



Τεχνολογικό
Πανεπιστήμιο
Κύπρου

Σχολή Γεωτεχνικών Επιστημών
και Διαχείρισης Περιβάλλοντος

Πτυχιακή εργασία

**Μελέτη της επίδρασης νανοϋλικού Zeolite/Zn–Ti στη
φυσιολογική απόκριση και ανάπτυξη μαρουλιού (*Lactuca
sativa*)**

Γεώργιος Γεωργίου

Λεμεσός, Μάιος 2026

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ, ΒΙΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ
ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Πτυχιακή εργασία
ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΝΑΝΟΪΛΙΚΟΥ ZEOLITE/Zn–Ti
ΣΤΗ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ
ΜΑΡΟΥΛΙΟΥ (*LACTUCA SATIVA*)

Γεώργιος Γεωργίου

Δρ. Βασίλης Φωτόπουλος

Λεμεσός, Μάϊος 2026

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Γεώργιος Γεωργίου , 2026

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Γεωπονικών Επιστημών,
Βιοτεχνολογίας και Επιστήμης Τροφίμων του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου
δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του/της συγγραφέα εκ μέρους
του Τμήματος.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον/στην επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Βασίλης Φωτόπουλος, για την καθοδήγηση, τη βοήθεια και τις χρήσιμες παρατηρήσεις του/της κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στην υποψήφια διδάκτορα Ιωάννα Ευσταθίου, για την πολύτιμη βοήθεια, τον χρόνο, την καθοδήγηση και τη στήριξή της κατά την πραγματοποίηση του πειραματικού μέρους της εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Αλέξανδρος Σπανός και τα υπόλοιπα μέλη της ερευνητικής ομάδας για τη βοήθεια και τη συνεργασία τους σε διάφορα στάδια της πειραματικής διαδικασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνω στην οικογένειά μου, για τη συνεχή στήριξη, την υπομονή και την ενθάρρυνση που μου πρόσφερε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου και όλα τα κοντινά μου πρόσωπα που στάθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν μέχρι την ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία μελέτησε την επίδραση του νανοϋλικού Zeolite/Zn–Ti στη φυσιολογική απόκριση και ανάπτυξη φυτών μαρουλιού (*Lactuca sativa* L.). Το ενδιαφέρον για τέτοιου τύπου νανοϋλικά συνδέεται με την ανάγκη ανάπτυξης νέων προσεγγίσεων που μπορούν να στηρίξουν τη φυτική παραγωγή και να βελτιώσουν την αποδοτικότητα των γεωργικών εφαρμογών. Για τον σκοπό αυτό, εφαρμόστηκαν διαφυλλικά διαφορετικές συγκεντρώσεις του νανοϋλικού, και συγκεκριμένα 25, 50, 100 και 200 ppm, ενώ χρησιμοποιήθηκε και μάρτυρας ελέγχου χωρίς νανοϋλικό. Η αξιολόγηση βασίστηκε σε αναπτυξιακές, φυσιολογικές και βιοχημικές παραμέτρους, όπως η προβαλλόμενη φυλλική επιφάνεια, το νωπό και ξηρό βάρος, η στοματική αγωγιμότητα, οι φωτοσυνθετικές χρωστικές και οι δείκτες οξειδωτικής καταπόνησης MDA και H₂O₂. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απόκριση των φυτών διαφοροποιήθηκε ανάλογα με τη συγκέντρωση εφαρμογής. Η συγκέντρωση των 50 ppm παρουσίασε ευνοϊκή εικόνα ως προς τη φυλλική επιφάνεια και το νωπό βάρος, ενώ τα 100 ppm συνδέθηκαν με υψηλότερο ξηρό βάρος και αυξημένες φωτοσυνθετικές χρωστικές. Παράλληλα, οι ενδιάμεσες συγκεντρώσεις συνδέθηκαν με χαμηλότερη οξειδωτική επιβάρυνση, ενώ η υψηλότερη συγκέντρωση των 200 ppm δεν παρουσίασε σταθερά ευνοϊκή απόκριση. Συνολικά, τα ευρήματα δείχνουν ότι το Zeolite/Zn–Ti μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη και τη φυσιολογική κατάσταση του μαρουλιού με δοσοεξαρτώμενο τρόπο, αναδεικνύοντας την ανάγκη προσεκτικής επιλογής της δόσης εφαρμογής.

Λέξεις κλειδιά: μαρούλι, νανοϋλικό, Zeolite/Zn–Ti, διαφυλλική εφαρμογή, οξειδωτική καταπόνηση.

ABSTRACT

This thesis investigated the effect of the Zeolite/Zn–Ti nanomaterial on the physiological response and growth of lettuce plants (*Lactuca sativa* L.). Interest in this type of nanomaterial is associated with the need to develop new approaches that can support plant production and improve the efficiency of agricultural applications. For this purpose, different concentrations of the nanomaterial, specifically 25, 50, 100 and 200 ppm, were applied through foliar spraying, while untreated plants were used as the control. The evaluation was based on growth, physiological and biochemical parameters, including projected leaf area, fresh and dry weight, stomatal conductance, photosynthetic pigments and the oxidative stress indicators MDA and H₂O₂. The results showed that plant responses differed depending on the applied concentration. The 50 ppm treatment showed a favourable response in terms of projected leaf area and fresh weight, while the 100 ppm treatment was associated with higher dry weight and increased photosynthetic pigments. At the same time, the intermediate concentrations were associated with lower oxidative burden, whereas the highest concentration, 200 ppm, did not show a consistently favourable response. Overall, the findings indicate that Zeolite/Zn–Ti can affect the growth and physiological status of lettuce in a dose-dependent manner, highlighting the importance of careful selection of the application dose.

