, υπόγειου νερού και νερού έκπλυσης, έτσι ώστε να δίνεται σαφής εικόνα του υδατικού ισοζυγίου.

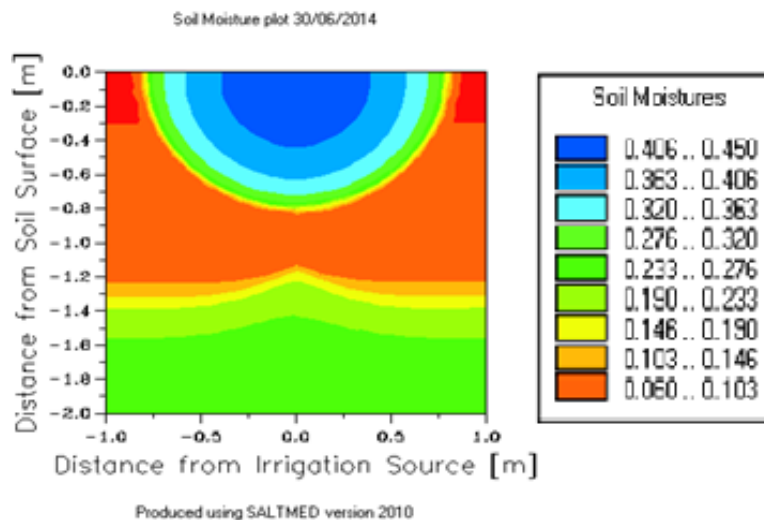
The screenshot shows the 'Field Parameters' window in the SALTMED software. The 'Irrigation' sub-tab is selected. A table lists irrigation events from 01/01/2014 to 10/01/2014, with columns for Date, Rate [L/m/hour], Irrigation start time [hh:mm], Irrigation stop time [hh:mm], and Fe St. To the right, the 'Details' section includes options for Irrigation type (Trickle (line source)), dimension (2), Fw (0.35), Frequency (1 days), Combine With Rainfall (unchecked), Max. Depth of Surface Water (150 m), Run off Excess water (unchecked), Depth of Sub-surface Irrigation (0 m), PRD Mode (No PRD), Numerical Stability Factor (1), and Pipe Drainage / Shallow Groundwater (unchecked). At the bottom, there are fields for first and last dates, percentage of  $\text{NO}_3$  and  $\text{NH}_4$  in fertigation, and  $\text{NO}_3$  and  $\text{NH}_4$  percentages. The status bar at the bottom shows '3.02.19' and 'Progress ...'.

Date	Rate [L/m/hour]	Irrigation start time [hh:mm]	Irrigation stop time [hh:mm]	Fe St.
01/01/2014	4	13:30	14:30	13:
02/01/2014	4	13:30	14:30	13:
03/01/2014	4	13:30	14:30	13:
04/01/2014	4	13:30	14:30	13:
05/01/2014	4	13:30	14:30	13:
06/01/2014	4	13:30	14:30	13:
07/01/2014	4	13:30	14:30	13:
08/01/2014	4	13:30	14:30	13:
09/01/2014	4	13:30	14:30	13:
10/01/2014	4	13:30	14:30	13:

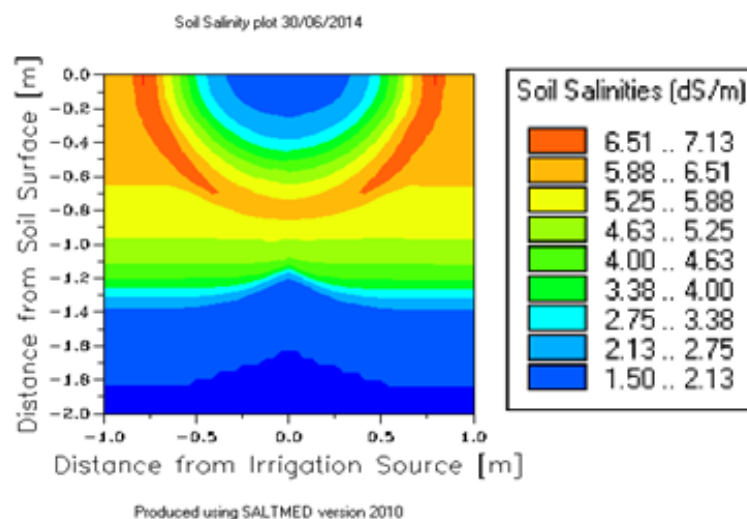
Εικόνα 5: Η καρτέλα άρδευσης

Προχωρώντας στις λεπτομέρειες της καρτέλας (Details) υπάρχει λίστα επιλογής της μεθόδου άρδευσης. Η καθεμία αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη εξίσωση ροής και δημιουργούνται προφίλ υγρασίας και αλάτωσης, καθώς και των κατανομών τους που είναι μερικά από τα Output του μοντέλου (Εικόνα 6, Εικόνα 7, Εικόνα 8). Η μορφή των προφίλ και των κατανομών διαφέρουν και εξαρτώνται από την εξίσωση ροής. Επίσης, υπάρχει η επιλογή της συχνότητας άρδευσης που μετράται σε ημέρες (days) και έπειτα ο συνδυασμός με τη βροχόπτωση

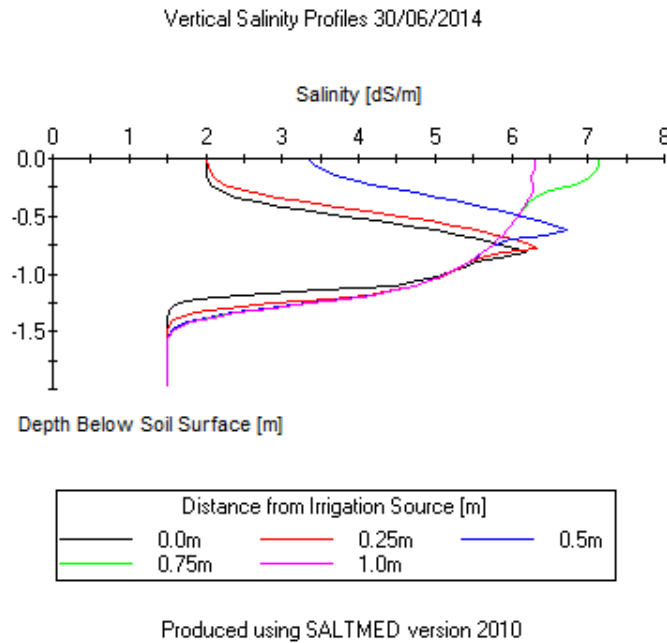
(Combine with rainfall) (σε περίπτωση θερμοκηπιακής καλλιέργειας η επιλογή αυτή είναι περιττή). Περεταίρω λεπτομέρειες για την άρδευση αφορούν κυρίως το μέγιστο βάθος του επιφανειακού νερού (Max. Depth of Surface Water) και του αρδευτικού συστήματος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (Sub-surface Irrigation) και το σύστημα αποστράγγισης (Pipe Drainage/Shallow Groundwater). Τη ροή του νερού και των διαλυμένων ουσιών στο έδαφος διέπουν οι νόμοι μεταφοράς μάζας, όπως εκφράζονται από τις εξισώσεις Darcy (για την κορεσμένη ζώνη), Richard (για την ακόρεστη) κ.α. Το SALTMED προκειμένου να προσομοιώσει τη ροή νερού και τη μεταφορά των διαλυμένων ουσιών χρησιμοποιεί τις εξισώσεις ανάλογα με τη μέθοδο άρδευσης [7].



Εικόνα 6: Παράδειγμα από κατανομή υγρασίας (Output του μοντέλου) στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου



Εικόνα 7: Παράδειγμα από κατανομή αλάτωσης (Output του μοντέλου) στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου



Εικόνα 8: Παράδειγμα από προφίλ αλάτωσης εδάφους (Output του μοντέλου)

#### 2.2.4 Καρτέλα καλλιεργειών (Crops)

Η καρτέλα των καλλιεργειών (Crops) περιλαμβάνει όλα τα χαρακτηριστικά που αφορούν τον κύκλο καλλιέργειας του φυτού. Η ενσωματωμένη βάση δεδομένων περιλαμβάνει πολλά είδη και ποικιλίες και δίνεται επιπλέον επιλογή από το χρήστη να τροποποιήσει (Edit) καλλιέργεια ή να δημιουργήσει (New, New Copy) εκ νέου μια (Εικόνα 9, Εικόνα 10).

**Field Parameters**

Select Field: 01 tomato

**Crop Details**

Common Name: Pomodoro Botanical name: Solanum lycopersicum

Area: Tympani, Crete

Root Depth [m]: 1.5 (Max) 1.2 (Min)

Unstressed crop yield [t/ha]: 60

Minimum oxygen % for Uptake: 3

**Crop Factors**

	Kc	Kcb	Fc	h(m)	LAI	±50 (dS/m)
Initial Stage	0.6	0.18	0.2	0.1	0.5	13
Mid. Stage	1.15	0.95	0.4	0.5	4	8
End Stage	0.9	0.85	0.95	1	3.5	9

**Growth Stage Lengths [days]**

	Initial	Develop	Mid	Late	Total
	30	40	45	30	145

**Cultivation**

Sowing date (DAS=0): January 1 Day 1 Degree Days 0

Emergence (DAS): 6 Initial 10

Harvest (DAS): 145 Develop 100

Basic Temperature for Degree Day calculations: 23 Mid 150

Late 175

Crop Growth Model: Fixed length growth stages

Comments: Crete, Greece

Buttons: New, New Copy, Edit, Delete

3.02.19 Progress ... Run Model Stop Model

Εικόνα 9: Η καρτέλα των καλλιεργειών



Εικόνα 10: Η καρτέλα New για τη δημιουργία καλλιέργειας

Ως λεπτομέρειες της καλλιέργειας θεωρούνται η κοινή ονομασία (με την οποία γίνεται η αποθήκευση στη βάση δεδομένων), η βοτανολογική ονομασία, η περιοχή μελέτης, το μέγιστο και το ελάχιστο βάθος του ριζικού συστήματος (Root depth), η απόδοση της καλλιέργειας κάτω από κανονικές συνθήκες (Unstressed crop yield), δηλαδή χωρίς να υπάρχει επιβάρυνση στο έδαφος από ρύπανση ή εν προκειμένω αλάτωση, η ελάχιστη απαίτηση σε οξυγόνο.

Οι συντελεστές καλλιέργειας (Crop factors), όπως  $K_c$ ,  $K_{cb}$ ,  $h$ , LAI,  $\pi_{50}$  αφορούν τα τρία στάδια της (αρχική, μεσαία, τελική) και εξαρτάται από το είδος και την ποικιλία του φυτού. Οι τιμές τους είναι χαρακτηριστικές για κάθε φυτό, βρίσκονται στη βιβλιογραφία και έχουν οριστεί αρχικά από το κείμενο FAO -24 [33]. Ο συντελεστής  $f_c$  είναι το μέσο κλάσμα φυτοκάλυψης του εδάφους. Ο συντελεστής καλλιέργειας  $K_c$  είναι αδιάστατος και συνδέεται με το βασικό συντελεστή καλλιέργειας  $K_{cb}$  και το συντελεστή εξάτμισης του εδάφους  $K_e$  ως εξής:  $K_c = K_{cb} + K_e$ . Οι δείκτες  $c$  και  $b$  είναι διορθωτικοί παράγοντες της εξίσωσης Penman και Blaney–Criddle αντίστοιχα [32].

Η διάρκεια των σταδίων ανάπτυξης (Growth Stage Lengths) έχει μονάδες μέτρησης τη μια ημέρα (day) και διακρίνεται σε 4 φάσεις: την αρχική (Initial), την ανάπτυξη (Development), την ενδιάμεση (Mid. Season), την τελική (Late Season) και τέλος, αυτομάτως συμπληρώνεται το σύνολο των ημερών (Total). Ο  $K_e$ , όπως φαίνεται και στην καρτέλα Crops (Εικόνα 9) είναι διαφορετικός για κάθε στάδιο ανάπτυξης.

Αρχικό στάδιο (Initial Stage) ορίζεται το διάστημα μεταξύ της σποράς και της εμφάνισης περίπου κατά 10% κάλυψη του εδάφους με πράσινη βλάστηση. Στα πολυετή φυτά αυτό σημαίνει την εμφάνιση καινούριων φύλλων. Σε αυτό το στάδιο η περιοχή φυλλώδους κάλυψης είναι μικρή και συνεπώς ο δείκτης της είναι ανάλογος (Leaf Area Index - LAI) και η εξατμισοδιαπνοή αφορά κυρίως την εξάτμιση από το έδαφος. Υψηλή τιμή  $K_c$  σημαίνει υγρή

επιφάνεια εδάφους λόγω βροχής ή άρδευσης, ενώ χαμηλή τιμή είναι ένδειξη ξηρής επιφάνειας εδάφους.

Στάδιο ανάπτυξης (Crop Development Stage) είναι εκείνο μεταξύ της κατά 10% κάλυψης του εδάφους μέχρι την πλήρη κάλυψη που σε πολλές καλλιέργειες σηματοδοτείται κατά την έναρξη της ανθοφορίας. Όσο μεγαλώνει η καλλιέργεια και δημιουργεί σκίαση στο έδαφος, η εξάτμιση ελαττώνεται και η κύρια διεργασία είναι η διαπνοή. Σε αυτό το στάδιο, ο συντελεστής  $K_c$  περιγράφει την ποσότητα της εδαφικής κάλυψης και της ανάπτυξης του φυτού. Οι τιμές του συντελεστή εξαρτώνται από το είδος της καλλιέργειας, τη συχνότητα με την οποία βρέχεται το χώμα και την ποσότητα του νερού που χρησιμοποιεί η καλλιέργεια σε σχέση με την αναφοράς σε περίπτωση πλήρους εδαφικής κάλυψης.

