



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
Δ.Π.Μ.Σ. ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΕΙΦΟΡΙΑ
ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΙΧΘΥΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ
ΥΔΑΤΙΝΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΓΩΓΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή φυτικών
προϊόντων»**

Ελένη Πεχλιβανίδου

ΒΟΛΟΣ, 2024

«Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή φυτικών προϊόντων»

« Impact of climate change on plant food production»

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

- 1) **Φωτεινή Φ. Παρλαπάνη**, Επίκουρος Καθηγήτρια, Μοριακή Μικροβιολογία και Ποιότητα Αλιευτικών Προϊόντων – Τροφίμων, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, ***Επιβλέπουσα***.
- 2) **Ιωάννης Σ. Μποζιάρης**, Καθηγητής, Υγιεινή και Συντήρηση Ιχθυηρών, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος.
- 3) **Χρήστος Λύκας**, Αναπληρωτής Καθηγητής, Ανθοκομία, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, ***Μέλος***.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου στην επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κ. Φωτεινή Παρλαπάνη, για την ανεκτίμητη καθοδήγηση, την υποστήριξή της και τα οξυδερκή σχόλιά της σε όλη τη διαδικασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Θέλω επίσης να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες στην οικογένεια και τους φίλους μου, των οποίων η συνεχής ενθάρρυνση και η κατανόηση με βοήθησαν να ολοκληρώσω αυτό το ταξίδι. Η αμέριστη υποστήριξή τους υπήρξε πηγή δύναμης.

Περίληψη

Η παρούσα διατριβή διερευνά την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή φυτικών τροφίμων, με έμφαση στις φυσιολογικές αντιδράσεις των καλλιεργειών, την εξάπλωση των παθογόνων μικροοργανισμών και τις επιπτώσεις στην παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια. Συγκεκριμένα, διερευνάται πώς η αύξηση της θερμοκρασίας, η μετατόπιση των μοτίβων βροχοπτώσεων και η αυξημένη συχνότητα ακραίων καιρικών φαινομένων επηρεάζουν την παραγωγικότητα και τη βιωσιμότητα των γεωργικών συστημάτων. Μέσω μιας ολοκληρωμένης βιβλιογραφικής ανασκόπησης και στατιστικής ανάλυσης, η μελέτη εντοπίζει βασικές τάσεις, όπως η μείωση των αποδόσεων για βασικές καλλιέργειες όπως το σιτάρι, το ρύζι και το καλαμπόκι, ειδικά σε περιοχές που πλήττονται από παρατεταμένες ξηρασίες και καύσωνες. Επιπλέον, εξετάζεται η αυξανόμενη απειλή των φυτικών ασθενειών και παρασίτων, τα οποία είναι ολοένα και πιο διαδεδομένα λόγω των θερμότερων και πιο υγρών κλιμάτων και πώς αυτοί οι παράγοντες απειλούν συλλογικά την ασφάλεια των τροφίμων και τη διατροφική ποιότητα.

Η έρευνα υπογραμμίζει επίσης την ανάγκη για προληπτικές στρατηγικές προσαρμογής, συμπεριλαμβανομένης της βελτιωμένης διαχείρισης των υδάτων, της ανάπτυξης ανθεκτικών στην ξηρασία ποικιλιών καλλιεργειών και ολοκληρωμένων τεχνικών διαχείρισης παρασίτων για τον μετριασμό αυτών των δυσμενών επιπτώσεων. Τα ευρήματα υπογραμμίζουν την επείγουσα ανάγκη εφαρμογής βιώσιμων γεωργικών πρακτικών για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και τη βελτίωση της υγείας του εδάφους.

Λέξεις κλειδιά: Κλιματική αλλαγή, παραγωγή φυτικών τροφίμων, αποδόσεις καλλιεργειών, παθογόνοι μικροοργανισμοί, επισιτιστική ασφάλεια, στρατηγικές προσαρμογής.

Abstract

The thesis explores the profound impact of climate change on plant food production, with an emphasis on physiological responses of crops, the spread of pathogenic microorganisms and implications for global food security. The course explores how rising temperatures, shifting rainfall patterns and increased frequency of extreme weather events affect the productivity and sustainability of agricultural systems. Through a comprehensive literature review and statistical analysis, the study identifies key trends such as declining yields for staple crops such as wheat, rice and maize, especially in areas affected by prolonged droughts and heat waves. In addition, it examines the growing threat of plant diseases and pests, which are increasingly prevalent due to warmer and wetter climates, and how these factors collectively threaten food safety and nutritional quality.

The research also highlights the need for proactive adaptation strategies, including improved water management, development of drought-tolerant crop varieties, and integrated pest management techniques to mitigate these adverse impacts. The findings highlight the urgent need to implement sustainable agricultural practices to reduce greenhouse gas emissions and improve soil health.