Keywords: lettuce, nanomaterial, Zeolite/Zn–Ti, foliar application, oxidative stress.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
ABSTRACT.....	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	ix
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	xi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Κλιματική αλλαγή, γεωργική παραγωγή και αβιοτικές καταπονήσεις	1
1.1.1 Κλιματική αλλαγή και γεωργική παραγωγή.....	1
1.1.2 Αβιοτικές καταπονήσεις στα φυτά	4
1.2 Το μαρούλι (<i>Lactuca sativa</i> L.) ως καλλιέργεια και φυτικό μοντέλο.....	7
1.2.1 Βοτανική ταυτότητα και μορφολογικά χαρακτηριστικά του μαρουλιού .	7
1.2.1.1 Βοτανική ταξινόμηση του μαρουλιού	7
1.2.1.2 Μορφολογικά χαρακτηριστικά του μαρουλιού	8
1.2.2 Καλλιεργητική και οικονομική σημασία.....	10
1.2.2.1 Καλλιεργητική σημασία	10
1.2.2.2 Οικονομική σημασία.....	10
1.2.2.3 Διατροφική αξία.....	11
1.2.3 Το μαρούλι ως σύστημα μελέτης.....	11
1.2.4 Σημασία των αβιοτικών καταπονήσεων για το μαρούλι	12
1.3 Υφιστάμενες γεωργικές πρακτικές, περιορισμοί και ανάγκη νέων προσεγγίσεων.....	15
1.4 Εναυση (priming) ως στρατηγική ενίσχυσης της φυτικής απόκρισης.....	17
1.5 Νανοτεχνολογία στη γεωργία και στη φυτική παραγωγή	19
1.5.1 Ορισμός και βασικές αρχές της νανοτεχνολογίας	19
1.5.2 Κατηγορίες, παρασκευή και χαρακτηρισμός των νανοϋλικών	20
1.5.2.1 Ταξινόμηση των νανοϋλικών.....	20
1.5.2.2 Βασικές μέθοδοι σύνθεσης νανοϋλικών	23
1.5.2.3 Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός των νανοϋλικών.....	26
1.5.3 Εφαρμογές της νανοτεχνολογίας στη γεωργία	28
1.5.4 Νανοϋλικά και αλληλεπίδραση με τα φυτά.....	30
1.5.4.1 Πρόσληψη των νανοϋλικών από το φυτό	30
1.5.4.2 Μεταφορά και κατανομή στους φυτικούς ιστούς.....	31
1.5.4.3 Επιδράσεις των νανοϋλικών στη φυσιολογία και την ανάπτυξη των φυτών	34
1.5.5 Οφέλη και περιορισμοί	39
1.6 Ειδικό θεωρητικό πλαίσιο της παρούσας μελέτης.....	41
1.6.1 Ρόλος του Zn στη φυτική παραγωγή	41
1.6.2 Ρόλος του Ti στη φυτική παραγωγή	44
1.6.3 Ρόλος του ζεόλιθου ως λειτουργικού υλικού ή φορέα	46
1.7 Σκοπός και στόχοι της εργασίας.....	50
1.7.1 Σκοπός της εργασίας.....	50
1.7.2 Επιμέρους στόχοι.....	51
2 Μεθοδολογία Έρευνας.....	52
2.1 Φυτικό υλικό, συνθήκες ανάπτυξης και πειραματικός σχεδιασμός	52
2.2 Προετοιμασία διαλυμάτων νανοϋλικού και εφαρμογή μεταχειρίσεων	53
2.3 Αναπτυξιακές μετρήσεις.....	53
2.3.1 Μέτρηση προβαλλόμενης φυλλικής επιφάνειας.....	53
2.3.2 Μέτρηση νωπού και ξηρού βάρους.....	54

2.4	Φυσιολογικές μετρήσεις	54
2.4.1	Μέτρηση αγωγιμότητας των στομάτων.....	54
2.5	Προετοιμασία φυτικού ιστού για βιοχημικές αναλύσεις.....	54
2.6	Φασματομετρικές αναλύσεις	55
2.6.1	Ποσοτικός προσδιορισμός φωτοσυνθετικών χρωστικών	55
2.6.1.1	Αρχή της μεθόδου.....	55
2.6.1.2	Διαδικασία προσδιορισμού φωτοσυνθετικών χρωστικών.....	55
2.6.2	Ποσοτικός προσδιορισμός της υπεροξειδωσής των λιπιδίων των μεμβρανών (MDA)	55
2.6.2.1	Αρχή της μεθόδου.....	55
2.6.2.2	Διαδικασία προσδιορισμού MDA	56
2.6.3	Ποσοτικός προσδιορισμός του υπεροξειδίου του υδρογόνου (H ₂ O ₂)	56
2.6.3.1	Αρχή της μεθόδου.....	56
2.6.3.2	Διαδικασία προσδιορισμού H ₂ O ₂	57
2.7	Στατιστική ανάλυση.....	57
3	Αποτελέσματα.....	58
3.1	Επίδραση του Zeolite/Zn–Ti στην ανάπτυξη των φυτών	58
3.1.1	Προβαλλόμενη φυλλική επιφάνει.....	58
3.1.2	Νωπό βάρος	61
3.1.3	Ξηρό βάρος	62
3.2	Επίδραση του Zeolite/Zn–Ti στη στοματική αγωγιμότητα	63
3.3	Επίδραση του Zeolite/Zn–Ti στις φωτοσυνθετικές χρωστικές.....	65
3.3.1	Ολικές χλωροφύλλες	66
3.3.2	Καροτενοειδή.....	67
3.4	Επίδραση του Zeolite/Zn–Ti σε δείκτες οξειδωτικής καταπόνησης	68
3.4.1	Μαλονδιαλδεϋδη (MDA).....	68
3.4.2	Υπεροξειδίο του υδρογόνου (H ₂ O ₂)	69
4	Συζήτηση	70
4.1	Επίδραση του Zeolite/Zn–Ti στην ανάπτυξη των φυτών	70
4.2	Επίδραση του Zeolite/Zn–Ti στη στοματική αγωγιμότητα	71
4.3	Επίδραση του Zeolite/Zn–Ti στις φωτοσυνθετικές χρωστικές.....	71
4.4	Επίδραση του Zeolite/Zn–Ti στην οξειδωτική κατάσταση των φυτών.....	72
4.5	Συνολική αξιολόγηση της απόκρισης του μαρουλιού στο Zeolite/Zn–Ti.....	73
5	Συμπεράσματα	75
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	77