Το ενδιάμεσο στάδιο (Mid-season stage) ξεκινά από την αποτελεσματική πλήρη κάλυψη και διαρκεί μέχρι την αρχή της ωρίμανσης του καρπού. Οι ενδείξεις της ωρίμανσης είναι το γήρας του καρπού και των φύλλων, η πτώση των φύλλων και σε αυτό το σημείο η εξατμισοδιαπνοή μειώνεται σε σχέση με την τιμή αναφοράς. Το ενδιάμεσο στάδιο είναι συνήθως το μεγαλύτερο για τα περισσότερα ετήσια και πολυετή φυτά, αλλά δεν ισχύει το ίδιο για τα φυλλώδη λαχανικά. Ο συντελεστής  $K_c$  φτάνει στη μεγαλύτερη τιμή του στα μέσα της καλλιεργητικής περιόδου και είναι σχετικά σταθερός ανεξάρτητα από το είδος φυτού ή καλλιεργητικής μεθόδου. Η απόκλιση από την τιμή 1 οφείλεται στα διαφορετικά ύψη των καλλιεργειών και τις καιρικές συνθήκες.

Το τελικό στάδιο (Late season stage) είναι η περίοδος από την ωρίμανση μέχρι τη συγκομιδή ή το πλήρες γήρας. Ο συντελεστής  $K_c$  και η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ( $ET_c$ ) συμπεραίνεται έπειτα από τη συγκομιδή, τη φυσική ξήρανση της καλλιέργειας και την πτώση των φύλλων. Η τιμή του συντελεστή στο τέλος της περιόδου είναι δείκτης της καλλιεργητικής πρακτικής και της άρδευσης. Ο  $K_c$  έχει υψηλή τιμή αν η καλλιέργεια ποτίζεται συνέχεια και η συγκομιδή γίνεται όσο είναι νωπή η βιομάζα, ενώ έχει χαμηλή τιμή όταν η συγκομιδή πραγματοποιείται αφού αφεθεί να ξηρανθεί η καλλιέργεια [33].

Όσον αφορά την καλλιέργεια, τα χαρακτηριστικά του φυτού που συμπληρώνονται στην καρτέλα Crops (Εικόνα 9), αυτά είναι: ο μήνας και η ημέρα σποράς, η ημέρα εμφάνισης του βλαστού (Emergence), η συγκομιδή (Harvest), και η βασική θερμοκρασία ανά βαθμοημέρα στην οποία ευνοείται η ανάπτυξη (Basic Temperature for Degree Day calculations). Το μοντέλο θεωρεί ότι η σπορά γίνεται την πρώτη μέρα της μοντελοποίησης, ενώ σε πραγματικές συνθήκες και ειδικά σε συνθήκες θερμοκηπίου τα φυτά δε σπέρνονται, αλλά φυτεύονται σπορόφυτα που αναπτύχθηκαν σε σπορεία. Η συγκομιδή είναι απαραίτητο να έχει την ίδια διάσταση με το σύνολο των ημερών του Growth Stage Lengths, γιατί το μοντέλο τα συσχετίζει και δε μπορεί να τρέξει.

### 2.2.5 Καρτέλα αζώτου (Nitrogen)

Στην καρτέλα του αζώτου (Εικόνα 11) εισάγονται στοιχεία που αφορούν την επιφανειακή προσθήκη της λίπανσης στο έδαφος. Η επιφανειακή λίπανση έχει ως στόχο την προσθήκη του αζώτου που δεν πραγματοποιήθηκε στη βασική λίπανση, με σκοπό να μην γίνει έκπλυσή του λόγω βροχής και άρδευσης. Αρχικά, σημειώνονται οι παράμετροι θερμοκρασίας του εδάφους (Soil Temperature Parameters) που περιλαμβάνουν το στρώμα των υπολειμμάτων (Litter) και το οργανικό κλάσμα (organic matter fraction). Οι συντελεστές αυτοί υποδεικνύουν πώς το πάχος των στρωμάτων αυτών επηρεάζουν τη θερμοκρασία του εδάφους. Επίσης, η καρτέλα περιλαμβάνει τις παραμέτρους πρόσληψης (Uptake parameters) του αζώτου (N) και τις αρχικές συνθήκες (Initial conditions) πριν την εφαρμογή του λιπάσματος, όπως η περιεκτικότητα σε άνθρακα, άζωτο, υγρασία. Επίσης, εισάγεται το βάθος άροσης (Plough layer depth) και το κλάσμα κορεσμένης υγρασίας στο οποίο ξεκινάει η απονιτροποίηση (Fraction of saturated moisture at which denitrification starts).

The screenshot shows the 'Field Parameters' tab for '01 tomato'. The 'Nitrogen' sub-tab is active. The interface includes several input fields and a table for daily nitrogen inputs.

**Soil Temperature Parameters:**

- Litter (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>): 1.0
- Organic Matter fraction: 0.05

**Uptake parameters:**

- Ua: 20.0 g N/m<sup>2</sup>/season
- Ub: 1.0 g N/m<sup>2</sup>/season
- Uc: 0.12 1/day
- fma: 0.08 1/day

**Initial Conditions:**

- Initial N in humus: 1 gN/m<sup>2</sup>
- Initial C in litter: 1 gC/m<sup>2</sup>
- Dry deposition: 0.001 gN/m<sup>2</sup>/day
- Wet deposition: 0.0008 mgN/m<sup>2</sup>/mm rain
- Plough layer depth: 0.32 metre
- Fraction of saturated moisture at which Denitrification starts: 0.80

**Model N Parameters:**

ID	Name	Symbol	Value	Unit
1	dissolution rat	DR	0.15	day <sup>-1</sup>
2	specific miner	Kh	1E-05	day <sup>-1</sup>
3	specific rate c	Kf	0.03	day <sup>-1</sup>
4	synthesis effi	fe	0.5	-
5	humification	fh	0.2	-

**Daily Nitrogen Inputs g-N/m<sup>2</sup>:**

Date	Manure-Bed	Manure-Fae
01/01/2014	0	0
02/01/2014	0	0
03/01/2014	0	0
04/01/2014	0	0
05/01/2014	0	0
06/01/2014	0	0
07/01/2014	0	0
08/01/2014	0	0
09/01/2014	0	0
10/01/2014	0	0
11/01/2014	0	0
12/01/2014	0	0
13/01/2014	0	0
14/01/2014	0	0
15/01/2014	0	0
16/01/2014	0	0
17/01/2014	0	0

File: C:\Program Files (x86)\Saltmed 2010\Example Files\Nitrogen\antoJunePOMODORO.xls

3.02.19 Progress ... Run Model Stop Model

Εικόνα 11: Η καρτέλα του αζώτου (Nitrogen).

Οι παράγοντες αυτοί αφορούν τη δράση των μικροοργανισμών στο έδαφος. Τα εισαγόμενα δεδομένα περιλαμβάνουν ημερήσιες τιμές αζώτου που προσλαμβάνεται από το στρώμα κοπριάς ή/και των καλλιεργητικών υπολειμμάτων, τα νιτρικά ιόντα (NO<sub>3</sub>) και τα ιόντα αμμωνίου (NH<sub>4</sub>) (g N/m<sup>2</sup>). Τα δεδομένα εισαγωγής είναι διαφορετικά για κάθε φυτό, αφού το καθένα έχει διαφορετικές ανάγκες σε άζωτο και διαφορετικό χρόνο εφαρμογής. Για παράδειγμα, σε καλλιέργειες ντομάτας δεν εφαρμόζεται λίπασμα κάποιο διάστημα πριν τη συγκομιδή, γιατί δημιουργεί στον καρπό μαύρες κηλίδες.

### 2.2.6 Καρτέλα γενικών δεδομένων (General)

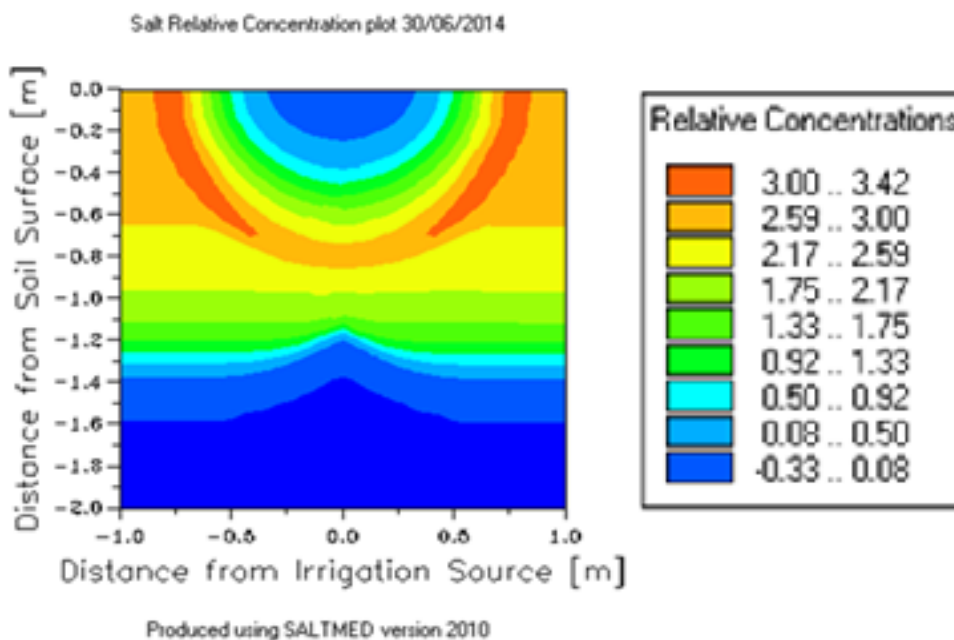
Στην καρτέλα General (Εικόνα 12) επιλέγεται αρχικά αν υπολογίζονται ή αν εισάγονται οι παράμετροι του δυναμικού κατακράτησης (matric potential) και της αγωγιμότητας (conductivity). Στη συνέχεια, εισάγονται οι γενικές παράμετροι για το έδαφος, όπως ο τύπος του εδάφους, ο ορίζοντας, η αλατότητα (dS/m), η υγρασία ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ), η περιεκτικότητα σε νιτρικά ( $\text{NO}_3 \text{ mg/L}$ ) και αμμωνιακά ιόντα ( $\text{NH}_4 \text{ mg/L}$ ), το γεωγραφικό μήκος και πλάτος, το υψόμετρο από το επίπεδο της θάλασσας. Ο τύπος του εδάφους είναι δυνατόν να επιλεγεί από την ενσωματωμένη λίστα του μοντέλου που παρουσιάζει αρκετή ποικιλία. Η επιλογή αυτή συνήθως πραγματοποιείται έπειτα από δειγματοληψία. Κατά τη διεξαγωγή της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε η πραγματική σύσταση της περιοχής μελέτης. Το έδαφος έχει την εξής σύσταση: άργιλος (clay): 30.2%, άμμος (sand): 46.7%, ιλύς (silt): 23.2%. Τα ποσοστά αυτά καθιστούν το έδαφος αργιλοπηλώδες που υπάρχει στην ενσωματωμένη βάση δεδομένων με την ονομασία Clay loam. Η αγωγιμότητα του νερού από την καρτέλα της άρδευσης συγκρίνεται με την τιμή αλατότητας του εδάφους της καρτέλας General (Εικόνα 13) και το μοντέλο εξάγει κατανομή της σχετικής συγκέντρωσης στο έδαφος.

Soil	Horizon (m)	Moisture content ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	Salinity (dS/m)	NO3 (mg N/L)	NH4 (mg N/L)
1 Clay loam	2.0	0.25	1.5	1.0	1.0
2					
3					
4					

Εικόνα 12: Η καρτέλα General που περιλαμβάνει τα γενικά χαρακτηριστικά του εδάφους

Η επιλογή της ωφέλιμης βροχής (Effective rainfall) δείχνει το ποσοστό της βροχής που συμβάλλει στην κάλυψη των αναγκών της καλλιέργειας, ενώ το υπόλοιπο νερό απορρέει ή διηθείται. Το ποσοστό της ωφέλιμης βροχής είναι συνάρτηση των χαρακτηριστικών της βροχής, του εδάφους και της καλλιέργειας. Σε περίπτωση βροχής μεγάλο ύψος και μεγάλη ένταση το ποσοστό της ωφέλιμης βροχής είναι μικρό, ενώ φτάνει στο 100% αν υπάρχουν

βροχές με μεγάλη συχνότητα, μικρού ύψους σε καλλιέργεια που καλύπτει όλη την επιφάνεια του χωραφιού [32].



Εικόνα 13: Παράδειγμα κατανομής σχετικής συγκέντρωσης αλατιού στο έδαφος (Output μοντέλου) (drip irrigation)

### 2.2.7 Καρτέλα των προφίλ (Profiles)

Στην καρτέλα των προφίλ (Profiles) (Εικόνα) εισάγονται οι τιμές βάθους (Depth) και απόστασης από την πηγή άρδευσης (Distance from Irrigation Source) που χρησιμοποιούνται για τους άξονες των εξαγόμενων διαγραμμάτων (Output) από το μοντέλο. Τα διαγράμματα έχουν τη μορφή που φαίνεται στις εικόνες (Εικόνα 8) και παρουσιάζουν τα προφίλ αλάτωσης την τελευταία μέρα μοντελοποίησης για όλες τις αποστάσεις από την πηγή άρδευσης.

Τα αρχεία που εξάγονται αποθηκεύονται στον φάκελο των αποτελεσμάτων (Results) του SALTMED ο οποίος περιέχει 8 επιμέρους φακέλους με ονόματα 01 ως 08. Κάθε αριθμός αντιστοιχεί σε ένα πεδίο, δηλαδή μια καλλιέργεια, χωράφι ή θερμοκήπιο. Κάθε φάκελος πεδίου περιέχει όλα τα αρχεία αποτελεσμάτων. Για παράδειγμα, ο φάκελος *CropYield01.csv* περιέχει τα αποτελέσματα της απόδοσης της καλλιέργειας που βρίσκεται στο πεδίο 01 για κάθε μέρα μοντελοποίησης. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διαβάσει και να χρησιμοποιήσει αυτά τα δεδομένα κατά βούληση.