Keywords: Climate change, plant food production, crop yields, pathogenic microorganisms, food security, adaptation strategies.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	5
Abstract	6
Κατάλογος Πινάκων.....	8
Κατάλογος Γραφημάτων	9
Κεφάλαιο 1. Φυτικά τρόφιμα και κλιματική αλλαγή.....	10
1.1 Φυτικά τρόφιμα.....	10
1.2 Κλιματική αλλαγή και περιβάλλον	14
1.3 Κλιματική αλλαγή και καλλιέργειες φυτικών τροφίμων.....	20
1.4 Αύξηση παθογόνων μικροοργανισμών	29
1.5 Επιπτώσεις στην υγεία των καταναλωτών και του περιβάλλοντος	37
1.6 Σκοπός της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.....	40
Κεφάλαιο 2. Υλικά και Μέθοδοι.....	41
2.1 Συλλογή πληροφορίας.....	41
2.2 Στατιστική ανάλυση	43
Κεφάλαιο 3. Αποτελέσματα	43
3.1 Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις καλλιέργειες φυτικών τροφίμων	43
3.2 Επιπτώσεις στην παραγωγή φυτικών προϊόντων – μεταποίηση	60
3.3 Επιπτώσεις στην υγεία των καταναλωτών	65
Κεφάλαιο 4. Συζήτηση	75
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα	85
Βιβλιογραφία.....	87

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Δεδομένα και προβλέψεις της μελέτης για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

Πίνακας 2: Δεδομένα που σχετίζονται με τις καλλιέργειες που επηρεάζονται από την κλιματική αλλαγή και τις αντίστοιχες στρατηγικές μετριασμού

Πίνακας 3: Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στις βασικές καλλιέργειες, με συσχετίσεις μεταξύ διαφορετικών κλιματικών μεταβλητών και των επιπτώσεών τους στην απόδοση.

Πίνακας 4: Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις καλλιέργειες και στρατηγικές μετριασμού της μελέτης.

Πίνακας 5: Επίπτωση της κλιματικής αλλαγής στη μεταποίηση των φυτικών προϊόντων.

Πίνακας 6: Βασικά αριθμητικά δεδομένα για τον αντίκτυπο της κλιματικής αλλαγής στην επεξεργασία τροφίμων μετά τη συγκομιδή.

Πίνακας 7: Προβλεπόμενη παγκόσμια πτώση της φυτικής παραγωγής.

Πίνακας 8: Κλιματική Αλλαγή Και Ασθένειες Από Τρόφιμα.

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 1: Δεδομένα και προβλέψεις της μελέτης για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

Γράφημα 2: Προσδοκώμενες απώλειες και αυξήσεις στην αλιεία ψαριών εν μέσω της κλιματικής κρίσης.

Γράφημα 3: Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στις βασικές καλλιέργειες, με συσχετίσεις μεταξύ διαφορετικών κλιματικών μεταβλητών και των επιπτώσεών τους στην απόδοση.

Γράφημα 4: Προβλεπόμενη παγκόσμια πτώση της φυτικής παραγωγής τις επόμενες δεκαετίες, βάση της έρευνας.

Γράφημα 5: Κλιματική Αλλαγή Και Ασθένειες Από Τρόφιμα.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Φυτικά τρόφιμα

Οι φυτικές τροφές ή τα φυτικά τρόφιμα, που περιλαμβάνουν μια εκτεταμένη σειρά από καλλιέργειες όπως δημητριακά, όσπρια, φρούτα, λαχανικά, ξηρούς καρπούς και σπόρους, αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο της παγκόσμιας επισιτιστικής ασφάλειας και διατροφής. Αυτά τα βοτανικά προϊόντα αποτελούν πηγές βασικών θρεπτικών συστατικών, παρέχοντας υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λίπη, βιταμίνες και μέταλλα απαραίτητα για την ανθρώπινη υγεία και ανάπτυξη. Κατά την εξέταση των φυτικών τροφίμων από επιστημονική άποψη, είναι σημαντικό να γίνει εμβάθυνση στην ταξινόμηση, τη διατροφική τους σύνθεση, τους φυσιολογικούς ρόλους και τις αγρονομικές πρακτικές που εμπλέκονται στην καλλιέργειά τους (Thayer, 2023).

Τα φυτικά τρόφιμα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρέως σε διάφορες ομάδες με βάση τα βοτανικά και διατροφικά τους χαρακτηριστικά:

- ❖ *Δημητριακά*: Η συγκεκριμένη ομάδα περιλαμβάνει βασικές καλλιέργειες όπως σιτάρι (*Triticum* spp.), ρύζι (*Oryza sativa*), καλαμπόκι (*Zea mays*), κριθάρι (*Hordeum vulgare*) και βρώμη (*Avena sativa*). Αυτά τα φυτά είναι μέλη της οικογένειας *Poaceae* και καλλιεργούνται κυρίως για τους πλούσιους σε υδατάνθρακες σπόρους τους (Thayer, 2023).
- ❖ *Όσπρια*: Συγκαταλεγμένα στην οικογένεια *Fabaceae*, όσπρια όπως η σόγια (*Glycine max*), οι φακές (*Lens culinaris*), τα ρεβίθια (*Cicer arietinum*) και τα κοινά φασόλια (*Phaseolus vulgaris*) εκτιμώνται κυρίως για την υψηλή περιεκτικότητά τους σε πρωτεΐνες και την ικανότητα να σταθεροποιούν το ατμοσφαιρικό άζωτο μέσω συμβίωσης με βακτήρια *Rhizobium* (Thayer, 2023).