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Προβολές μεταβολής της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στην Κύπρο υπό τα σενάρια RCP2.6 και RCP8.5.....	3
Διάγραμμα 2: Προβολές μεταβολής της ετήσιας βροχόπτωσης στην Κύπρο υπό τα σενάρια RCP2.6 και RCP8.5.	3
Διάγραμμα 3:Βασικές μορφές αβιοτικής καταπόνησης και κύριες επιδράσεις τους στη φυσιολογία, την ανάπτυξη και τις αποκρίσεις των φυτών.....	7
Διάγραμμα 4: Βασικές επιδράσεις της θερμικής καταπόνησης, της υδατικής καταπόνησης και της αλατότητας στη φυσιολογία, την ανάπτυξη και την ποιότητα του μαρουλιού.	15
Διάγραμμα 5: Ταξινόμηση των νανοϋλικών με βάση τη μορφολογία/διαστατικότητα, τη χημική σύσταση και την προέλευσή τους, με ενδεικτικά παραδείγματα βασικών κατηγοριών.	23
Διάγραμμα 6: Βασικές προσεγγίσεις και κύριες μέθοδοι σύνθεσης νανοϋλικών	25
Διάγραμμα 7:Βασικές οδοί πρόσληψης και μεταφοράς νανοϋλικών στα φυτά μέσω της φυλλικής επιφάνειας και της ρίζας.	34
Διάγραμμα 8: Προβαλλόμενη φυλλική επιφάνεια φυτών μαρουλιού μετά την 1η διαφυλλική εφαρμογή του νανοϋλικού Zeolite/Zn–Ti.	59
Διάγραμμα 9: Προβαλλόμενη φυλλική επιφάνεια φυτών μαρουλιού πριν από τη 2η διαφυλλική εφαρμογή του νανοϋλικού Zeolite/Zn–Ti.	59
Διάγραμμα 10: Προβαλλόμενη φυλλική επιφάνεια φυτών μαρουλιού μετά τη 2η διαφυλλική εφαρμογή του νανοϋλικού Zeolite/Zn–Ti.	60
Διάγραμμα 11: Προβαλλόμενη φυλλική επιφάνεια φυτών μαρουλιού κατά την ημέρα της δειγματοληψίας.....	60
Διάγραμμα 12:Επίδραση διαφορετικών συγκεντρώσεων Zeolite/Zn–Ti στο νωπό βάρος φυτών μαρουλιού κατά την ημέρα της δειγματοληψίας.....	61
Διάγραμμα 13: Επίδραση διαφορετικών συγκεντρώσεων Zeolite/Zn–Ti στο ξηρό βάρος φυτών μαρουλιού κατά την ημέρα της δειγματοληψίας.....	62
Διάγραμμα 14: : Στοματική αγωγιμότητα φυτών μαρουλιού μετά την 1η διαφυλλική εφαρμογή του νανοϋλικού Zeolite/Zn–Ti.....	63
Διάγραμμα 15: Στοματική αγωγιμότητα φυτών μαρουλιού πριν από τη 2η διαφυλλική εφαρμογή του νανοϋλικού Zeolite/Zn–Ti.....	64
Διάγραμμα 16: Στοματική αγωγιμότητα φυτών μαρουλιού μετά τη 2η διαφυλλική εφαρμογή του νανοϋλικού Zeolite/Zn–Ti. Οι τιμές παρουσιάζονται ως μέσοι όροι. Διαφορετικά γράμματα πάνω από τις στήλες δηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.	64
Διάγραμμα 17: Στοματική αγωγιμότητα φυτών μαρουλιού κατά την ημέρα της δειγματοληψίας μετά την εφαρμογή διαφορετικών συγκεντρώσεων Zeolite/Zn–Ti.	65
Διάγραμμα 18 : Επίδραση διαφορετικών συγκεντρώσεων Zeolite/Zn–Ti στην ολική χλωροφύλλη φυτών μαρουλιού. Οι τιμές παρουσιάζονται ως μέσοι όροι. Διαφορετικά γράμματα πάνω από τις στήλες δηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.	66
Διάγραμμα 19: Επίδραση διαφορετικών συγκεντρώσεων Zeolite/Zn–Ti στην περιεκτικότητα φυτών μαρουλιού σε καροτενοειδή. Οι τιμές παρουσιάζονται ως μέσοι όροι. Διαφορετικά γράμματα πάνω από τις στήλες δηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.	67
Διάγραμμα 20: Επίδραση διαφορετικών συγκεντρώσεων Zeolite/Zn–Ti στα επίπεδα MDA φυτών μαρουλιού. Οι τιμές παρουσιάζονται ως μέσοι όροι. Ίδια γράμματα πάνω	