File

Global Model Parameters | **Field Parameters**

Select Field: 03 paprika

Climate | Evapotranspiration | Irrigation | Crops | Crop Growth | Rotation | Nitrogen | General | Parameters | Profiles | Drainage | **Field 03**

Specify positions of output profiles in terms of depth and distance from irrigation source (m) for plotting only

Depth		Distance form Irrigation Source	
Profile 1	0.0	Profile 1	0.0
Profile 2	0.5	Profile 2	0.25
Profile 3	1.0	Profile 3	0.5
Profile 4	1.5	Profile 4	0.75
Profile 5	2.0	Profile 5	1.0

Observation Points  
Specify measurement positions in terms of depth and distance from irrigation source (m) to compare simulated with the measured values

	Depth	Distance From Irrigation Source
Point 1	0.0	0.0
Point 2	0.0	0.0
Point 3	0.0	0.0
Point 4	0.0	0.0
Point 5	0.0	0.0

3.02.19 Progress ... Run Model Stop Model

32 bit mode

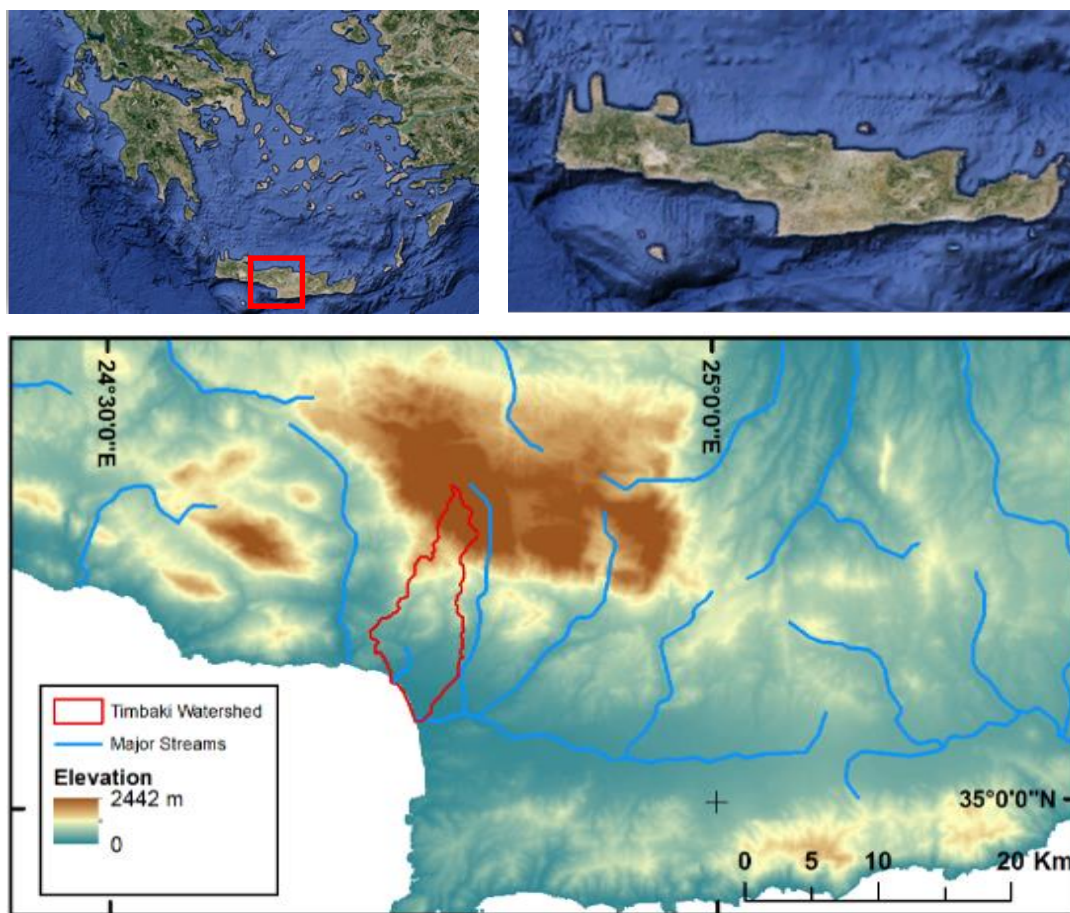
Εικόνα 14: Η καρτέλα Profiles στην οποία εισάγονται οι αποστάσεις των προφίλ από το σημείο άρδευσης

Τα δεδομένα για την κατασκευή των διαγραμμάτων των προφίλ της αλάτωσης ελήφθησαν από τα εξαγόμενα αρχεία του μοντέλου με τίτλο *SoilSalinityProfile.dat* που περιέχει τιμές αλατότητας για κάθε σημείο βάθους και απόστασης από την πηγή άρδευσης ανά ημέρα που έτρεξε το μοντέλο.

### 3 Περιοχή μελέτης

#### 3.1 Τυμπάκι

Το Τυμπάκι βρίσκεται στην νότια πλευρά της περιφερειακής ενότητας Ηρακλείου και ανήκει στο Δήμο Φαιστού (Σύστημα Καλλικράτης Ν.3852/2010). Η λεκάνη απορροής του Τυμπακίου συνδέεται με τη δυτική πεδιάδα της Μεσσαράς από τον ποταμό Γεροπόταμο μέσω του φαραγγιού της Φαιστού.



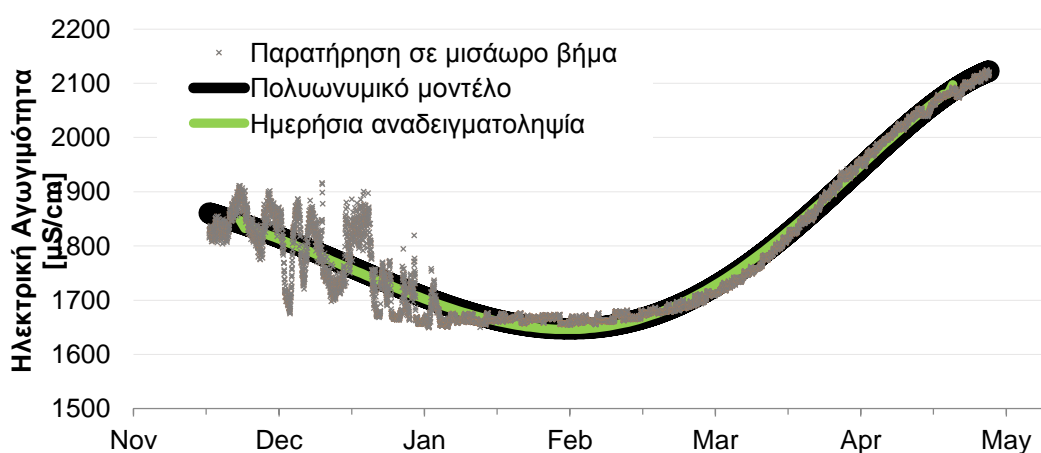
Εικόνα 15: Η περιοχή μελέτης του Τυμπακίου

Η περιοχή υπό γεωλογική σκοπιά αποτελείται από κροκαλοπαγή, αργίλους, ιλύες, αμμώδη εδάφη και μάργες που ακολουθούν άνιση κατανομή. Οι κύριες χρήσεις γης στην περιοχή του Τυμπακίου περιλαμβάνουν ελαιώνες, θερμοκηπιακές καλλιέργειες και λαχανοκομία. Το κλίμα είναι υπο-υγρό Μεσογειακό προς ημι-άνυδρο. Το υδρολογικό έτος χωρίζεται σε υγρή και ξηρή περίοδο και κύρια χαρακτηριστικά του κλίματος είναι οι ήπιοι και υγροί χειμώνες (μέση θερμοκρασία 12 °C) και ξηρά και θερμά καλοκαίρια (μέση θερμοκρασία 23 °C). Η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι περίπου 500 mm. Η λεκάνη απορροής του Τυμπακίου εκτείνεται από ύψος 2,440 m στο βορρά ως το ύψος της θάλασσας στο νότο και η τοπογραφία της είναι γενικά επίπεδη με απότομες κλίσεις στα νοτιοανατολικά με το



υψηλότερο σημείο να βρίσκεται στον Ψηλορείτη. Η υδρογεωλογία της περιοχής του Τυμπακίου είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με αυτή της πεδιάδας της Μεσσαράς, παρόλο που το σχεδόν αδιαπέραστο τεκτονικό κέρας της Φαιστού περιορίζει τη ροή του νερού στο φαράγγι του Γεροποτάμου.

Η περιοχή έχει έντονες εποχιακές διαφορές μεταξύ του θερμού και ξηρού καλοκαιριού και του υγρού χειμώνα. Το μεγαλύτερο μέρος των βροχοπτώσεων (κατά μέσο όρο το 65%) εξαφανίζεται λόγω εξατμισοδιαπνοής, η οποία αυξάνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας κάνοντας την επαναφόρτιση αμελητέα. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού οι αντλήσεις του νερού αγγίζουν το μέγιστο ρυθμό τους και κατά τη διάρκεια των υγρών μηνών το νερό χάνεται λόγω απορροής στη θάλασσα. Η κατάσταση αυτή έχει επιδεινωθεί κατά πάσα πιθανότητα λόγω της παρουσίας των θερμοκηπίων τα οποία είναι κατασκευασμένα από αδιαπέραστο για το νερό πλαστικό υλικό που εμποδίζει την επαναφόρτιση στο έδαφος. Υπολογίστηκε ότι στην εξεταζόμενη περιοχή το 25% των βροχοπτώσεων εμπλουτίζουν τα υπόγεια νερά και το 10% καταλήγει στη θάλασσα [34]. Στο σημείο Κόκκινος Πύργος για το οποίο πραγματοποιείται και η μελέτη, από δειγματοληψία σε γεώτρηση προέκυψε ότι το νερό άρδευσης έχει εποχιακή διακύμανση και το εύρος των τιμών είναι μεταξύ 1 – 3 dS/m (Εικόνα 16). Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας σταθμήμετρο (Εικόνα 17).



Εικόνα 16: Τιμές αγωγιμότητας νερού γεώτρησης στην περιοχή μελέτης



Εικόνα 17: Το σταθμήμετρο κατά τη διάρκεια μετρήσεων σε γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης.



Η Κρήτη, με μερικές εξαιρέσεις, πριν τη Νεολιθική εποχή ήταν καλυμμένη με δάση, όμως τη σύγχρονη εποχή δεν υπάρχει στο νησί κάποιο δάσος. Πλέον στο τοπίο κυριαρχούν οι θαμνότοποι που αποτελούνται κυρίως από αειθαλή φρύγανα τα οποία συναντώνται σε υψόμετρο από 0 ως 600 m, ενώ δεν αποκλείεται και η εμφάνισή τους στα 1,000 m. Στις χαμηλότερες ζώνες και σε παραθαλάσσιες πεδιάδες παρατηρούνται πληθυσμοί από μαστιχόδεντρα (*Pistacia lentiscus*), χαρουπιές (*Ceratonia siliqua*) και ελαιόδεντρα (*Olea europaea*). Η πεδιάδα της Μεσσαράς καλλιεργείται επί χιλιάδες χρόνια πράγμα που εξηγεί ότι το 30% της χλωρίδας της Κρήτης συνδέεται με τη γεωργία, ενώ περίπου 200 είδη είναι εισαγόμενα από το εξωτερικό. Η περιοχή αποτελείται από την κυρίως πεδιάδα και την λοφώδη περιοχή γύρω από την πεδιάδα και η κάθε ζώνη έχει διαφορετικά αγροτικά και οικολογικά χαρακτηριστικά, ενώ υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ τους σε περιβαλλοντικές μεταβλητές, όπως η διαθεσιμότητα του νερού και της ζωοτροφής, η διατήρηση του εδάφους, ο κίνδυνος πυρκαγιάς κλπ. Από τη δεκαετία του 1980 η ελώδης περιοχή του Τυμπακίου έχει μετατραπεί σε καλλιεργημένη γη [35].

Το τοπίο στην περιοχή του Τυμπακίου αποτελείται από ελαιώνες, αμπελώνες και θερμοκήπια, όπου και βρίσκεται η πλειοψηφία των καλλιεργούμενων ειδών. Οι ευνοϊκές κλιματικές συνθήκες κατά τη διάρκεια του έτους έχουν συμβάλει στην υψηλή εκμετάλλευση της περιοχής με θερμοκηπιακές καλλιέργειες που λαμβάνουν χώρα δυο φορές το χρόνο και περιλαμβάνουν αλλόχθονα είδη. Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τα κύρια είδη που καλλιεργούνται στο Τυμπάκι.

Πίνακας 4: Οι κύριες ποικιλίες οπωροκηπευτικών που καλλιεργούνται στο Τυμπάκι.

Κοινή Ονομασία	Βοτανολογική Ονομασία
Ντομάτα	<i>Solanum lycopersicum</i>
Αγγούρι	<i>Cucumis sativus</i>
Κολοκύθι	<i>Cucurbita pepo</i>
Μελιτζάνα	<i>Solanum melongena</i>
Πιπεριά	<i>Capsicum annuum</i>
Φασολάκι	<i>Phaseolus vulgaris</i>

Στην ορεινή Ελλάδα γενικά, οι αγροτικές περιοχές χαρακτηρίζονται από μείωση πληθυσμού λόγω οικονομικών και κοινωνικών συνθηκών. Η εγκατάλειψη της γης που είναι αποτέλεσμα της μετανάστευσης και της απασχόλησης εκτός του αγροτικού τομέα έχει συμβάλει στην μείωση της παραγωγικότητας της γης που είναι επιδεκτικές πλέον στην περιβαλλοντική υποβάθμιση. Ομοίως, στη Μεσσαρά και το Τυμπάκι τα χωράφια είναι διασκορπισμένα ανάμεσα στα χωριά. Ο μέσος αγρότης κατέχει περίπου 5-10 αγροτεμάχια με μέση έκταση 3.5

εκτάρια και η μέση απόσταση των αγροτεμαχίων από το χωριό είναι 3-5 km. Αυτή η διαίρεση της γης σε συνδυασμό με την κρητική εθιμοτυπία και το σύστημα κληρονομιάς, αποθαρρύνουν τον αναδασμό οδηγώντας σε σταδιακή μείωση της γεωργικής γης. Όλη η κατάσταση εξηγεί τα μικρού μεγέθους αγροτεμάχια που υπάρχουν στην περιοχή, καθώς επίσης η φορολογία επηρεάζει το μέγεθος των αγροτεμαχίων. Οι επικρατούσες καλλιέργειες στην περιοχή είναι μονοκαλλιέργειες, όπως ελαιώνες και αμπέλια στους λόφους και θερμοκηπιακές καλλιέργειες οπωροκηπευτικών στα πεδινά. Η μονοκαλλιέργεια καθιστά τους αγρότες ευάλωτους στις προκλήσεις της αγοράς [35].