- ❖ *Φρούτα και λαχανικά*: Αυτήν η ποικιλόμορφη ομάδα περιλαμβάνει μια μεγάλη ποικιλία φυτικών μερών που καταναλώνονται για τις βιταμίνες, τα μέταλλα και τα φυτοχημικά τους. Φρούτα όπως τα μήλα (*Malus domestica*), οι μπανάνες (*Musa spp.*) και οι ντομάτες (*Solanum lycopersicum*) παρέχουν απαραίτητες βιταμίνες όπως η βιταμίνη C και το φυλλικό οξύ. Τα λαχανικά, συμπεριλαμβανομένων των φυλλωδών λαχανικών όπως το σπανάκι (*Spinacia oleracea*), οι ρίζες όπως τα καρότα (*Daucus carota*) και τα σταυρανθή λαχανικά όπως το μπρόκολο (*Brassica oleracea*), είναι πλούσια σε μικροθρεπτικά συστατικά και διαιτητικές ίνες.
- ❖ *Ξηροί καρποί και σπόροι*: Πρόκειται για ενεργειακά πυκνά φυτικά τρόφιμα, όπως τα αμύγδαλα (*Prunus dulcis*), τα καρύδια (*Juglans regia*) και οι λιναρόσποροι (*Linum usitatissimum*), τα οποία είναι αξιοσημείωτα για τα υγιή λίπη τους, ιδιαίτερα τα ακόρεστα λιπαρά οξέα και το ρόλο τους στην παροχή πρωτεΐνης και φυτικών ινών (Thayer, 2023).

Οι φυτικές τροφές αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της ανθρώπινης διαίτας λόγω των περιεκτικών διατροφικών τους προφίλ:

- ❖ *Υδατάνθρακες*: Ως κύρια πηγή ενέργειας, οι υδατάνθρακες στα φυτικά τρόφιμα βρίσκονται κυρίως με τη μορφή αμύλου και σακχάρων. Τα δημητριακά και οι κόνδυλοι, όπως οι πατάτες (*Solanum tuberosum*), συμβάλλουν σημαντικά στην πρόσληψη υδατανθράκων.
- ❖ *Πρωτεΐνες*: Ενώ οι ζωικές πηγές συχνά τονίζονται για πρωτεΐνες, οι φυτικές πρωτεΐνες από όσπρια, ξηρούς καρπούς και ορισμένα δημητριακά διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο, ειδικά σε χορτοφαγικές και vegan δίαιτες. Αυτές οι πρωτεΐνες αποτελούνται από ποικίλα προφίλ αμινοξέων, με τα

όσπρια να παρέχουν σημαντικές ποσότητες λυσίνης, ενός απαραίτητου αμινοξέος.

- ❖ *Λίπη*: Οι φυτικές τροφές όπως οι ξηροί καρποί, οι σπόροι και το αβοκάντο (*Persea americana*) είναι πλούσιες σε ακόρεστα λιπαρά, τα οποία είναι ευεργετικά για την καρδιαγγειακή υγεία. Στα λίπη αυτά περιλαμβάνονται τα ωμέγα-3 και ωμέγα-6 λιπαρά οξέα, τα οποία είναι απαραίτητα για διάφορες σωματικές λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένων των φλεγμονωδών αποκρίσεων και της ακεραιότητας της κυτταρικής μεμβράνης.
- ❖ *Βιταμίνες και μέταλλα*: Τα φρούτα και τα λαχανικά είναι ιδιαίτερα πλούσια σε βιταμίνες όπως βιταμίνη C, A, E και K, και μέταλλα όπως κάλιο, μαγνήσιο και σίδηρο. Για παράδειγμα, τα εσπεριδοειδή (*Citrus spp.*) είναι γνωστά για την υψηλή περιεκτικότητά τους σε βιταμίνη C, η οποία είναι σημαντική για τη σύνθεση κολλαγόνου και τη λειτουργία του ανοσοποιητικού.
- ❖ *Φυτοχημικά*: Πέρα από τα μακροθρεπτικά και τα μικροθρεπτικά συστατικά, τα φυτικά τρόφιμα περιέχουν μια τεράστια γκάμα φυτοχημικών, όπως φλαβονοειδή, καροτενοειδή και πολυφαινόλες, που έχει αποδειχθεί ότι έχουν αντιοξειδωτικές, αντιφλεγμονώδεις και αντικαρκινογόνες ιδιότητες (Nyerges & Begley, 2014).