από τις στήλες δηλώνουν απουσία στατιστικά σημαντικών διαφορών μεταξύ των μεταχειρίσεων.	68
Διάγραμμα 21: Επίδραση διαφορετικών συγκεντρώσεων Zeolite/Zn–Ti στα επίπεδα H ₂ O ₂ φυτών μαρουλιού. Οι τιμές παρουσιάζονται ως μέσοι όροι. Διαφορετικά γράμματα πάνω από τις στήλες δηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.	69

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ABA:	Αμπισιτικό οξύ
AFM:	Μικροσκοπία ατομικής δύναμης
Ag:	Άργυρος
AgNPs:	Νανοςωματίδια αργύρου
Al:	Αργίλιο
Al ₂ O ₃ :	Οξείδιο του αργιλίου
BET:	Μέθοδος Brunauer–Emmett–Teller για προσδιορισμό ειδικής επιφάνειας
BJH:	Μέθοδος Barrett–Joyner–Halenda για ανάλυση πορώδους δομής
C:	Άνθρακας
Ca:	Ασβέστιο
Ca ²⁺ :	Ιόν ασβεστίου
CaCO ₃ :	Ανθρακικό ασβέστιο
Cd:	Κάδμιο
CeO ₂ :	Οξείδιο του δημητρίου
CeO ₂ NPs:	Νανοςωματίδια οξειδίου του δημητρίου
CF:	Συμβατικό λίπασμα
Cl ⁻ :	Ιόν χλωρίου
CO ₂ :	Διοξείδιο του άνθρακα
Cu:	Χαλκός
DLS:	Δυναμική σκέδαση φωτός
DNA:	Δεοξυριβονουκλεϊκό οξύ
EDS/EDX:	Φασματοσκοπία ενεργειακής διασποράς ακτίνων X
EE:	Ευρωπαϊκή Ένωση
FAO:	Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών
FAOSTAT:	Στατιστική βάση δεδομένων του FAO
Fe:	Σίδηρος
Fe ₂ O ₃ :	Οξείδιο του σιδήρου
FTIR:	Φασματοσκοπία υπερύθρου μετασχηματισμού Fourier
GA ₃ :	Γιββερελλικό οξύ
GPX:	Υπεροξειδάση της γλουταθειόνης
H ₂ O ₂ :	Υπεροξείδιο του υδρογόνου
IAA:	Ινδολο-3-οξικό οξύ / αυξίνη
IPCC:	Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή
ISO:	Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης
K:	Κάλιο
K ⁺ :	Ιόν καλίου
MDA:	Μαλονδιαλδεΐδη
Mg:	Μαγνήσιο
Mg ²⁺ :	Ιόν μαγνησίου
Mn:	Μαγγάνιο
N:	Άζωτο
Na:	Νάτριο
Na ⁺ :	Ιόν νατρίου
NaCl:	Χλωριούχο νάτριο
NF:	Νανολίπασμα

NH ₄ ⁺ :	Αμμωνιακό ιόν
nm:	Νανόμετρο
NPK:	Άζωτο, φώσφορος και κάλιο
NPs:	Νανοσωματίδια
O ₂ ⁻ :	Ρίζα υπεροξειδίου
OECD:	Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης
P:	Φώσφορος
PCL:	Πολυ(ε-καπρολακτόνη)
PEP:	Φωσφοενολοπυροσταφυλικό
pH:	Ενεργός οξύτητα
POD:	Υπεροξειδάση
RCP:	Αντιπροσωπευτική διαδρομή συγκέντρωσης
RNA:	Ριβονουκλεϊκό οξύ
ROS:	Δραστικές μορφές οξυγόνου
RuBisCO:	Ριβουλόζη-1,5-διφωσφορική καρβοξυλάση/οξυγενάση
SEM:	Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης
Si:	Πυρίτιο
Si/Al:	Λόγος πυριτίου προς αργίλιο
SiNPs:	Νανοσωματίδια πυριτίου
SiO ₂ :	Διοξείδιο του πυριτίου
SOD:	Υπεροξειδική δισμουτάση
SOS:	Σύστημα σηματοδότησης Salt Overly Sensitive για απόκριση στην αλατότητα
TEM:	Ηλεκτρονική μικροσκοπία διέλευσης
Ti:	Τιτάνιο
TiO ₂ :	Διοξείδιο του τιτανίου
tRNA:	Μεταφορικό ριβονουκλεϊκό οξύ
UPOV:	Διεθνής Ένωση για την Προστασία Νέων Ποικιλιών Φυτών
XPS:	Φασματοσκοπία φωτοηλεκτρονίων ακτίνων X
XRD:	Περίθλαση ακτίνων X
Zn:	Ψευδάργυρος
Zn ²⁺ :	Ιόν ψευδαργύρου
ZnO:	Οξείδιο του ψευδαργύρου
ZnSO ₄ :	Θεικός ψευδάργυρος
ZnTiO ₃ :	Τιτανικός ψευδάργυρος