## 3.2 Επεξεργασία σεναρίων

Η διερεύνηση των επιπτώσεων της αλάτωσης για την παρούσα εργασία διακρίνεται σε δύο σκέλη προσομοιώσεων, βάσει των αρχικών συνθηκών. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις υπό διαφορετικές συνθήκες αγωγιμότητας αρδευτικού ύδατος και εδάφους και στη συνέχεια υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Το δεύτερο σετ προσομοιώσεων στοχεύει στη διερεύνηση των επιπτώσεων, λόγω της μεταβολής των κλιματικών συνθηκών στο μέλλον, στην αλάτωση και στην απόδοση των καλλιεργειών.

Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για την καλλιέργεια ντομάτας (*Solanum lycopersicum*) και στη συνέχεια για της μελιτζάνας (*Solanum melongena*) και της πιπεριάς (*Capsicum annuum*), ώστε να βρεθεί πιθανή ανθεκτική εναλλακτική. Η αρδευτική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι η άρδευση σε σταγόνες που στο μοντέλο φέρει την ονομασία trickle irrigation. Η μέθοδος αυτή είναι η επικρατούσα στην περιοχή μελέτης. Τέλος, το προφίλ του εδάφους καθ' όλη τη διάρκεια των προσομοιώσεων θεωρήθηκε ομοιόμορφο.

### 3.2.1 Σενάριο διαφορετικών συνθηκών αγωγιμότητας

Τα σενάριο των μεταβαλλόμενων συνθηκών αγωγιμότητας έχουν σταθερές κλιματικές συνθήκες (παρούσα κλιματική κατάσταση). Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα σενάριο προσομοιώσεων για κάθε μια από τις τρεις καλλιέργειες. Δοκιμάστηκαν 3 τιμές αγωγιμότητας στο έδαφος 1, 1.5, 2 dS/m (στήλη), όπου για κάθε μια έγινε μοντελοποίηση για τις τρεις τιμές αγωγιμότητας στο νερό (γραμμή). Η επιλογή των τιμών αγωγιμότητας στοχεύει στη δημιουργία ενός εύρους σεναρίων επιβάρυνσης στο έδαφος. Ως παράδειγμα αναφέρεται το σενάριο με συντομογραφία S1W1-2014, το οποίο σημαίνει ότι δοκιμάστηκε αγωγιμότητα στο έδαφος 1dS/m, αγωγιμότητα στο νερό 1dS/m και η χρονιά προσομοίωσης είναι το 2014.

Πίνακας 5: Τα σενάρια προσομοίωσης υπό σταθερές συνθήκες κλίματος (παρούσα κλιματική κατάσταση)

		Αγωγιμότητα στο νερό (W)		
		1 dS/m	2 dS/m	3 dS/m
Αγωγιμότητα στο έδαφος (S)	1 dS/m	S1W1-2014	S1W2-2014	S1W3-2014
	1.5 dS/m	S1.5W1-2014	S1.5W2-2014	S1.5W3-2014
	2 dS/m	S2W1-2014	S2W2-2014	S2W3-2014

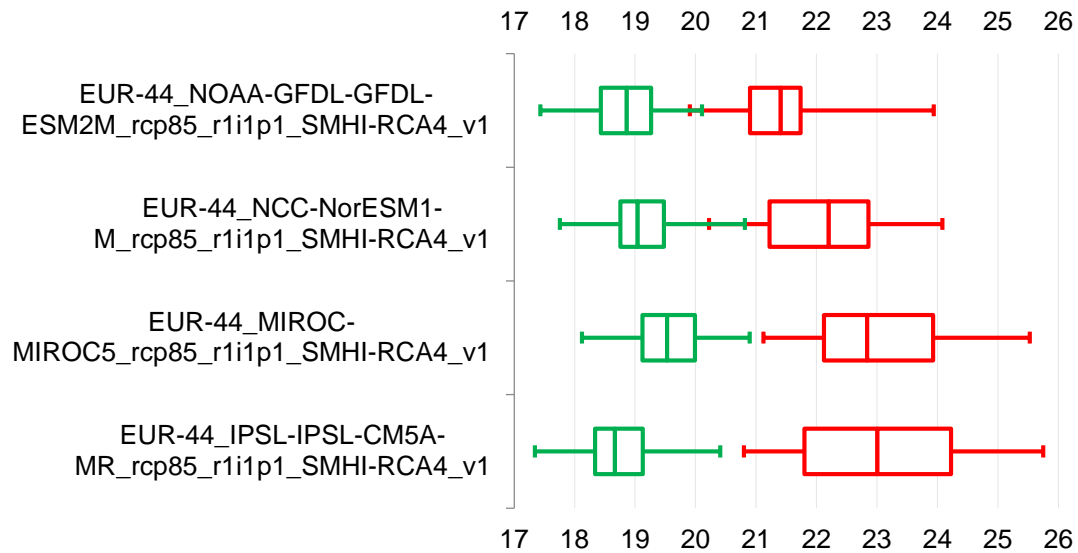
### 3.2.2 Σενάρια διαφορετικών συνθηκών κλίματος

Τα σενάρια του δεύτερου σετ προσομοιώσεων έχουν σταθερές αρχικές συνθήκες εδάφους και άρδευσης. Το έδαφος έχει τιμή αγωγιμότητας 1.5 dS/m και περιλαμβάνει την εισαγωγή σταθερής τιμής αγωγιμότητας 2dS/m στο αρχείο Excel της άρδευσης για όλη την περίοδο προσομοίωσης. Τα κλιματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων ελήφθησαν από τέσσερα κλιματικά μοντέλα (IPSL, MIROC, NCC, NOAA) του Couple Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). Τα μοντέλα απαρτίζονται από σενάρια μεταβολής της μέσης δρώσας ακτινοβολίας (RCP) και για την εκτέλεση των δοκιμών επιλέχθηκε το πιο απαισιόδοξο σενάριο, δηλαδή RCP8.5 (αύξηση της μέσης δρώσας ακτινοβολίας κατά 8.5 W/m<sup>2</sup>). Οι τιμές θερμοκρασίας και ακτινοβολίας είναι οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν από τα Output των ιστορικών πειραμάτων των μοντέλων. Για την παρούσα κλιματική κατάσταση ελήφθησαν τιμές από το διάστημα 1951-2041. Για τις προσομοιώσεις διερεύνησης των υπό μεταβολή συνθηκών χρησιμοποιήθηκαν τιμές από το διάστημα 2041-2100. Ο Πίνακας 6 δείχνει τις επικρατούσες θερμοκρασίες στην παρούσα κλιματική κατάσταση. Για την παρούσα κλιματική κατάσταση δημιουργήθηκαν κατανομές Quartile που απαρτίζονταν από τις τιμές των θερμοκρασιών όλων των εξεταζόμενων μοντέλων (Εικόνα 18, πράσινη κατανομή).

Πίνακας 6: Επικρατούσες τιμές θερμοκρασίας (παρούσα κλιματική κατάσταση)

Ετήσια θερμοκρασία (°C)	
Ελάχιστη T <sub>min</sub>	15.37
Μέγιστη T <sub>max</sub>	22.32
Μέση T <sub>mean</sub>	18.85

Στη συνέχεια, για κάθε τιμή τεταρτημόριου της κατανομής έγινε αντιστοίχιση σε τιμή από το διάστημα 2041-2100. Για το έτος που προέκυψε δημιουργήθηκε νέα κατανομή (Εικόνα 18, κόκκινη κατανομή).



Εικόνα 18: Κατανομές παρούσας (πράσινο) και μελλοντικής (κόκκινο) θερμοκρασίας για τα 4 μοντέλα που εξετάζονται.

Πίνακας 7: Σενάρια διαφορετικών συνθηκών κλίματος

Περιοχικό Κλιματικό Μοντέλο (RCM)	IPSL	IPSL-W2-2014
		IPSL-W2-2099
	MIROC	MIROC-W2-2014
		MIROC-W2-2078
	NOC	NOC-W2-2014
		NOC-W2-2086
	NOAA	NOAA-W2-2014
		NOAA-W2-2076

Τα RCMs έτρεξαν για το διάστημα 1951 ως 2100 και αρχικά ελήφθησαν οι απαραίτητες τιμές των εξεταζόμενων παραμέτρων για το έτος 2014. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν κατανομές τεταρτημόριων (quartiles) για κάθε μοντέλο για τα διαστήματα 1951-2010 και 2041-2100, στα οποία έγιναν οι αντιστοιχίες των τιμών θερμοκρασίας σύμφωνα με τα τεταρτημόρια. Για το αντίστοιχο μελλοντικό έτος πραγματοποιήθηκαν οι μοντελοποιήσεις με τιμή αγωγιμότητας 2 dS/m.

## 4 Αποτελέσματα

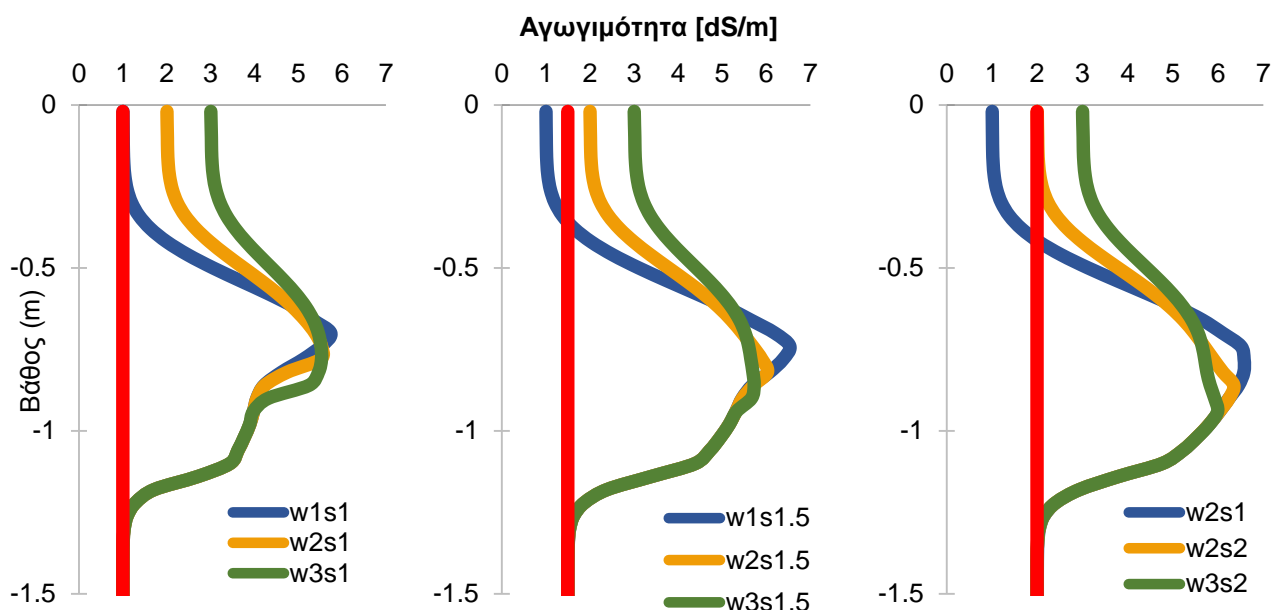
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του μοντέλου SALTMED. Σκοπός είναι να εξεταστούν οι επιπτώσεις του φαινομένου της αλάτωσης βάσει διαφορετικών σεναρίων για διάφορες περιπτώσεις εδάφους, νερού, καλλιέργειας και κλιματικών συνθηκών στην περιοχή του Τυμπακίου. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές μελέτες σχετικά με τη χρήση του μοντέλου για καλλιέργειες ανοιχτού πεδίου, όμως δεν υπάρχει κάποια μελέτη που να αφορά θερμοκηπιακή καλλιέργεια.

### 4.1 Αποτελέσματα σεναρίων μεταβαλλόμενης αγωγιμότητας

Όπως έχει προαναφερθεί, η αγωγιμότητα του εδάφους εισάγεται στη καρτέλα General (Εικόνα 12). Ουσιαστικά, τα προφίλ είναι η κατανομή της αλάτωσης σε σχέση με το βάθος και κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη τιμή αγωγιμότητας νερού (W1, W2, W3). Αυτό σημαίνει ότι στο αρχείο Excel στην καρτέλα της άρδευσης (Εικόνα 5) που εισάγεται κατά την προετοιμασία της προσομοίωσης έχει σταθερές τιμές αγωγιμότητας νερού άρδευσης καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και σταθερή παροχή (4L/h). Η άρδευση διαρκεί για μία ώρα την ημέρα που σημαίνει ότι η ημερήσια ποσότητα νερού είναι 4 L. Παράλληλα, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ομαδοποιημένα ανά αγωγιμότητα εδάφους (S1, S1.5, S2). Τέλος, σε όλα τα διαγράμματα η κόκκινη γραμμή υποδεικνύει την αρχική αγωγιμότητα του εδάφους.

#### 4.1.1 Προφίλ της αλάτωσης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αλάτωσης του εδάφους. Όλα τα προφίλ αλάτωσης αφορούν το σημείο στο οποίο βρίσκεται το φυτό, δηλαδή σε απόσταση 0 m από το σημείο άρδευσης, την τελευταία ημέρα της μοντελοποίησης. Η Εικόνα 19 παρουσιάζει τα προφίλ της αλάτωσης σε σχέση με το βάθος για το φυτό της ντομάτας. Περιγράφουν έδαφος με αγωγιμότητα 1 dS/m (S1), 1.5 dS/m (S1.5), 2 dS/m (S2) αντίστοιχα, για την παρούσα κλιματική κατάσταση.