Η καλλιέργεια φυτικών τροφών περιλαμβάνει μια μυριάδα γεωπονικών πρακτικών που στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της απόδοσης, της ποιότητας και της βιωσιμότητας:

- *Διαχείριση του εδάφους:* Η διασφάλιση της γονιμότητας και της δομής του εδάφους είναι θεμελιώδης. Πρακτικές όπως η αμειψισπορά, οι καλλιέργειες και οι οργανικές τροποποιήσεις (π.χ. κομπόστ, πράσινη λίπανση) ενισχύουν την υγεία του εδάφους και τη διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών.
- *Διαχείριση υδάτων:* Οι αποτελεσματικές τεχνικές άρδευσης, συμπεριλαμβανομένης της άρδευσης με σταγόνες και της συλλογής όμβριων υδάτων, είναι κρίσιμες για τη διατήρηση των υδάτινων πόρων και τη διασφάλιση συνεπούς ενυδάτωσης των καλλιεργειών, ειδικά σε ξηρές περιοχές.
- *Έλεγχος παρασίτων και ασθενειών:* Η ολοκληρωμένη διαχείριση παρασίτων (IPM) συνδυάζει βιολογικό έλεγχο, πολιτισμικές πρακτικές, μηχανικές μεθόδους και χημικές θεραπείες για τη διαχείριση παρασίτων και ασθενειών, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Nyerges & Begley, 2014).
- *Γενετική Βελτίωση:* Η εκτροφή φυτών και η βιοτεχνολογία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη ποικιλιών καλλιεργειών με βελτιωμένα χαρακτηριστικά όπως αντοχή σε ασθένειες, ανοχή στην ξηρασία και βελτιωμένη διατροφική ποιότητα. Η γενετική τροποποίηση και η επεξεργασία γονιδιώματος CRISPR-Cas9 βρίσκονται στην πρώτη γραμμή των σύγχρονων στρατηγικών βελτίωσης των καλλιεργειών. Το CRISPR-Cas9 προσαρμόστηκε από ένα φυσικό σύστημα επεξεργασίας γονιδιώματος που χρησιμοποιούν τα βακτήρια ως μηχανισμό άμυνας του ανοσοποιητικού συστήματος. Όταν τα βακτήρια μολύνονται με ιούς, συλλαμβάνουν μικρά κομμάτια του ιικού DNA και τα εισάγουν στο δικό τους DNA με συγκεκριμένα μοτίβα, δημιουργώντας τμήματα γνωστά ως συστοιχίες

CRISPR. Αυτές οι συστοιχίες CRISPR επιτρέπουν στα βακτήρια να «θυμούνται» τον ιό. Εάν ο ιός επιτεθεί ξανά, τα βακτήρια μπορούν να παράγουν τμήματα RNA από τις συστοιχίες CRISPR για να στοχεύσουν το DNA του ιού. Στη συνέχεια, τα βακτήρια χρησιμοποιούν την πρωτεΐνη Cas9 ή ένα παρόμοιο ένζυμο για να κόψουν το DNA, απενεργοποιώντας τον ιό. Αυτή η φυσική διαδικασία έχει αξιοποιηθεί και προσαρμόσκει ως ένα ισχυρό εργαλείο για την επεξεργασία γονιδίων σε άλλους οργανισμούς, επιτρέποντας ακριβείς τροποποιήσεις σε αλληλουχίες DNA για διάφορες ερευνητικές, θεραπευτικές και βιοτεχνολογικές εφαρμογές (Nyerges & Begley, 2014).

1.2 Κλιματική αλλαγή και περιβάλλον

Η κλιματική αλλαγή αντιπροσωπεύει μια από τις πιο κρίσιμες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η παγκόσμια κοινότητα σήμερα, με εκτεταμένες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η επιστημονική συναίνεση είναι αδιαμφισβήτητη. Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, ιδιαίτερα η καύση ορυκτών καυσίμων και η αποψίλωση των δασών, έχουν αυξήσει σημαντικά τις συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου (GHG) στην ατμόσφαιρα. Όλο αυτό έχει οδηγήσει σε μια αισθητή θέρμανση του κλίματος της Γης, με βαθιές συνέπειες για τα φυσικά συστήματα και τις ανθρώπινες κοινωνίες.

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) ανέφερε ότι η παγκόσμια μέση θερμοκρασία έχει αυξηθεί κατά περίπου 1,2 βαθμούς Κελσίου από την προβιομηχανική εποχή. Αυτήν η θέρμανση αποδίδεται κυρίως σε αυξημένα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), μεθανίου (CH₄) και υποξειδίου του αζώτου (N₂O), τα οποία παγιδεύουν τη θερμότητα στην ατμόσφαιρα μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου. Η τρέχουσα τροχιά των εκπομπών GHG υποδηλώνει ότι, χωρίς

σημαντικές προσπάθειες μετριασμού, οι παγκόσμιες θερμοκρασίες θα μπορούσαν να αυξηθούν κατά 3 έως 4 βαθμούς Κελσίου μέχρι το τέλος του αιώνα, θέτοντας σοβαρούς κινδύνους για το περιβάλλον και την ανθρώπινη ευημερία (Rajaram et al., 2022).