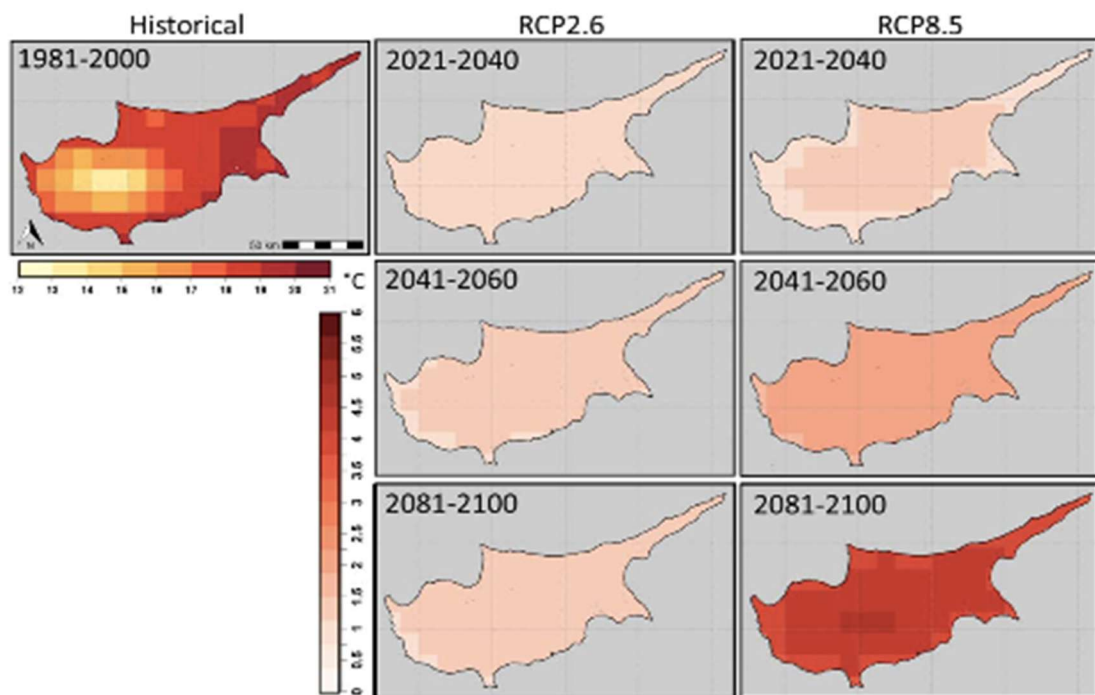
1 Εισαγωγή

1.1 Κλιματική αλλαγή, γεωργική παραγωγή και αβιοτικές καταπονήσεις

1.1.1 Κλιματική αλλαγή και γεωργική παραγωγή

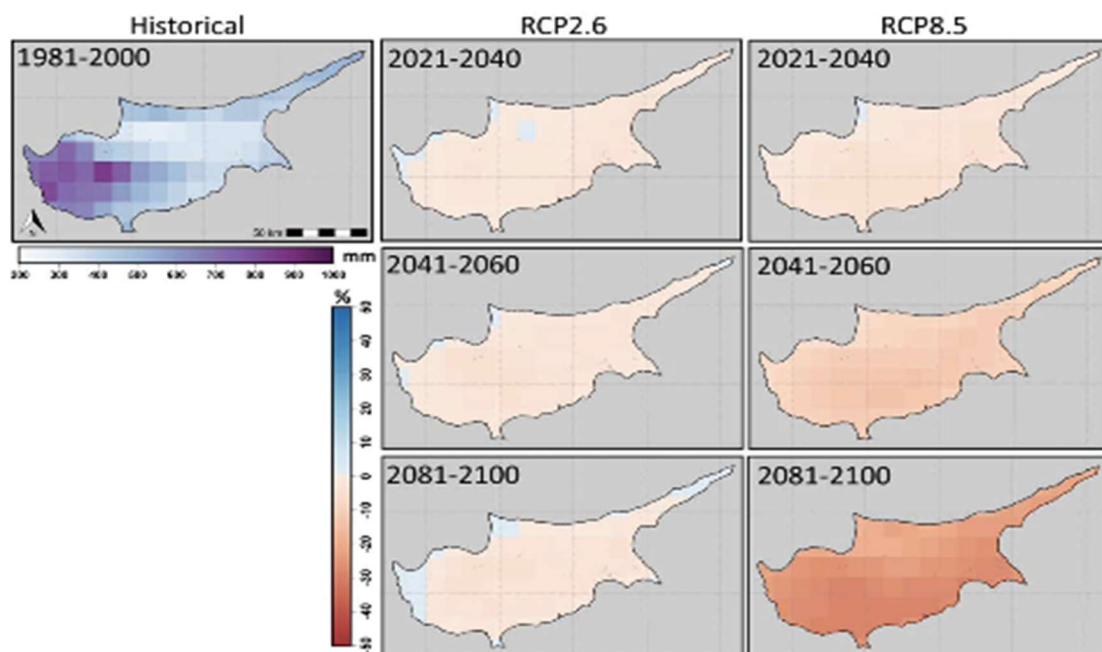
Τα τελευταία χρόνια, η κλιματική αλλαγή αναδεικνύεται ως μία από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές προκλήσεις, καθώς επηρεάζει τα φυσικά οικοσυστήματα, την ανθρώπινη δραστηριότητα και τη γεωργική παραγωγή. Η σημασία της είναι ιδιαίτερα μεγάλη για τη γεωργία, επειδή οι μεταβολές στη θερμοκρασία, στις βροχοπτώσεις και στη συχνότητα ακραίων φαινομένων επηρεάζουν άμεσα την ανάπτυξη, την παραγωγικότητα και τη σταθερότητα των καλλιεργειών. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), που αποτελεί τον βασικό διεθνή επιστημονικό φορέα αξιολόγησης του φαινομένου, ορίζει την κλιματική αλλαγή ως μεταβολή της κατάστασης του κλίματος που διαρκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα και μπορεί να οφείλεται τόσο σε φυσικές διεργασίες όσο και στην ανθρώπινη δραστηριότητα (IPCC, 2021). Στα φυσικά αίτια περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, οι μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία, η ηφαιστειακή δραστηριότητα και άλλες φυσικές μεταβολές του κλίματος (IPCC, 2021; Pérez-Lucas et al., 2024). Στα ανθρωπογενή αίτια ανήκουν κυρίως η καύση ορυκτών καυσίμων, η αποδάσωση, οι αλλαγές στη χρήση γης, η βιομηχανία και γενικότερα δραστηριότητες που αυξάνουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα (Pérez-Lucas et al., 2024; Shah et al., 2024). Η IPCC επισημαίνει ότι η σημερινή παγκόσμια θέρμανση αποδίδεται κυρίως στην ανθρώπινη επίδραση (IPCC, 2023). Αυτό συμβαίνει επειδή η αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο, το υποξείδιο του αζώτου και τα φθοριούχα αέρια, ενισχύει το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου και οδηγεί σε περαιτέρω θέρμανση του κλιματικού συστήματος (IPCC, 2023; Shah et al., 2024). Η εξέλιξη αυτή δεν περιορίζεται μόνο στην αύξηση της θερμοκρασίας, αλλά συνδέεται και με συχνότερα ακραία φαινόμενα, μεταβολές στις βροχοπτώσεις, ενίσχυση της ξηρασίας και ευρύτερες πιέσεις στα φυσικά και ανθρώπινα συστήματα (IPCC, 2023; MedECC, 2020). Οι επιπτώσεις αυτές δεν εκδηλώνονται με την ίδια ένταση σε όλες τις περιοχές, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εξέτασή τους και σε περιφερειακό επίπεδο.