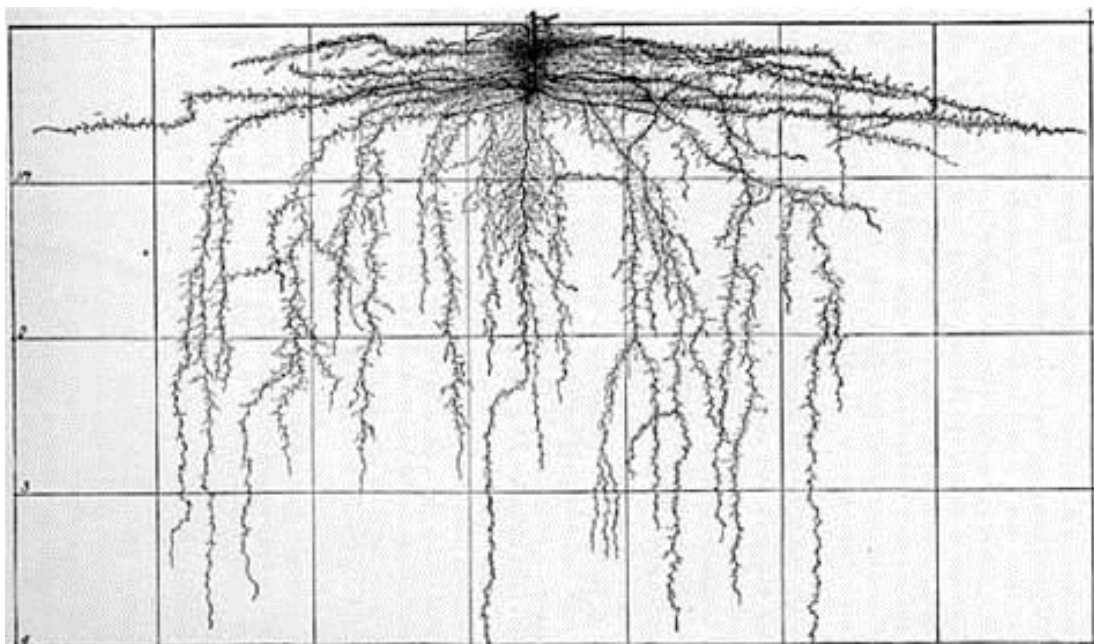


Εικόνα 19: Προφίλ αλάτωσης για τα όλα τα εξεταζόμενα σενάρια αγωγιμότητας για την καλλιέργεια της ντομάτας

Η τιμές αγωγιμότητας του εδάφους διαμορφώνονται ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, την ποιότητα του νερού άρδευσης και τη βροχόπτωση. Επιπλέον, το προφίλ της αλάτωσης εξαρτάται από την αρδευτική μέθοδο που ακολουθείται [7].

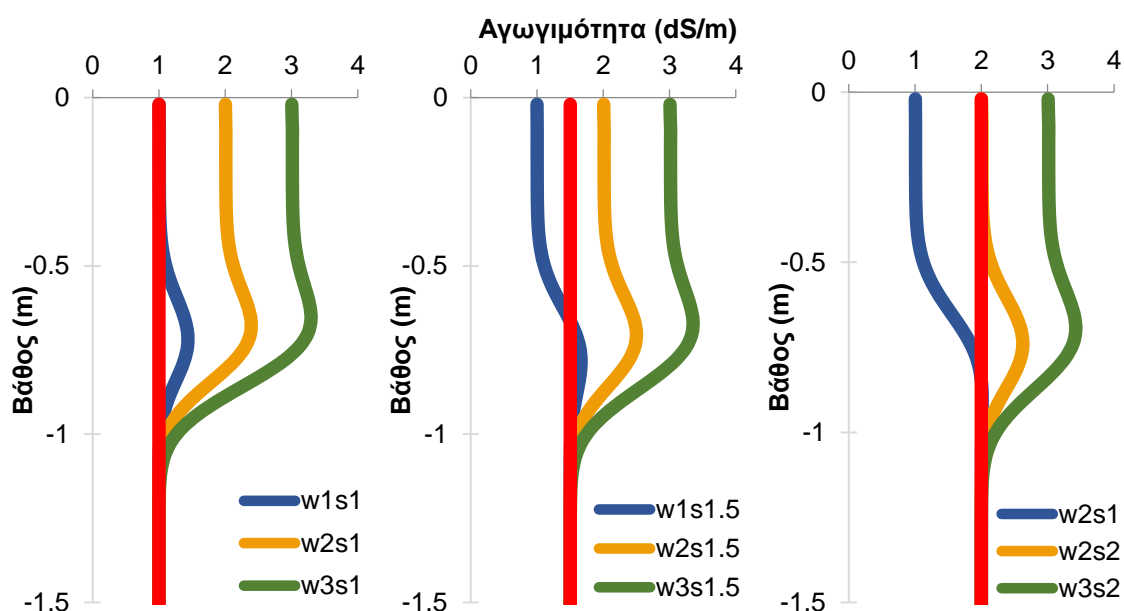
Παρατηρείται ότι και στις τρεις περιπτώσεις αγωγιμότητας εδάφους τα προφίλ ξεκινούν από την εκάστοτε αρχική τιμή αγωγιμότητας του νερού, φτάνει στο ζενίθ σε βάθος μεταξύ 0.5 – 1 m και στη συνέχεια σε βάθος μεταξύ 1 – 1.5 m η τιμή σταθεροποιείται. Οι τιμές στην επιφάνεια του εδάφους είναι ένδειξη ότι το νερό σε περίπτωση χαμηλής αγωγιμότητας ξεπλένει τα άλατα, ενώ σε περίπτωση υψηλής επιβαρύνει το έδαφος. Οι υψηλές τιμές αγωγιμότητας γύρω από τις ρίζες δείχνουν την απορρόφηση του νερού εκεί που υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις. Το φυτό προσλαμβάνει το απαραίτητο νερό εναποθέτοντας τα άλατα. Το φαινόμενο αυτό συνάδει με μελέτη με αντικείμενο τη δημιουργία των προφίλ αλάτωσης σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες ντομάτας. Παρατηρήθηκε ότι με το πέρασμα του χρόνου η συγκέντρωση των αλάτων αυξάνεται με το βάθος [36]. Η σταθερή τιμή αγωγιμότητας κάτω από το επίπεδο των ριζών αποδεικνύει ότι το έδαφος δεν επηρεάζεται από την άρδευση. Γενικά, στην καλλιέργεια ντομάτας η αγωγιμότητα αυξάνεται κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου [11], όπως επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα.

Η Εικόνα 20 παρουσιάζει το ριζικό σύστημα του φυτού της ντομάτας σε πλέγμα διάστασης κελιού 1 ft x 1 ft. Παρατηρείται ότι το προφίλ που σχηματίζεται στην Εικόνα 19 σχετίζεται με τη διάταξη των ριζών.

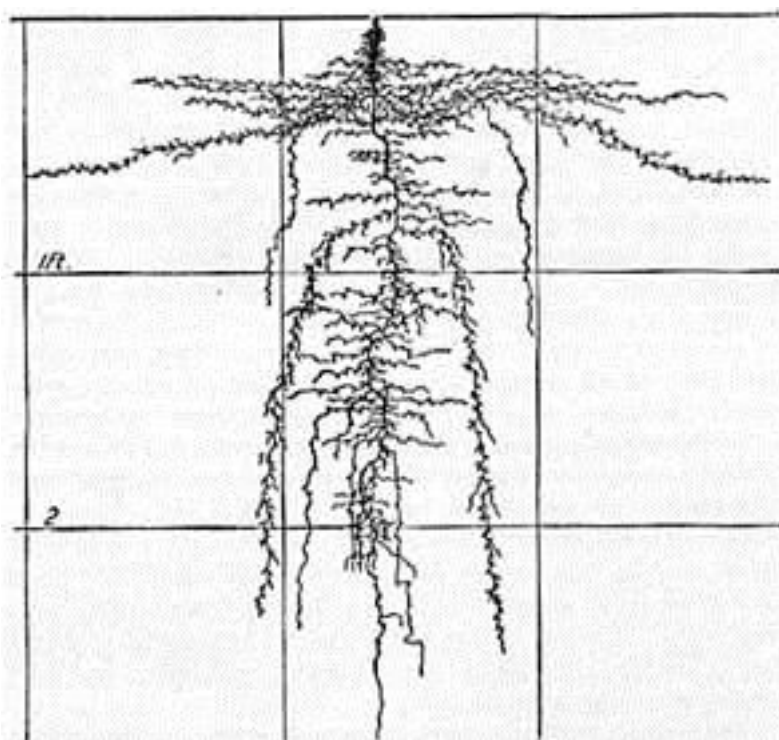


Εικόνα 20: Το ριζικό σύστημα του φυτού της ντομάτας

Ομοίως για την καλλιέργεια της μελιτζάνας παρατηρείται στην Εικόνα 21 για το προφίλ αγωγιμότητας ότι οι τιμές είναι διαφορετικές στην επιφάνεια, στις ρίζες και κάτω από το επίπεδο των ριζών ανάλογα με την αρχική αγωγιμότητα του εδάφους και την αγωγιμότητα του νερού άρδευσης. Αντίστοιχα με την καλλιέργεια της ντομάτας, η Εικόνα 22 παρουσιάζει το ριζικό σύστημα του φυτού της μελιτζάνας σε πλέγμα διάστασης κελιού 1 ft x 1 ft.

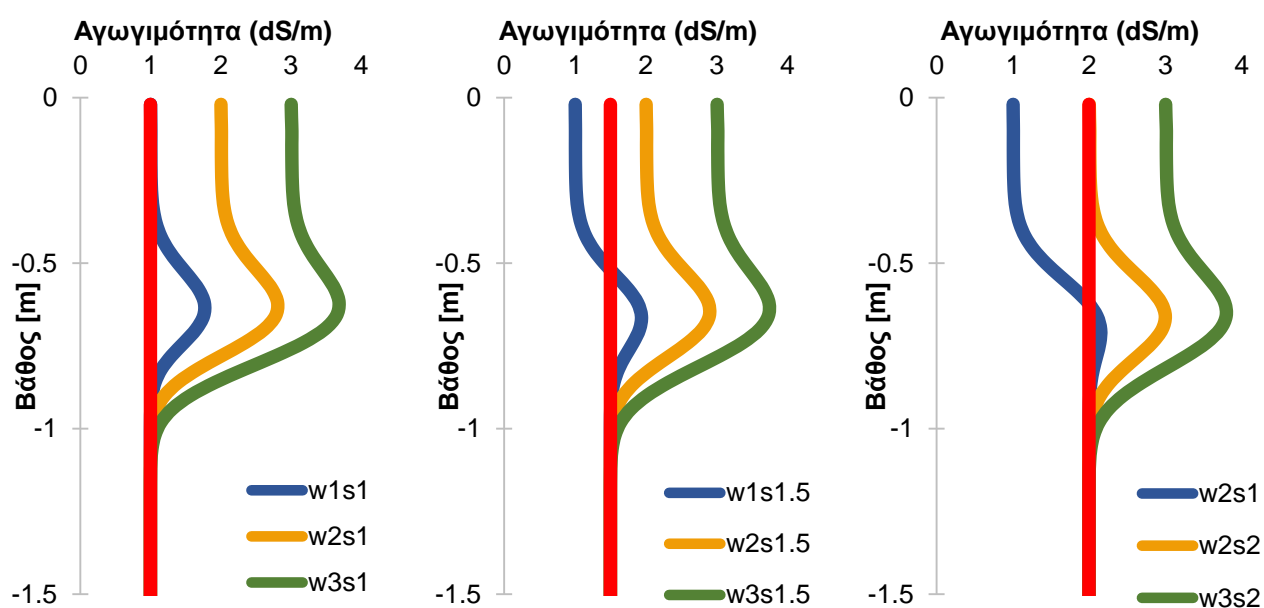


Εικόνα 21: Προφίλ αλάτωσης για τα όλα τα εξεταζόμενα σενάρια αγωγιμότητας για την καλλιέργεια της μελιτζάνας



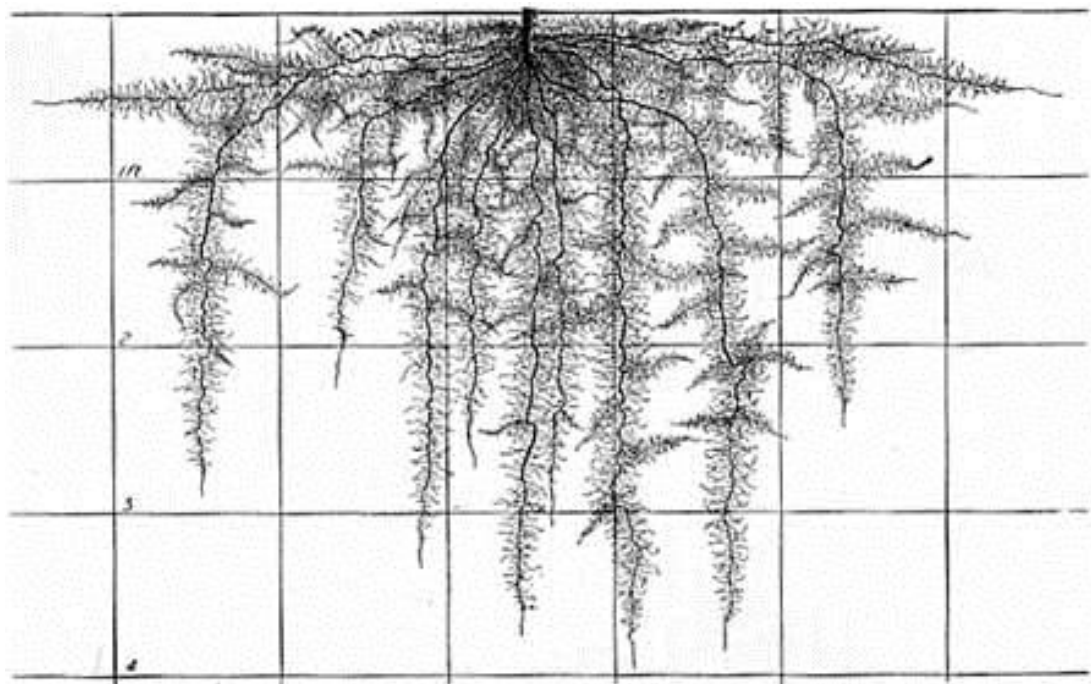
Εικόνα 22: Το ριζικό σύστημα του φυτού της μελιτζάνας

Τέλος, η Εικόνα 23 παρουσιάζει τα προφίλ αλάτωσης για τα προαναφερθέντα σενάρια για την καλλιέργεια της πιπεριάς και παρατηρείται αντίστοιχη συμπεριφορά με τις άλλες δύο καλλιέργειες. Αντίστοιχα, η Εικόνα 24 παρουσιάζει το ριζικό σύστημα του φυτού της μελιτζάνας σε πλέγμα διάστασης κελιού 1 ft × 1 ft.