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι εκτεταμένες και πολύπλευρες. Ένα από τα πιο ορατά αποτελέσματα είναι η αλλαγή των καιρικών σχημάτων, με αποτέλεσμα πιο συχνά και έντονα ακραία καιρικά φαινόμενα. Οι καύσωνες, οι ξηρασίες και οι πυρκαγιές γίνονται όλο και πιο συνηθισμένα, ιδιαίτερα σε περιοχές όπως η Νότια Ευρώπη και η Μεσόγειος. Αυτά τα γεγονότα οδηγούν σε σημαντικές οικολογικές και οικονομικές ζημιές, επηρεάζοντας τη βιοποικιλότητα, τη γεωργία, τους υδάτινους πόρους και την ανθρώπινη υγεία. Για παράδειγμα, οι καύσωνες που σημειώθηκαν στην Ευρώπη τα καλοκαίρια του 2003 και του 2019 είχαν ως αποτέλεσμα χιλιάδες θανάτους που σχετίζονται με τη ζέστη, σημαντικές γεωργικές απώλειες και εκτεταμένες δασικές πυρκαγιές (Rajaram et al., 2022).

Τα μοτίβα βροχοπτώσεων μεταβάλλονται επίσης, με ορισμένες περιοχές να παρουσιάζουν αυξημένες βροχοπτώσεις και πλημμύρες, ενώ άλλες υποφέρουν από παρατεταμένες ξηρασίες. Στην Ευρώπη, σημειώθηκε αξιοσημείωτη αύξηση στα γεγονότα έντονων βροχοπτώσεων, που συμβάλλουν σε καταστροφικές πλημμύρες, όπως αυτές που σημειώθηκαν στη Γερμανία και το Βέλγιο το 2021. Αυτές οι πλημμύρες όχι μόνο προκαλούν άμεσες βλάβες σε ανθρώπινες ζωές και περιουσίες, αλλά επίσης οδηγούν σε μακροχρόνιες οικολογικές συνέπειες, όπως η διάβρωση του εδάφους, η μόλυνση των υδάτων και η καταστροφή των οικοτόπων (Rajaram et al., 2022).

Η κλιματική αλλαγή ασκεί βαθιές επιπτώσεις στα χερσαία και θαλάσσια οικοσυστήματα. Τα χερσαία οικοσυστήματα παρουσιάζουν αλλαγές στην κατανομή των ειδών, τη φαινολογία και τη σύνθεση των οικοσυστημάτων. Καθώς οι θερμοκρασίες αυξάνονται, πολλά είδη κινούνται προς τους πόλους ή σε υψηλότερα

υψόμετρα, αναζητώντας πιο δροσερά ενδιαίτηματα. Μία τέτοια μετατόπιση διαταράσσει τις υπάρχουσες οικολογικές αλληλεπιδράσεις και μπορεί να οδηγήσει σε τοπικές εξαφανίσεις, ιδιαίτερα για είδη με περιορισμένη κινητικότητα ή συγκεκριμένες απαιτήσεις ενδιαιτημάτων. Τα δασικά οικοσυστήματα είναι ιδιαίτερα ευάλωτα, με αυξημένους κινδύνους προσβολών από παράσιτα, ασθένειες και πυρκαγιές που επιδεινώνουν το άγχος στους πληθυσμούς δέντρων που ήδη παλεύουν με τις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες (Gary & Churchill, 2022).

Τα θαλάσσια οικοσυστήματα επηρεάζονται παρόμοια. Οι ωκεανοί έχουν απορροφήσει ένα σημαντικό μέρος της υπερβολικής θερμότητας από την υπερθέρμανση του πλανήτη, οδηγώντας σε αυξημένες θερμοκρασίες στην επιφάνεια της θάλασσας. Η όλη υπερθέρμανση έχει πολλές επιβλαβείς επιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένης της λεύκανσης των κοραλλιών, η οποία απειλεί τα οικοσυστήματα των κοραλλιογενών υφάλων παγκοσμίως. Ο Μεγάλος Κοραλλιογενής Ύφαλος, για παράδειγμα, έχει βιώσει πολλαπλά γεγονότα μαζικής λεύκανσης τα τελευταία χρόνια, οδηγώντας σε εκτεταμένη θνησιμότητα κοραλλιών. Η οξίνιση των ωκεανών, λόγω της αυξημένης απορρόφησης CO₂, εντείνει περαιτέρω το στρες στη θαλάσσια ζωή, ιδιαίτερα στους ασβεστοποιητικούς οργανισμούς όπως τα μαλάκια, τα καρκινοειδή και τα κοράλλια. Οι συνδυασμένες επιπτώσεις της θέρμανσης, της οξίνισης και της αποοξυγόνωσης αλλάζουν τη θαλάσσια βιοποικιλότητα και τη δομή των θαλάσσιων τροφικών ιστών (Gary & Churchill, 2022).

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες, με τους ευάλωτους πληθυσμούς και τις περιοχές να αντιμετωπίζουν δυσανάλογους κινδύνους. Τα μικρά νησιωτικά αναπτυσσόμενα κράτη, οι χαμηλές παράκτιες περιοχές και οι περιοχές που εξαρτώνται από ευαίσθητους στο κλίμα πόρους, όπως η γεωργία και η αλιεία, κινδυνεύουν ιδιαίτερα. Στην Ευρώπη, οι νότιες και ανατολικές περιοχές

αναμένεται να αντιμετωπίσουν μεγαλύτερες προκλήσεις που προκαλούνται από το κλίμα, συμπεριλαμβανομένης της λειψυδρίας, των μειωμένων γεωργικών αποδόσεων και των αυξημένων κινδύνων για την υγεία από τους καύσωνες και τις ασθένειες που μεταδίδονται από φορείς.