Στην Ευρώπη, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής γίνονται ήδη αισθητές και αναμένεται να ενταθούν τις επόμενες δεκαετίες, με τις νότιες περιοχές να θεωρούνται ιδιαίτερα ευάλωτες (Dumitru et al., 2023). Η ευαλωτότητα αυτή είναι ακόμη πιο έντονη στη Μεσόγειο, όπου η θέρμανση εξελίσσεται ταχύτερα από τον παγκόσμιο μέσο όρο, τα θερμικά κύματα γίνονται συχνότερα και εντονότερα και οι βροχοπτώσεις τείνουν να μειώνονται σε πολλές περιοχές, ιδιαίτερα κατά τη θερμή περίοδο (MedECC, 2020). Στο πλαίσιο αυτό, η Κύπρος καταγράφει ήδη σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας. Παράλληλα, τα κλιματικά μοντέλα δείχνουν ότι, υπό ένα ενδιάμεσο σενάριο εκπομπών (RCP4.5), η θερμοκρασία μπορεί να αυξηθεί μέχρι τα μέσα του αιώνα έως περίπου 2°C τον χειμώνα και 3°C το καλοκαίρι, ενώ υπό ένα σενάριο υψηλών εκπομπών (RCP8.5) η άνοδος αναμένεται να είναι ακόμη μεγαλύτερη (Markou et al., 2020). Προς το τέλος του 21ου αιώνα, οι προβολές δείχνουν ότι η μέση ετήσια θερμοκρασία στην Κύπρο μπορεί να αυξηθεί πάνω από 4°C, ενώ παράλληλα αναμένεται μείωση της ετήσιας βροχόπτωσης, γεγονός που ενισχύει περαιτέρω την ευαλωτότητα του νησιού στην κλιματική αλλαγή (Lazoglou et al., 2024). Η προβλεπόμενη μεταβολή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας και μεταβολή της ετήσιας βροχόπτωσης στην Κύπρο παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1 και Διάγραμμα 2 αντίστοιχα. Οι μεταβολές αυτές επηρεάζουν ήδη βασικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως οι θερμικές συνθήκες και η διαθεσιμότητα νερού, οι οποίοι συνδέονται άμεσα με τη γεωργική δραστηριότητα.



Διάγραμμα 1: Προβολές μεταβολής της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στην Κύπρο υπό τα σενάρια RCP2.6 και RCP8.5.

Πηγή: Προσαρμογή από Lazoglou et al. (2024).



Διάγραμμα 2: Προβολές μεταβολής της ετήσιας βροχόπτωσης στην Κύπρο υπό τα σενάρια RCP2.6 και RCP8.5.

Πηγή: Προσαρμογή από Lazoglou et al. (2024)

Στον γεωργικό τομέα, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής εκδηλώνονται ήδη στην παραγωγικότητα, στη σταθερότητα της συγκομιδής και ευρύτερα, στην ικανότητα των συστημάτων τροφίμων να ανταποκρίνονται στις ανθρώπινες ανάγκες (Bezner Kerr et al., 2022). Στη Μεσόγειο, το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο, καθώς οι θερμότερες και ξηρότερες συνθήκες, σε συνδυασμό με συχνότερα και εντονότερα ακραία φαινόμενα, απειλούν βασικά στοιχεία του συστήματος παραγωγής τροφίμων (MedECC, 2020). Οι επιδράσεις αυτές εκδηλώνονται κυρίως μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας, της μεταβολής των βροχοπτώσεων, της ενίσχυσης της ξηρασίας και της συχνότερης εμφάνισης ακραίων γεγονότων, τα οποία αυξάνουν τις αρδευτικές ανάγκες, περιορίζουν τη διαθεσιμότητα νερού και ενισχύουν τον κίνδυνο μείωσης της παραγωγής (Lazoglou et al., 2024; Pérez-Lucas et al., 2024). Η σημασία των μεταβολών αυτών είναι ακόμη μεγαλύτερη για τα λαχανοκομικά φυτά, επειδή είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις αλλαγές της θερμοκρασίας και της διαθεσιμότητας νερού, ενώ οι σχετικές καταπονήσεις επηρεάζουν όχι μόνο την απόδοση αλλά και τη φυσιολογία, τη θρεπτική αξία και την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος (Zhou et al., 2024). Επιπλέον, παρά την υψηλή ευαισθησία τους στις κλιματικές μεταβολές, τα λαχανικά παραμένουν λιγότερο μελετημένα σε σχέση με τα σιτηρά, γεγονός που καθιστά αναγκαία μια πιο στοχευμένη προσέγγιση για τον συγκεκριμένο τομέα (Dumitru et al., 2023; Zhou et al., 2024). Για τον λόγο αυτό, η μελέτη των αβιοτικών καταπονήσεων που προκαλούνται ή εντείνονται από την κλιματική αλλαγή, όπως η θερμική και η υδατική καταπόνηση, αποκτά ιδιαίτερη σημασία για την κατανόηση της απόκρισης και της αντοχής των καλλιεργειών.