Εικόνα 23: Προφίλ αλάτωσης για τα όλα τα εξεταζόμενα σενάρια αγωγιμότητας για την καλλιέργεια της πιπεριάς





Εικόνα 24: Το ριζικό σύστημα του φυτού της πιπεριάς.

Η κατανομή της αλάτωσης είναι διαφορετική ανά είδος και αυτό οφείλεται στη διαφορετική διάταξη των ριζών (Εικόνα 20, Εικόνα 22, Εικόνα 24).

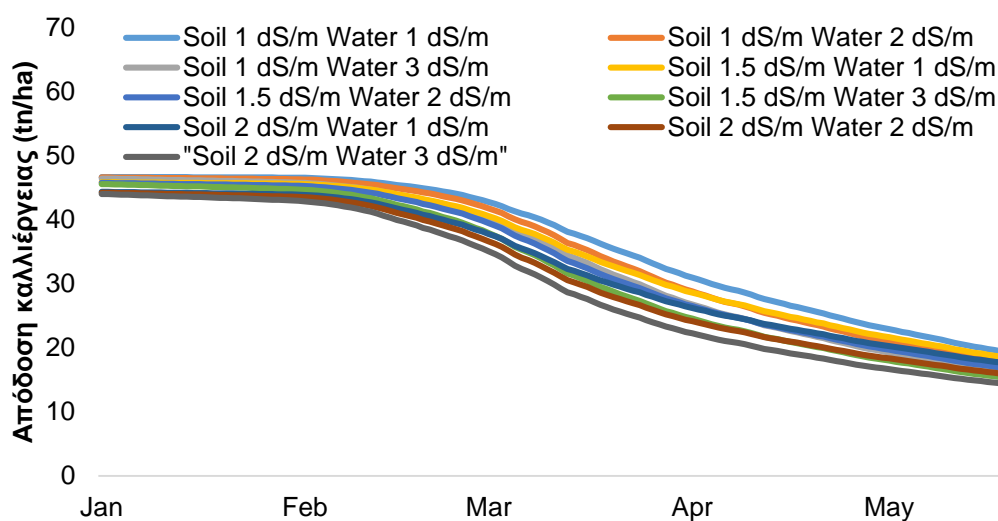
Στη συνέχεια, έγινε ολοκλήρωση των καμπυλών των προφίλ, βάσει του κανόνα τραπεζίων, για όλα τα σενάρια αγωγιμότητας νερού και εδάφους και για τις τρεις καλλιέργειες κατά την τελευταία ημέρα της προσομοίωσης (Πίνακας 8). Στόχος είναι να παρουσιαστεί η έκταση της αλάτωσης στο έδαφος με έναν τρόπο συγκρίσιμο. Παρατηρείται ότι, οι καλλιέργειες της μελιτζάνας και της πιπεριάς παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές εμβαδών. Αντίθετα, η καλλιέργεια της ντομάτας διαφοροποιείται, καθώς παρουσιάζει υψηλότερες τιμές. Οι παραπάνω τιμές υποδεικνύουν ότι η καλλιέργεια της ντομάτας δε συνεισφέρει στην πτώση των τιμών αγωγιμότητας στο έδαφος οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι συμβάλλει σε μεγαλύτερο βαθμό στο φαινόμενο της αλάτωσης.

Πίνακας 8: Τιμές εμβαδών των προφίλ για τις τρεις καλλιέργειες.

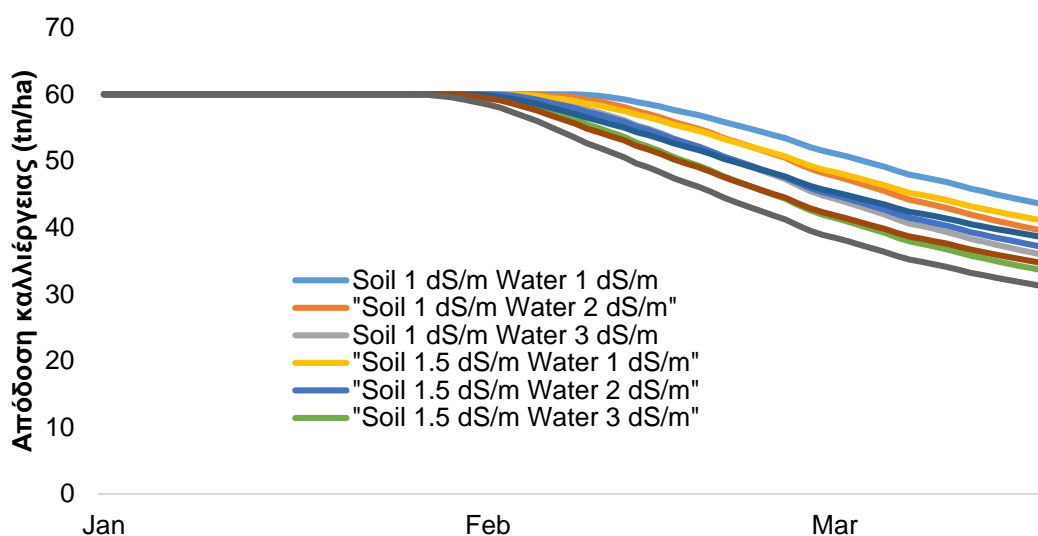
Συνθήκες	Καλλιέργεια ντομάτας			Καλλιέργεια μελιτζάνας			Καλλιέργεια πιπεριάς		
	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3
<b>S1</b>	4.36	4.88	5.48	2.10	2.94	3.79	2.18	3.00	3.82
<b>S1.5</b>	5.36	5.76	6.26	2.71	3.54	4.37	2.82	3.62	4.42
<b>S2</b>	5.99	6.37	6.83	3.31	4.13	4.96	3.46	4.24	5.03

#### 4.1.2 Απόδοση καλλιέργειας

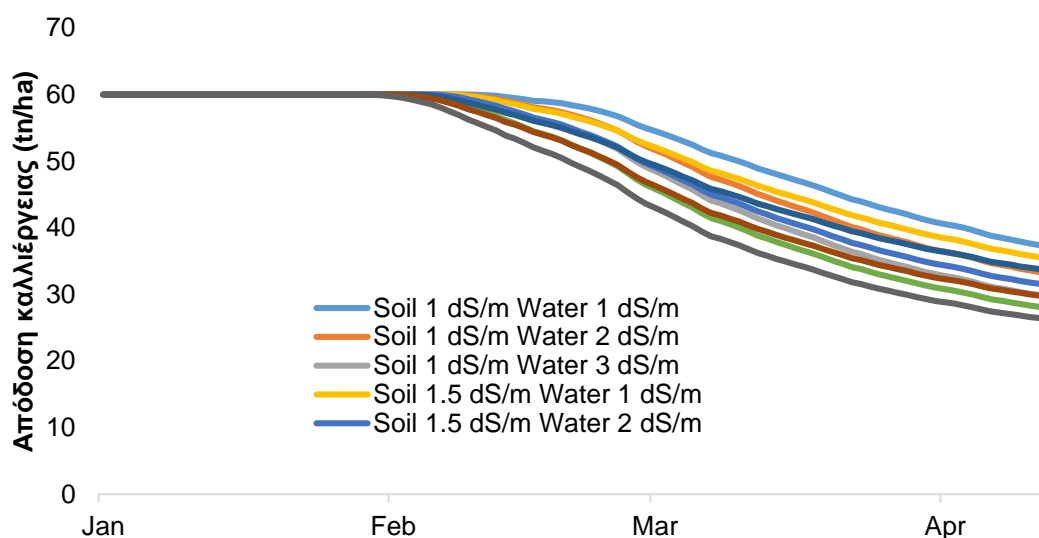
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την απόδοση των καλλιεργειών της ντομάτας, της μελιτζάνας και της πιπεριάς στην Εικόνα 25, Εικόνα 26 και στην Εικόνα 27 αντίστοιχα. Κάθε εικόνα περιγράφει την απόδοση της κάθε καλλιέργειας για όλα τα σενάρια μεταβολής αγωγιμότητας του εδάφους και άρδευσης που διερευνήθηκαν. Κάθε καλλιέργεια χαρακτηρίζεται από μια βέλτιστη τιμή δυνητικής απόδοσης. Στις εικόνες κάθε καμπύλη υποδεικνύει ποια είναι η δυνητική απόδοση ανά πάσα στιγμή κατά την καλλιεργητική περίοδο υπό τις επικρατούσες συνθήκες αγωγιμότητας.



Εικόνα 25: Απόδοση καλλιέργειας ντομάτας για την παρούσα κλιματική κατάσταση (όλα τα σενάρια)



Εικόνα 26: Απόδοση καλλιέργειας μελιτζάνας για την παρούσα κλιματική κατάσταση (όλα τα σενάρια)



Εικόνα 27: Απόδοση καλλιέργειας πιπεριάς για την παρούσα κλιματική κατάσταση (όλα τα σενάρια)

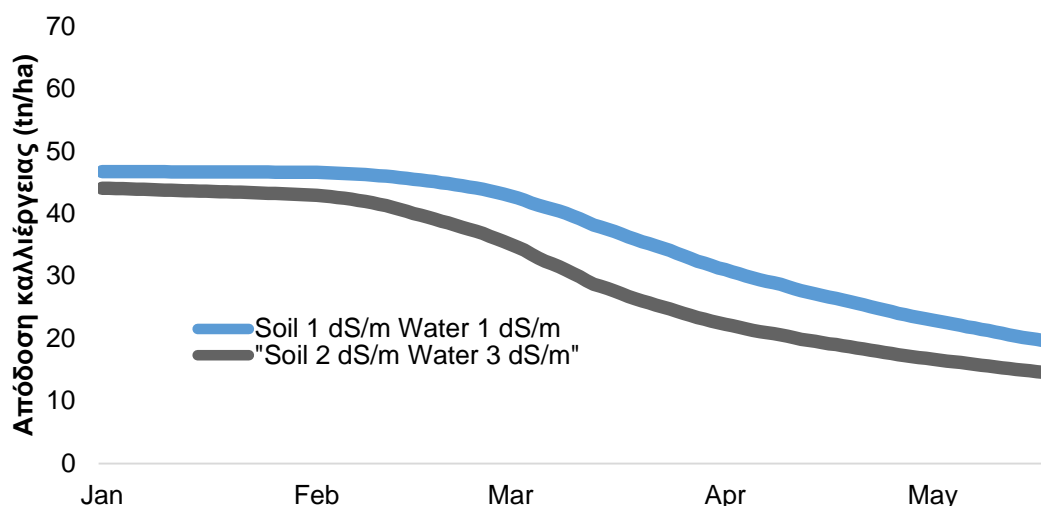
Παρατηρείται κατόπιν σύγκρισης των παραπάνω αποτελεσμάτων με τις εικόνες του προφίλ αγωγιμότητας (Εικόνες 18, 20, 22) ότι οι καμπύλες με τις υψηλότερες τιμές απόδοσης περιγράφουν τα σενάρια που δημιουργούν τη μικρότερη επιβάρυνση στο έδαφος. Όσο αυξάνονται οι τιμές της αγωγιμότητας, προκαλείται μεγαλύτερη επιβάρυνση οδηγώντας σε μείωση των τιμών της απόδοσης καλλιέργειας.

Η τάση μείωσης δείχνει ότι οι ακολουθούμενες πρακτικές άρδευσης είναι ζημιογόνες για την απόδοση της καλλιέργειας. Η παρακολούθηση της μείωσης της απόδοσης θα μπορούσε να λειτουργήσει και ως προειδοποιητικός παράγοντας της επιβαρυνμένης κατάστασης του εδάφους, ενθαρρύνοντας την πρόληψη και τις ενέργειες αποκατάστασης της αλάτωσης. Αρκετές μελέτες έχουν αποδείξει ότι η αλάτωση είναι ένας σημαντικός παράγοντας μείωσης της απόδοσης καλλιέργειας, δηλαδή της ποσότητας παραγωγής και του μεγέθους του καρπού, που εκφράζεται σε μονάδες βάρους ανά επιφάνεια καλλιέργειας. Η μείωση αυτή έχει παρατηρηθεί ότι δεν εξαρτάται από το είδος του φυτού. Παρόλα αυτά η αλάτωση δεν επιδρά στον ίδιο βαθμό σε όλα τα φυτά [11], [37], [15], [38].

Ακολουθούν τα διαγράμματα σύγκρισης της πτώσης της απόδοσης κάθε καλλιέργειας χρησιμοποιώντας το ευνοϊκότερο σενάριο (S1W1) και το σενάριο που προκαλεί τη μεγαλύτερη επιβάρυνση (S2W3) ως προς τις συνθήκες αγωγιμότητας.

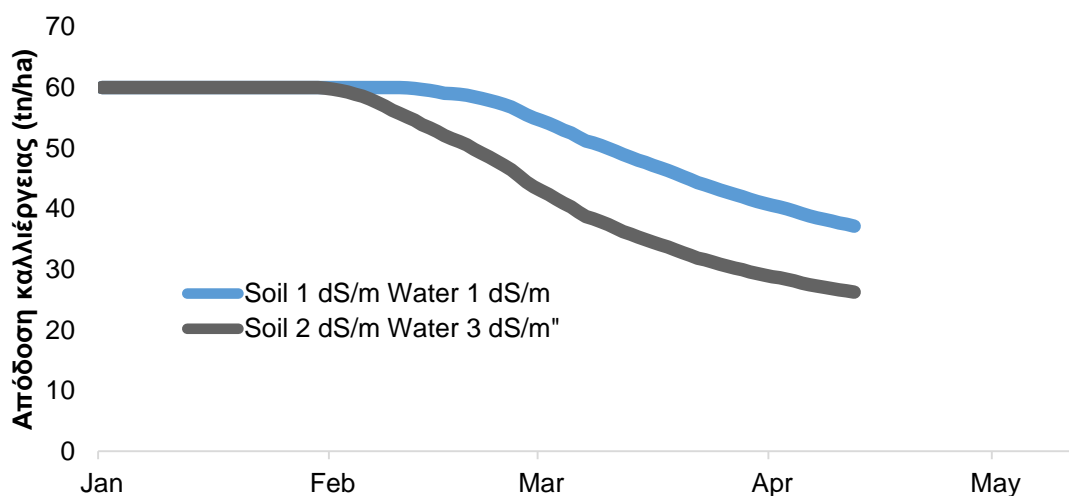
Στην Εικόνα 28 παρουσιάζεται η σύγκριση της απόδοσης των δύο αυτών σεναρίων για την καλλιέργεια της ντομάτας. Παρατηρείται ότι υπάρχει πτώση της απόδοσης κατά 26%, όταν το νερό άρδευσης έχει 3 φορές υψηλότερη τιμή αγωγιμότητας σε σχέση με το ευνοϊκότερο σενάριο. Η τιμή της πτώσης προκύπτει από τη σχέση των τιμών απόδοσης την τελευταία

ημέρα της μοντελοποίησης. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η μέγιστη απόδοση της καλλιέργειας της ντομάτας είναι περίπου 45 tn/ha [14]. Αν γίνει σύγκριση της τιμής αυτής και του σεναρίου με τις υψηλότερες τιμές αγωγιμότητας, τότε προκύπτει μείωση της απόδοσης καλλιέργειας κατά 67.8 %.