Η αντιμετώπιση των πολύπλευρων προκλήσεων που θέτει η κλιματική αλλαγή απαιτεί ολοκληρωμένες και συντονισμένες προσπάθειες σε διεθνές, εθνικό και τοπικό επίπεδο. Οι στρατηγικές μετριασμού, που στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών GHG, είναι απαραίτητες για τον περιορισμό της έκτασης της κλιματικής αλλαγής και των συναφών επιπτώσεων. Η δέσμευση της Ευρωπαϊκής Ένωσης να επιτύχει καθαρές μηδενικές εκπομπές έως το 2050 είναι ένα κρίσιμο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση, που απαιτεί ισχυρές πολιτικές και σημαντικές επενδύσεις σε καθαρή ενέργεια και βιώσιμες πρακτικές (Gary & Churchill, 2022).

Τα μέτρα προσαρμογής είναι εξίσου σημαντικά για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας στις αναπόφευκτες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Η αποτελεσματική προσαρμογή απαιτεί επίσης την ενίσχυση της ευαισθητοποίησης και της ετοιμότητας για το κλίμα μεταξύ των κοινοτήτων, διασφαλίζοντας ότι οι ευάλωτοι πληθυσμοί διαθέτουν τους πόρους και την υποστήριξη που χρειάζονται για να αντιμετωπίσουν το στρες που σχετίζεται με το κλίμα (Wolfson, 2017).

Η ζήτηση για ενέργεια έχει γίνει βασικό θέμα κατά την ανάλυση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, ιδιαίτερα σε σχέση με τις γεωργικές πρακτικές και τα συστήματα παραγωγής τροφίμων. Η ενέργεια είναι απαραίτητη σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης, ενδεικτικά, της παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, των μεταφορών, των βιομηχανικών διεργασιών και της γεωργίας. Κάθε ένας από αυτούς τους τομείς βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ενέργεια για τη διατήρηση της λειτουργικότητας και της παραγωγικότητας.

Καταρχάς, η παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας είναι θεμελιώδης για την τροφοδοσία βιομηχανιών, κατοικιών και γεωργικών μηχανημάτων. Η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για πολλούς σκοπούς, όπως η λειτουργία αγροτικού εξοπλισμού, η διατήρηση περιβάλλοντος θερμοκηπίου και η επεξεργασία των συγκομισμένων καλλιεργειών. Η ζήτηση για ενέργεια σε αυτές τις λειτουργίες μπορεί να είναι εκτεταμένη, λόγω της ανάγκης για σταθερές και συνεπείς πηγές ενέργειας. Μία τέτοια απαίτηση συχνά μεταφράζεται σε αυξημένη εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, τα οποία παραμένουν οι κύριες πηγές ενέργειας παγκοσμίως. Τα ορυκτά καύσιμα συνδέονται με σημαντικές εκπομπές άνθρακα, συμβάλλοντας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και επιδεινώνοντας την κλιματική αλλαγή.

Στο πλαίσιο των μεταφορών, η ενέργεια είναι σημαντική για τη μετακίνηση αγαθών και εργατικού δυναμικού στις περιφέρειες, διασφαλίζοντας την έγκαιρη διανομή των γεωργικών προϊόντων και πόρων. Τα σύγχρονα συστήματα μεταφορών, που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το πετρέλαιο και τα προϊόντα πετρελαίου, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διατήρηση των αλυσίδων εφοδιασμού. Η εξάρτηση υπογραμμίζει την επιτακτική ανάγκη για βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις για τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα των μεταφορών, καθώς το περιβαλλοντικό κόστος που σχετίζεται με την κατανάλωση καυσίμου περιλαμβάνει την ατμοσφαιρική ρύπανση και την έκλυση αερίων του θερμοκηπίου (Tol, 2019).

Οι βιομηχανικές διεργασίες, που περιλαμβάνουν την παρασκευή προϊόντων και κατασκευή μηχανημάτων που είναι απαραίτητα για τη γεωργική απόδοση, απαιτούν επίσης σημαντική εισροή ενέργειας. Οι βιομηχανίες καταναλώνουν ενέργεια για την παραγωγή λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και προηγμένου εξοπλισμού που διευκολύνουν τη γεωργία μεγάλης κλίμακας. Η ενέργεια που απαιτείται σε αυτές τις διεργασίες όχι

μόνο επηρεάζει τις οικονομικές δαπάνες αλλά οδηγεί επίσης σε περιβαλλοντική υποβάθμιση λόγω των ρύπων που εκπέμπονται κατά τους κύκλους παραγωγής.