1.1.2 Αβιοτικές καταπονήσεις στα φυτά

Οι αβιοτικές καταπονήσεις αποτελούν μορφές καταπόνησης που προκαλούνται από μη βιολογικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες και επηρεάζουν άμεσα την ανάπτυξη, τη φυσιολογία και την παραγωγικότητα των φυτών (Zhao et al., 2025; Zhu, 2016). Σε αυτές περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, η υψηλή θερμοκρασία, το ψύχος, η ξηρασία, η αλατότητα, οι πλημμύρες, η έλλειψη θρεπτικών στοιχείων και η τοξικότητα από βαρέα μέταλλα, ανάλογα με το είδος του φυτού και τις περιβαλλοντικές συνθήκες (Muhammad et al., 2024; Zhu, 2016). Ανάμεσα στις αβιοτικές καταπονήσεις, η θερμική καταπόνηση, η υδατική καταπόνηση και η αλατότητα αποτελούν χαρακτηριστικές περιβαλλοντικές

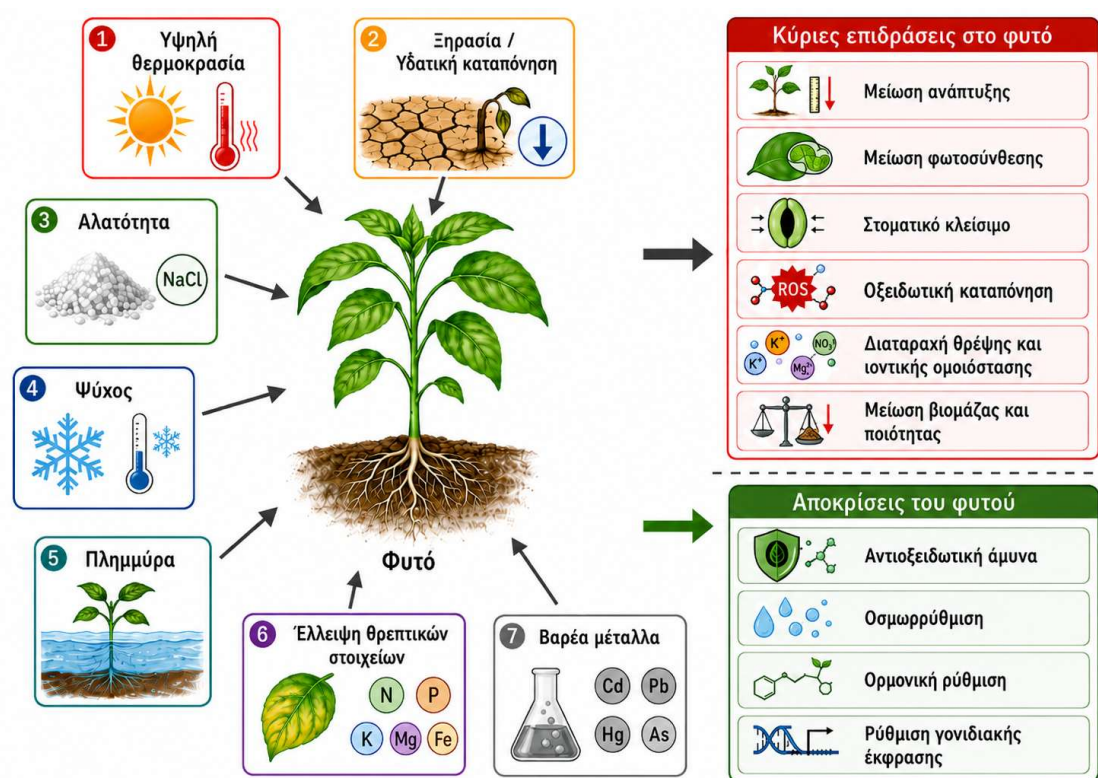
πιέσεις για τα καλλιεργούμενα φυτά, καθώς σχετίζονται άμεσα με τη θερμοκρασία, τη διαθεσιμότητα νερού και τις συνθήκες του εδαφικού περιβάλλοντος (C. Liu et al., 2024; Zhao et al., 2025). Γενικά, οι αβιοτικές καταπονήσεις επηρεάζουν το υδατικό ισοζύγιο, τη φωτοσύνθεση, τη θρέψη, την ακεραιότητα των μεμβρανών και τη συνολική μεταβολική λειτουργία των φυτών (Zhao et al., 2025; Zhu, 2016). Παράλληλα, προκαλούν συχνά οξειδωτική καταπόνηση μέσω της αυξημένης παραγωγής δραστικών μορφών οξυγόνου, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε βλάβες σε πρωτεΐνες, λιπίδια και άλλα κυτταρικά συστατικά (C. Liu et al., 2024; Zhu, 2016). Για να περιορίσουν τις αρνητικές αυτές επιδράσεις, τα φυτά ενεργοποιούν μηχανισμούς απόκρισης, όπως κλείσιμο των στομάτων, οσμωρρύθμιση, αντιοξειδωτική άμυνα, ορμονική ρύθμιση και μεταβολές στην έκφραση γονιδίων που σχετίζονται με την αντοχή στις δυσμενείς συνθήκες (A. A. Khan et al., 2025; Zhao et al., 2025).