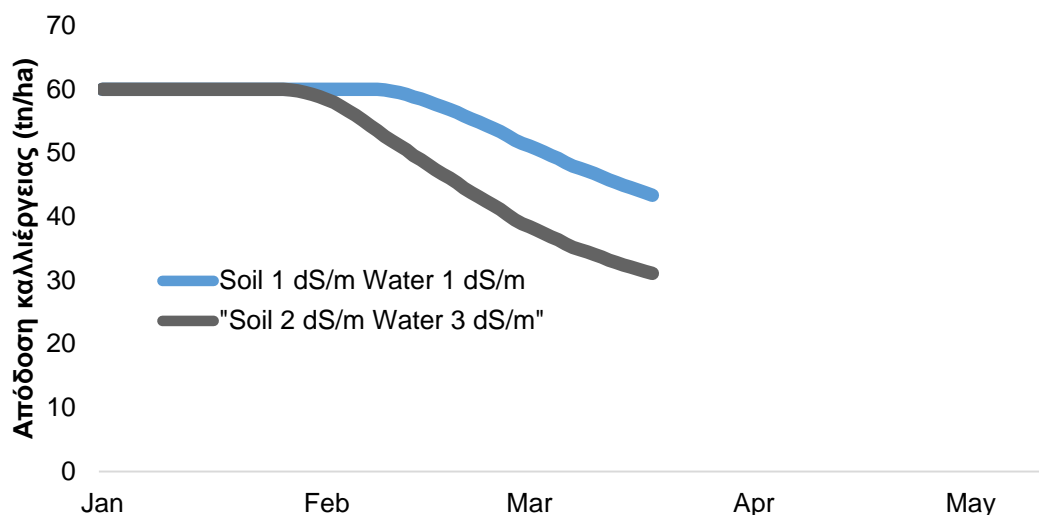


Εικόνα 28: Πτώση απόδοσης καλλιέργειας της ντομάτας συγκρίνοντας τα δύο ακραία σενάρια

Στο ίδιο ακριβώς μοτίβο πραγματοποιήθηκε και ο υπολογισμός της πτώσης για τις καλλιέργειες μελιτζάνας και πιπεριάς (Εικόνα 29, Εικόνα 30). Συνεπώς, η πτώση απόδοσης για την καλλιέργεια της μελιτζάνας είναι 28.3 %, ενώ της καλλιέργειας της πιπεριάς είναι 29.3 %. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η μέγιστη απόδοση και των δύο καλλιεργειών είναι 60 tn/ha [14]. Αν γίνει σύγκριση της μέγιστης τιμής με το αποτέλεσμα της χρήσης του πιο επιβαρυσμένου σεναρίου, τότε προκύπτει ότι η καλλιέργεια της μελιτζάνας και της πιπεριάς έχει πτώση απόδοσης 48.2 % και 56.2 % αντίστοιχα.



Εικόνα 29: Πτώση απόδοσης καλλιέργειας της μελιτζάνας συγκρίνοντας τα δύο ακραία σενάρια



Εικόνα 30: Πτώση απόδοσης καλλιέργειας της πιπεριάς συγκρίνοντας τα δύο ακραία σενάρια

## 4.2 Αποτελέσματα σεναρίων μεταβαλλόμενων συνθηκών κλίματος

Ακολουθούν τα αποτελέσματα του δεύτερου σκέλους των σεναρίων, δηλαδή εξέταση των επιπτώσεων υπό μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες. Τα δεδομένα κλίματος είναι αποτέλεσμα τεσσάρων RCMs: IPSL, MIROC, NOC, NOAA. Επίσης, αποτελούν αρκετά απαισιόδοξα σενάρια, καθώς λαμβάνουν υπόψη την περίπτωση RCP 8.5, δηλαδή αύξηση της μέσης δρώσας ακτινοβολίας κατά  $8.5 \text{ W/m}^2$ . Η αύξηση της ακτινοβολίας έχει αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας εντός και εκτός θερμοκηπίου. Αρχικά, η προσομοίωση έγινε για το έτος 2014 για όλα τα μοντέλα και στη συνέχεια για έτη εντός του διαστήματος 2041-2100. Σκοπός, λοιπόν των σεναρίων αυτών είναι να εξεταστεί κατά πόσο η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει την αλάτωση του εδάφους. Τα προφίλ αλάτωσης που προέκυψαν από τα σενάρια υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες αγωγιμότητας εδάφους και νερού παρουσίαζαν την κατανομή της αγωγιμότητας σε σχέση με το βάθος. Κάθε σημείο της καμπύλης αποτελεί μια συγκεκριμένη τιμή αγωγιμότητας. Τα αποτελέσματα των σεναρίων υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες κλίματος έχουν διαφορετική φιλοσοφία. Κάθε σημείο αποτελεί μια κατανομή τιμών αγωγιμότητας στο συγκεκριμένο βάθος. Η κατανομή έχει σκοπό να δείξει την αβεβαιότητα που επικρατεί λόγω χρήσης των τεσσάρων κλιματικών μοντέλων.

### 4.2.1 Προφίλ της αλάτωσης

Η Εικόνα 31 αναπαριστά τα προφίλ της αλάτωσης υπό την παρούσα κλιματική κατάσταση (πράσινη καμπύλη) και υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής (κόκκινη καμπύλη) για την καλλιέργεια της ντομάτας. Το πρώτο διάγραμμα δείχνει την κατανομή της αλάτωσης, όταν χρησιμοποιείται νερό άρδευσης με σταθερή αγωγιμότητα καθ' όλη την καλλιεργητική

περίοδο (2 dS/m). Αντίστοιχα, η Εικόνα 32 αφορά την καλλιέργεια της μελιτζάνας και η Εικόνα 33 την καλλιέργεια της πιπεριάς.



Εικόνα 31: Προφίλ αλάτωσης με αρδευτικά ύδατα αγωγιμότητας 2dS/m για την καλλιέργεια της ντομάτας για την παρούσα (πράσινη γραμμή) και τη μελλοντική (κόκκινη γραμμή) κλιματική κατάσταση



Εικόνα 32: Προφίλ αλάτωσης με αρδευτικά ύδατα αγωγιμότητας 2dS/m για την καλλιέργεια της μελιτζάνας για την παρούσα (πράσινη γραμμή) και τη μελλοντική (κόκκινη γραμμή) κλιματική κατάσταση

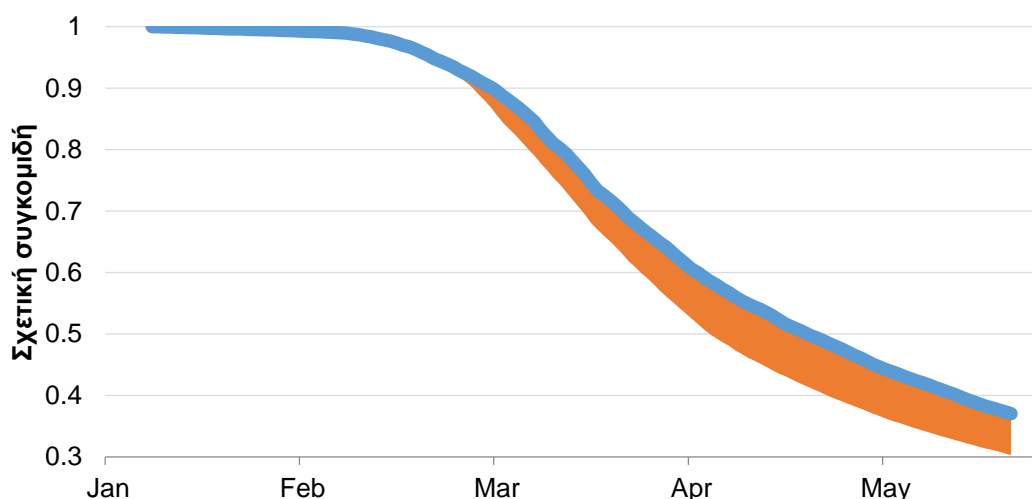


Εικόνα 33: Προφίλ αλάτωσης με αρδευτικά ύδατα αγωγιμότητας 2dS/m για την καλλιέργεια της πιπεριάς για την παρούσα (πράσινη γραμμή) και τη μελλοντική (κόκκινη γραμμή) κλιματική κατάσταση

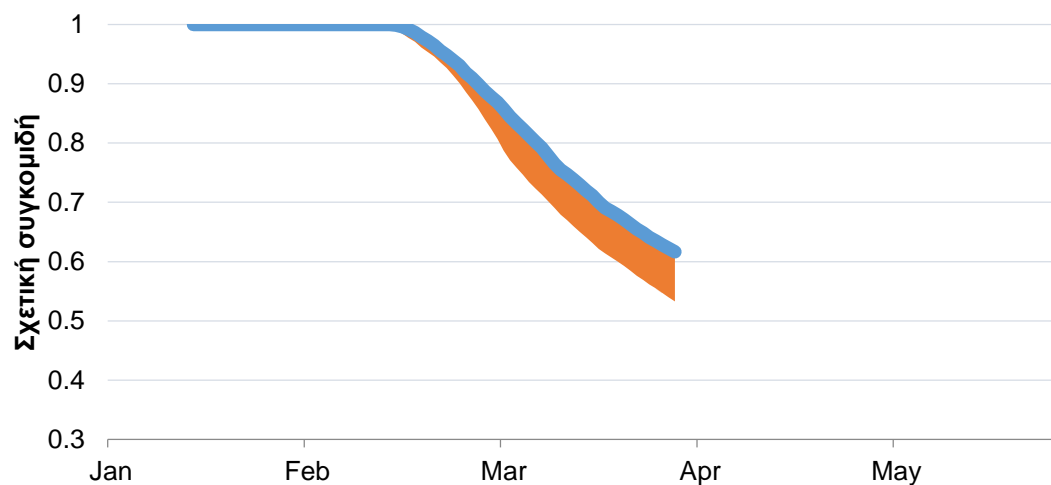
Η προσαρμογή των μετεωρολογικών δεδομένων αύξησαν ελαφρώς τις τιμές αγωγιμότητας στο έδαφος κατά την παρούσα κλιματική κατάσταση. Όμως, τα προφίλ που αντιστοιχούν στα δεδομένα της κλιματικής αλλαγής έχουν αρκετά υψηλότερες τιμές αγωγιμότητας γύρω από τις ρίζες. Οι παρατηρήσεις αυτές είναι αρκετά εμφανείς ιδίως στα προφίλ της καλλιέργειας της ντομάτας, όπου η αγωγιμότητα στο βάθος των ριζών πλησιάζει τα 7 dS/m. Αυτό που απορρέει ως συμπέρασμα είναι ότι η αύξηση της θερμοκρασίας συμβάλλει στην αύξηση της αγωγιμότητας. Η θερμοκρασία συνδέεται με την εξατμισοδιαπνοή, επομένως αύξηση της πρώτης παραμέτρου συνεπάγεται αύξηση της δεύτερης [37], [15], [38].

#### 4.2.2 Απόδοση καλλιέργειας

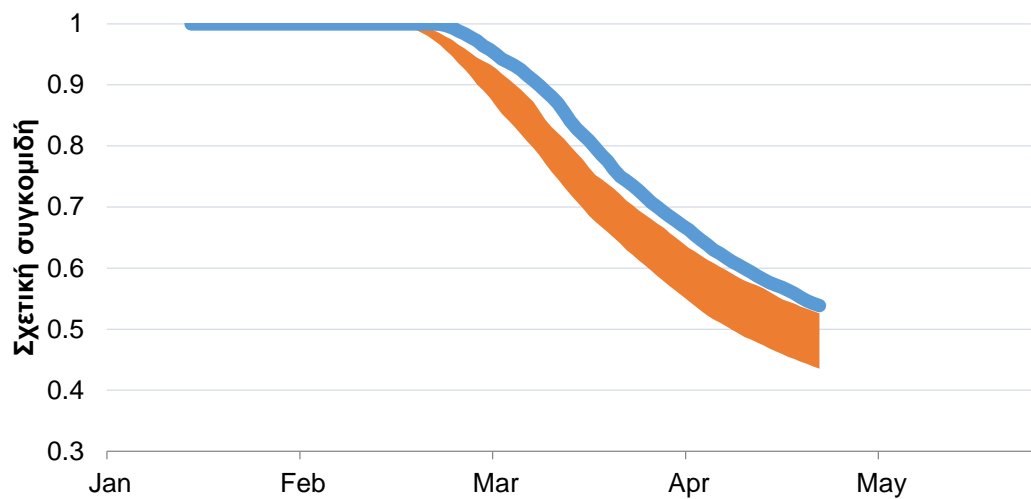
Η μεταβολή των κλιματικών συνθηκών δεν αφήνει ανεπηρέαστη την απόδοση των καλλιεργειών. Στο ίδιο πνεύμα με τη σύγκριση μεταξύ των σεναρίων αγωγιμότητας, πραγματοποιήθηκε και σύγκριση της απόδοσης μεταξύ της παρούσας και της προβλεπόμενης κατάστασης, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή της απόδοσης ανάλογα τα κλιματικά μοντέλα. Η Εικόνα 34, η Εικόνα 35 και η Εικόνα 36 αναπαριστούν την απόδοση της καλλιέργειας της ντομάτας, μελιτζάνας και πιπεριάς για αγωγιμότητα νερού 2 dS/m για την παρούσα κατάσταση καθώς και για την προβλεπόμενη κατάσταση. Για την καλλιέργεια της ντομάτας παρατηρείται πτώση από 60 %-70 % σε σύγκριση με μέγιστη δυνατή παραγωγή. Αντίστοιχα, για την καλλιέργεια της μελιτζάνας παρατηρείται πτώση από 28 % - 45 % σε σύγκριση με μέγιστη δυνατή παραγωγή. Τέλος, για την καλλιέργεια της πιπεριάς παρατηρείται πτώση από 45 % - 55 % σε σύγκριση με μέγιστη δυνατή παραγωγή. Ανάμεσα στα τρία διαγράμματα παρατηρείται ότι η ντομάτα επηρεάζεται περισσότερο από την κλιματική αλλαγή.