Η γεωργία, ειδικότερα, αντιμετωπίζει μια διπλή σχέση με την ενέργεια. Από τη μια πλευρά, η ενέργεια είναι κρίσιμο πiónι για την άρδευση, τη μηχανοποίηση της φύτευσης και της συγκομιδής και την επεξεργασία των τροφίμων. Για παράδειγμα, η λειτουργία των συστημάτων άρδευσης, ειδικά σε άνυδρες και ημίξηρες περιοχές, βασίζεται σε αντλίες και τεχνολογία διανομής νερού που καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας ή καυσίμου ντίζελ. Από την άλλη πλευρά, η ίδια η γεωργία είναι σημαντικός καταναλωτής ενέργειας, γεγονός που καθιστά τον κλάδο ευάλωτο στις διακυμάνσεις των τιμών και της διαθεσιμότητας της ενέργειας. Η ανάγκη για σταθερό ενεργειακό εφοδιασμό στη γεωργία διασφαλίζει ότι οι καλλιέργειες ποτίζονται επαρκώς, συγκομίζονται και υποβάλλονται σε επεξεργασία για κατανάλωση, υπογραμμίζοντας τη σημασία της ενεργειακής ασφάλειας για τη σταθερότητα των τροφίμων (Tol, 2019).

Ωστόσο, η εξάρτηση από τις συμβατικές πηγές ενέργειας συνεπάγεται σημαντικό κόστος. Είναι το περιβαλλοντικό κόστος μια πειστική ανησυχία; Η καύση άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου απελευθερώνει υψηλά επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα και άλλους ρύπους στην ατμόσφαιρα. Αυτές οι εκπομπές συμβάλλουν στην εντατικοποίηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη και στην υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα, οδηγώντας σε αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα. Η υποβάθμιση των χερσαίων και υδάτινων πόρων, που προκύπτει από την εξόρυξη και τη χρήση ορυκτών καυσίμων, προσθέτει άλλο ένα στρώμα περιβαλλοντικής ζημίας (Sears & Tucker, 2024).

Το οικονομικό κόστος της παραγωγής ενέργειας μπορεί να είναι σημαντικό, επηρεάζοντας τις οικονομικές αποφάσεις τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο

επίπεδο. Η εξόρυξη, η διύλιση και η μεταφορά πρωτογενών πηγών ενέργειας απαιτούν σημαντικές επενδύσεις. Οι οικονομικές επιβαρύνσεις ασκούν πίεση στις οικονομίες, ειδικά σε περιοχές όπου η υποδομή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί. Το υψηλό κόστος συντήρησης της υποδομής παραγωγής ενέργειας, σε συνδυασμό με τις διακυμάνσεις των παγκόσμιων τιμών ενέργειας, επηρεάζει την προσιτή τιμή των βασικών υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένης της γεωργίας.

Τέλος, το κοινωνικό κόστος της παραγωγής ενέργειας δεν μπορεί να αγνοηθεί. Οι κοινότητες που ζουν κοντά σε περιοχές εξόρυξης ή διυλιστήρια πετρελαίου αντιμετωπίζουν συχνά εκτοπισμό, προβλήματα υγείας και οικονομικές δυσκολίες λόγω της υποβάθμισης του περιβάλλοντος και της ρύπανσης. Η υπερβολική εξάρτηση από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ενισχύει τις ανισότητες, καθώς οι ευάλωτοι πληθυσμοί επηρεάζονται δυσανάλογα από τις κλιματικές επιπτώσεις και την ενεργειακή σπανιότητα. Επιπλέον, το κοινωνικό κόστος επεκτείνεται στις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι αγρότες και οι αγροτικοί εργαζόμενοι που εξαρτώνται από πρακτικές έντασης ενέργειας. Η αύξηση των τιμών της ενέργειας μπορεί να αυξήσει το κόστος παραγωγής των τροφίμων και, κατά συνέπεια, τις τιμές των τροφίμων, επιδεινώνοντας την επισιτιστική ανασφάλεια (Tol, 2023).

1.3 Κλιματική αλλαγή και καλλιέργειες φυτικών τροφίμων

Η ξηρασία, μια παρατεταμένη περίοδος ανεπαρκούς βροχόπτωσης που έχει ως αποτέλεσμα τη λειψυδρία, είναι μια από τις πιο σημαντικές περιβαλλοντικές πιέσεις που επηρεάζουν τη γεωργική παραγωγικότητα παγκοσμίως. Η κλιματική αλλαγή επιδεινώνει τη συχνότητα, την ένταση και τη διάρκεια των γεγονότων ξηρασίας, θέτοντας σοβαρές απειλές για τις φυτικές καλλιέργειες τροφίμων. Το άγχος της

ξηρασίας πυροδοτεί έναν καταρράκτη φυσιολογικών αποκρίσεων στα φυτά, που επηρεάζουν την ανάπτυξη και την παραγωγικότητά τους (Wolfson, 2017).

Η μειωμένη υγρασία του εδάφους περιορίζει την πρόσληψη νερού από τις ρίζες των φυτών, οδηγώντας σε μειωμένη διαπνοή και διαταραγμένη μεταφορά νερού και θρεπτικών ουσιών στους υπέργειους ιστούς. Αυτό οδηγεί σε μαρασμό, μειωμένη επέκταση των φύλλων και καθυστερημένη ανάπτυξη.