Η θερμική καταπόνηση προκύπτει όταν η θερμοκρασία υπερβαίνει τα όρια αντοχής του φυτού και διαταράσσει βασικές λειτουργίες του (Samat et al., 2025; Xiong et al., 2025). Η υψηλή θερμοκρασία μπορεί να μειώσει τη φωτοσυνθετική ικανότητα, να επηρεάσει αρνητικά το φωτοσύστημα II, να διαταράξει τη σταθερότητα των μεμβρανών και να ενισχύσει την παραγωγή δραστικών μορφών οξυγόνου (Samat et al., 2025). Παράλληλα, η ένταση των επιδράσεων της εξαρτάται από το είδος, το γονότυπο, το αναπτυξιακό στάδιο και τη διάρκεια έκθεσης στην καταπόνηση (Xiong et al., 2025). Για τον λόγο αυτό, η θερμική καταπόνηση θεωρείται ιδιαίτερα κρίσιμη για την ανάπτυξη και τη σταθερότητα της φυτικής παραγωγής.

Η ξηρασία ή υδατική καταπόνηση προκαλείται από την περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού και αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους ανασταλτικούς παράγοντες για τη φυτική ανάπτυξη και την απόδοση (A.A. Khan et al., 2025; Muhammad et al., 2024). Η έλλειψη νερού οδηγεί σε μείωση της σπαργής, σε περιορισμό της φωτοσύνθεσης και σε επιβράδυνση της ανάπτυξης, ενώ παράλληλα αυξάνει τον κίνδυνο οξειδωτικής καταπόνησης και μεταβολικών διαταραχών (A. A. Khan et al., 2025). Τα φυτά αποκρίνονται στην ξηρασία κυρίως μέσω του κλεισίματος των στοματικού, της συσσώρευσης οσμωρυθμιστικών ουσιών, της ενίσχυσης του αντιοξειδωτικού συστήματος και της ενεργοποίησης ορμονικών μηχανισμών, με σημαντικότερο τον ρόλο του ABA(abscisic acid) (A. A. Khan et al., 2025; Muhammad et al., 2024).

Η αλατότητα αποτελεί επίσης σοβαρή αβιοτική καταπόνηση, καθώς η συσσώρευση αλάτων στο έδαφος ή στο νερό δυσκολεύει την πρόσληψη νερού και προκαλεί παράλληλα ιοντική τοξικότητα στα φυτικά κύτταρα (C. Liu et al., 2024; Muhammad et al., 2024). Έτσι, η αλατότητα συνδυάζει οσμωτική καταπόνηση με διαταραχή της ιοντικής ομοιόστασης, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά τη φωτοσύνθεση, την ανάπτυξη, τη θρέψη και τη συνολική λειτουργία του φυτού (C. Liu et al., 2024). Για την αντιμετώπισή της, τα φυτά ενεργοποιούν μηχανισμούς όπως οσμωρρύθμιση, απομάκρυνση ή αποθήκευση ιόντων, αντιοξειδωτική άμυνα και ρύθμιση εξειδικευμένων μονοπατιών σηματοδότησης, όπως το σύστημα SOS (Acharya et al., 2024; C. Liu et al., 2024).

Συνολικά, οι αβιοτικές καταπονήσεις αποτελούν βασικό περιοριστικό παράγοντα για τη φυσιολογική λειτουργία και την παραγωγική ικανότητα των φυτών. Η κατανόηση των επιδράσεών τους και των μηχανισμών απόκρισης που ενεργοποιούν είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της αντοχής των καλλιεργειών και για τη μελέτη της σημασίας τους σε επιμέρους φυτικά είδη. Οι βασικές μορφές αβιοτικής καταπόνησης, οι κύριες επιδράσεις τους στη φυτική λειτουργία και οι βασικές αποκρίσεις του φυτού συνοψίζονται στο Διάγραμμα 2.



Διάγραμμα 3:Βασικές μορφές αβιοτικής καταπόνησης και κύριες επιδράσεις τους στη φυσιολογία, την ανάπτυξη και τις αποκρίσεις των φυτών.

Πηγή: Προσαρμογή από Zhu (2016), C. Liu et al. (2024), Muhammad et al. (2024), Zhao et al. (2025) και A. A. Khan et al. (2025).

1.2 Το μαρούλι (*Lactuca sativa* L.) ως καλλιέργεια και φυτικό μοντέλο

1.2.1 Βοτανική ταυτότητα και μορφολογικά χαρακτηριστικά του μαρουλιού

1.2.1.1 Βοτανική ταξινόμηση του μαρουλιού

Το μαρούλι αναφέρεται επιστημονικά ως *Lactuca sativa* L. και ανήκει στο γένος *Lactuca*, στην υποφυλή *Lactucinae*, στη φυλή *Cichorieae* (ή *Lactuceae*), στην υποοικογένεια *Cichorioideae* και στην οικογένεια *Asteraceae* (Lebeda et al., 2025; Wei et al., 2017). Το *Lactuca sativa* αποτελεί το καλλιεργούμενο είδος του γένους *Lactuca* και περιγράφεται ως ετήσιο, διπλοειδές και αυτογονιμοποιούμενο φυτό, με χρωμοσωμικό αριθμό $2n = 2x = 18$ (Lebeda et al., 2025).