Εικόνα 34: Σύγκριση απόδοσης καλλιέργειας ντομάτας παρόν (μπλε καμπύλη) – μέλλον (πορτοκαλί καμπύλη) (αγωγιμότητα νερού 2dS/m)



Εικόνα 35: Σύγκριση απόδοσης καλλιέργειας μελιτζάνα παρόν (μπλε καμπύλη) – μέλλον (πορτοκαλί καμπύλη)  
(αγωγιμότητα νερού 2dS/m)



Εικόνα 36: Σύγκριση απόδοσης καλλιέργειας πιπεριά παρόν (μπλε καμπύλη) – μέλλον (πορτοκαλί καμπύλη)  
(αγωγιμότητα νερού 2dS/m)



## 5 Συμπεράσματα και προτάσεις

### 5.1 Συμπεράσματα

Η αλάτωση είναι ένας παράγοντας υποβάθμισης του εδάφους και είναι απαραίτητο να υπάρχει σαφής εικόνα της, ώστε να μπορεί να σχεδιαστεί η κατάλληλη πολιτική διαχείρισης. Η ποιότητα του νερού άρδευσης, η αντοχή της καλλιέργειας, ο τύπος του εδάφους και το κλίμα είναι μερικοί από τους συμβαλλόμενους παράγοντες στην αλάτωση. Επομένως, σε μια καλλιέργεια είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η πολυπλοκότητα του συστήματός της, ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα αλάτωσης. Βάσει των αποτελεσμάτων της μελέτης προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Το μοντέλο SALTMED προσομοιώνει με αρκετή λεπτομέρεια το έδαφος και συμβάλλει σημαντικά στην κατανόηση της αλάτωσης.
- Προορίζεται για καλλιέργειες ανοιχτού πεδίου, αλλά στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε για καλλιέργεια θερμοκηπίου. Η χρήση αυτή προϋποθέτει κατάλληλη επεξεργασία κλιματικών δεδομένων πριν την εισαγωγή στο μοντέλο.
- Η αλάτωση είναι αποτέλεσμα της άρδευσης και είναι φαινόμενο ανάλογο της ποιότητας αρδευτικού ύδατος. Όσο πιο υψηλή η αγωγιμότητα του αρδευτικού ύδατος, τόσο μεγαλύτερη η επιβάρυνση στο έδαφος.
- Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν πως το πρόβλημα της αλάτωσης δεν εντοπίζεται επιφανειακά, αλλά στο επίπεδο των ριζών.
- Η καλλιέργεια της ντομάτας εμφανίζει υψηλότερες τιμές αγωγιμότητας στη ριζόσφαιρα σε σχέση με τις καλλιέργειες της μελιτζάνας και της πιπεριάς. Αυτό σημαίνει ότι το φυτό της ντομάτας συμβάλλει στη δημιουργία της αλάτωσης στο έδαφος.
- Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι η απόδοση της καλλιέργειας εξαρτάται από την ποιότητα του αρδευτικού ύδατος. Οι υψηλές τιμές αγωγιμότητας σε νερό και έδαφος μειώνουν τη δυνητική απόδοση μιας καλλιέργειας.
- Η απόδοση της καλλιέργειας της ντομάτας μειώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με τις υπόλοιπες καλλιέργειες, όταν υπάρχει σημαντική επιβάρυνση στο έδαφος.
- Οι κλιματικές συνθήκες αυξάνουν σημαντικά τις τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο έδαφος. Όμως, σε κάθε καλλιέργεια η μέγιστη τιμή της αγωγιμότητας στο έδαφος είναι διαφορετική.

- Η μεταβολή των κλιματικών συνθηκών, δηλαδή η αύξηση της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας, επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την αλάτωση στην καλλιέργεια της ντομάτας.
- Η απόδοση των καλλιεργειών επηρεάζεται για όλες τις εξεταζόμενες καλλιέργειες από τη μεταβολή των καιρικών συνθηκών.
- Η Ευρωπαϊκή Ένωση αναγνωρίζοντας ότι το έδαφος απειλείται με εκθετικό ρυθμό και την επιτακτική ανάγκη προστασίας και αποκατάστασής του, έχει αναπτύξει κείμενα νομοθετικού περιεχομένου δεσμευτικού και μη χαρακτήρα.
- Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι γνωρίζοντας τους μηχανισμούς επίδρασης της αλάτωσης στα φυτά και στο έδαφος και λαμβάνοντας υπόψη το ενωσιακό νομοθετικό πλαίσιο είναι δυνατόν να σχεδιαστεί πολιτική διαχείρισης του εδάφους και των υδάτων άρδευσης με τελικό αποδέκτη τους αγρότες, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η μακρόχρονη παραγωγή τους.

## 5.2 Προτάσεις

- Για την παρούσα εργασία έγινε προσομοίωση με δεδομένα από αξιόπιστα κλιματικά μοντέλα, δημιουργήθηκαν αρχεία άρδευσης και λίπανσης με αρκετά ρεαλιστικό τρόπο και χρησιμοποιήθηκαν τιμές αγωγιμότητας εδάφους και αρδευτικού νερού πολύ κοντινές στις πραγματικές. Παρόλα αυτά προτείνεται η τεκμηρίωση του μοντέλου με δεδομένα (κλιματικά, άρδευσης, λίπανσης κλπ.) από το πεδίο, έτσι ώστε να διασταυρωθούν τα αποτελέσματα.
- Γενικά, μια πρακτική που χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση της αλάτωσης είναι η έκπλυση. Αυτή η μέθοδος, όμως είναι αρκετά απαιτητική σε ποσότητα ύδατος. Η αποθήκευση όμβριου ύδατος για τη χρήση του ως νερό έκπλυσης αποτελεί μια βιώσιμη οικονομικά και περιβαλλοντικά λύση.

## Βιβλιογραφία

- [1] European Commission, “COM(2002) 179 final communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions,” 2002.
- [2] T. O. Reach, *Threats to soil quality in Denmark*, no. 143. 2009.
- [3] A. Jones, P. Panagos, S. Barcelo, and F. Bouraoui, *The state of soil in Europe*. 2012.
- [4] M. H. Ali, “Practices of Irrigation & On-farm Water Management: Volume 2,” vol. 2, New York, NY: Springer New York, 2011, pp. 271–325.
- [5] T. J. Flowers and S. A. Flowers, “Why does salinity pose such a difficult problem for plant breeders?,” *Agric. Water Manag.*, vol. 78, no. 1–2, pp. 15–24, Sep. 2005.
- [6] P. Daskalaki and K. Voudouris, “Groundwater quality of porous aquifers in Greece: A synoptic review,” *Environ. Geol.*, vol. 54, no. 3, pp. 505–513, 2008.
- [7] R. Ragab, “A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: the SALTMED model,” *Environ. Model. Softw.*, vol. 17, no. 4, pp. 345–361, Jan. 2002.
- [8] R. Ragab, A. Hamdy, and R. Guelloubi, “THE INTEGRATED WATER MANAGEMENT APPROACH FOR WATER SAVING AT DIFFERENT SCALES : MODELLING TECHNIQUES AND PRACTICAL SOLUTIONS,” vol. 157, pp. 149–157, 2005.
- [9] M. Qadir, A. Ghafoor, and G. Murtaza, “AMELIORATION STRATEGIES FOR SALINE SOILS: A REVIEW,” *L. Degrad. Dev.*, vol. 11, pp. 501–521, 2000.
- [10] A. K. Parida and A. B. Das, “Salt tolerance and salinity effects on plants: a review,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 60, no. 3, pp. 324–49, Mar. 2005.
- [11] J. Cuartero and R. Fernandez-Munoz, “Tomato and salinity,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 78, pp. 83–125, 1999.
- [12] P. Steduto, T. C. Hsiao, E. Fereres, and D. Raes, *Crop yield response to water*. 2012.

- [13] R. Romero-Aranda, T. Soria, and J. Cuartero, “Tomato plant-water uptake and plant-water relationships under saline growth conditions.,” *Plant Sci.*, vol. 160, no. 2, pp. 265–272, Jan. 2001.
- [14] Α. Γ. Κανάκης, *Γενική λαχανοκομεία*. Αθήνα: Εκδόσεις ΑγροΤύπος, 2003.
- [15] E. Yurtseven, G. D. Kesmez, and a. Ünlükara, “The effects of water salinity and potassium levels on yield, fruit quality and water consumption of a native central anatolian tomato species (*Lycopersicon esculantum*),” *Agric. Water Manag.*, vol. 78, no. 1–2, pp. 128–135, Sep. 2005.
- [16] G. Ondrasek, Z. Rengel, and S. Veres, “Soil Salinisation and Salt Stress in Crop Production,” 2010.
- [17] J. Rutherford and B. Kefford, “Effects of salinity on stream ecosystems: improving models for macroinvertebrates,” *Csiro*, no. October, pp. 1–64, 2005.
- [18] G. a. Meehl, C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer, and K. E. Taylor, “The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climatic change research,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 88, no. 9, pp. 1383–1394, 2007.
- [19] R. Mizuta, K. Oouchi, H. Yoshimura, A. Noda, K. Katayama, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusunoki, H. Kawai, and M. Nakagawa, “20-km-Mesh Global Climate Simulations Using JMA-GSM Model —Mean Climate States—,” *J. Meteorol. Soc. Japan*, vol. 84, no. 1, pp. 165–185, 2006.
- [20] Y. Q. Wang, L. R. Leung, J. L. McGregor, D.-K. K. Lee, W.-C. C. Wang, Y. H. Ding, and F. Kimura, “Regional Climate Modeling: Progress, Challenges, and Prospects,” *J. Meteorol. Soc. Japan*, vol. 82, no. 6, pp. 1599–1628, 2004.
- [21] IPCC Expert Meeting Report, *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts and Response Strategies*. 2008.
- [22] A. Fotiadi, N. Hatzianastassiou, P. W. Stackhouse, C. Matsoukas, E. Drakakis, K. G. Pavlakis, D. Hatzidimitriou, and I. Vardavas, “Spatial and temporal distribution of long-term short-wave surface radiation over Greece,” *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 132, no. 621, pp. 2693–2718, 2006.

- [23] Q. Ma, K. Wang, and M. Wild, “Evaluations of atmospheric downward longwave radiation from 44 coupled general circulation models of CMIP5,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, pp. 1–12, 2014.
- [24] The European Parliament and the Council of the European Union, “DIRECTIVE 2000/60/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 October 2000 establishing a framework of Community action in the field of water policy,” *Official Journal of the European Communities*. .
- [25] P. Quevauviller and C. Olazabal, “Links between the Water Framework Directive , the Thematic Strategy on Soil Protection and Research Trends with Focus on Pollution Issues,” *Soils Sentim.*, vol. 3, no. 4, pp. 243–244, 2003.
- [26] Commission of the European Communities, “COM (2006)231 final COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE COUNCIL, THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS - Thematic Strategy for Soil Protection.” 2006.
- [27] European Commission, “COM(2012) 46 final REPORT FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS - The implementation of the Soil Thematic Strategy and ongoing activities,” 2012.
- [28] B. Αντωνόπουλος, Π. Γεωργίου, and Σ. Βουγιούκας, Eds., “ΠΡΑΚΤΙΚΑ 6ου ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ,” in *Η Γεωργική Μηχανική και η Μηχανική Βιοσυστημάτων στην εποχή των βιοκαυσίμων και κλιματικών αλλαγών*, 2009.
- [29] R. Ragab, N. Malash, G. A. Gawad, a. Arslan, and a. Ghaibeh, “A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management,” *Agric. Water Manag.*, vol. 78, no. 1–2, pp. 89–107, Sep. 2005.
- [30] I. Ioslovich, P. Gutman, and I. Seginer, “A non-linear optimal greenhouse control problem with heating and ventilation,” *Optim. Control Appl. Methods*, vol. 17, no. April 1993, pp. 157–169, 1996.

- [31] P. Suseela and M. V Rangaswami, "Variation of relative humidity inside the greenhouse with height , ventilation and ambient climatic parameters," *Karnataka J.Agric.Sci.*, vol. 25, no. 1, pp. 100–103, 2012.
- [32] Γ. Α. Τερζίδη and Ζ. Γ. Παπαζαφειρίου, *Γεωργική Υδραυλική*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη, 1997.
- [33] J. Doorenbos and W. O. Pruitt, "Guidelines for predicting crop water requirements," p. 154, 1977.
- [34] S. Pipatpan and N. Blindow, "Geophysical Saltwater-Intrusion Mapping in Timbaki / Crete, Selection and Application of Geophysical Methods for Aquifer Characterization and Detection of Saline Intrusions," Munster, 2005.
- [35] D. J. Stobbelaar, J. Kuiper, J. D. van Mansvelt, and E. Kabourakis, "Landscape quality on organic farms in the Messara valley, Crete Organic farms as components in the landscape," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 77, pp. 79–93, 2000.
- [36] H. Maomao, S. Xiaohou, and Z. Yaming, "Effects of Different Regulatory Methods on Improvement of Greenhouse Saline Soils, Tomato Quality, and Yield," *Sci. World J.*, vol. 2014, pp. 1–11, 2014.
- [37] A. Unlukara, A. Kurunc, guluzar duygu Kesmez, E. Yurtseven, and D. L. Suarez, "EFFECTS OF SALINITY ON EGGPLANT ( SOLANUM MELONGENA L .)," vol. 214, no. October 2008, pp. 203–214, 2010.
- [38] A. Reina-Sánchez, R. Romero-Aranda, and J. Cuartero, "Plant water uptake and water use efficiency of greenhouse tomato cultivars irrigated with saline water," *Agric. Water Manag.*, vol. 78, no. 1–2, pp. 54–66, Sep. 2005.