Για τη διατήρηση του νερού, τα φυτά κλείνουν τα στομάτιά τους, τους πόρους στις επιφάνειες των φύλλων που διευκολύνουν την ανταλλαγή αερίων. Ενώ το κλείσιμο του στομίου μειώνει την απώλεια νερού, περιορίζει επίσης την πρόσληψη διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), μειώνοντας έτσι τη φωτοσύνθεση και οδηγώντας σε μειωμένη συσσώρευση βιομάζας (Wolfson, 2017).

Το στρες εξαιτίας της ξηρασίας μειώνει τη φωτοσυνθετική απόδοση μέσω αρκετών μηχανισμών, συμπεριλαμβανομένου του στομικού κλεισίματος, της βλάβης στη φωτοσυνθετική συσκευή και της συσσώρευσης ενεργών ειδών οξυγόνου (ROS). Το αποτέλεσμα είναι η χαμηλότερη παραγωγή υδατανθράκων και τελικά η μειωμένη απόδοση των καλλιεργειών. Τα φυτά συχνά συσσωρεύουν οσμολίτες όπως η προλίνη, η γλυκίνη βεταΐνη και τα σάκχαρα για να διατηρήσουν την ώθηση των κυττάρων και να προστατεύσουν τις κυτταρικές δομές υπό συνθήκες ξηρασίας. Η οσμωτική προσαρμογή βοηθά τα φυτά να επιβιώσουν σε περιόδους έλλειψης νερού (Hoffman et al., 2021).

Οι φυτικές ορμόνες, ιδιαίτερα το αβισικό οξύ (*ABA*), παίζουν καθοριστικό ρόλο στην απόκριση στην ξηρασία. Το *ABA* συντίθεται ως απόκριση στο στρες του νερού και μεσολαβεί στο κλείσιμο του στόματος, στην οσμωτική προσαρμογή και στην ενεργοποίηση γονιδίων που ανταποκρίνονται στο στρες.

Η προσαρμογή των αγρονομικών πρακτικών είναι απαραίτητη για τον μετριασμό των επιπτώσεων της ξηρασίας στη φυτική παραγωγή (Hoffman et al., 2021):

- Τα αποτελεσματικά συστήματα άρδευσης, όπως η στάγδην άρδευση και η υποεπιφανειακή άρδευση, μπορούν να μεταφέρουν νερό απευθείας στη ζώνη της ρίζας, ελαχιστοποιώντας την απώλεια νερού μέσω της εξάτμισης και διασφαλίζοντας τη βέλτιστη απόδοση χρήσης του νερού. Ο προγραμματισμός της άρδευσης με βάση την παρακολούθηση της υγρασίας του εδάφους και τις μετεωρολογικές προβλέψεις μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω τη διαχείριση του νερού.
- Πρακτικές που βελτιώνουν τη δομή του εδάφους και τη συγκράτηση του νερού, όπως το όργωμα διατήρησης, το σάπια φύλλα και οι οργανικές τροποποιήσεις, μπορούν να ενισχύσουν τη διαθεσιμότητα υγρασίας του εδάφους και να μειώσουν το στρες λόγω ξηρασίας. Οι καλλιέργειες και η αμειψισπορά συμβάλλουν επίσης στην υγεία του εδάφους και στη διατήρηση της υγρασίας (Hoffman et al., 2021).
- Η επιλογή ποικιλιών καλλιεργειών ανθεκτικών στην ξηρασία και η εφαρμογή συστημάτων αμειψισποράς μπορεί να βοηθήσει στη διατήρηση της παραγωγικότητας υπό συνθήκες περιορισμένου νερού. Οι καλλιέργειες με βαθιές ρίζες και αυτές με μικρότερους κύκλους ανάπτυξης είναι συχνά πιο ανθεκτικές στην ξηρασία.
- Η προσαρμογή των ημερομηνιών φύτευσης για την αποφυγή κρίσιμων σταδίων ανάπτυξης κατά τις περιόδους αιχμής ξηρασίας και η βελτιστοποίηση της πυκνότητας των φυτών για τη μείωση του ανταγωνισμού για νερό μετριάξει τον αντίκτυπο της ξηρασίας.

- Η εφαρμογή οργανικών ή συνθετικών επιστρωμάτων μειώνει την εξάτμιση του εδάφους, τη θερμοκρασία του εδάφους και βελτιώνει την κατακράτηση νερού, μετριάζοντας έτσι τις επιπτώσεις της ξηρασίας (Hoffman et al., 2021).

Από την άλλη, σημειώνονται σημαντικές βροχοπτώσεις, οι παραγωγοί, οι γεωπόνοι και το προσωπικό των μέσων ενημέρωσης συχνά ρωτούν για την έκταση της ζημιάς στις καλλιέργειες που προκαλούνται από την έντονη βροχόπτωση. Δυστυχώς, οι οριστικές απαντήσεις δεν είναι άμεσα διαθέσιμες μετά τις βροχοπτώσεις (Hoffman et al., 2021).

Οι σπόροι που βλασταίνουν και οι ρίζες των φυτών απαιτούν οξυγόνο στο έδαφος για την αναπνοή. Ελλείπει οξυγόνου, αυτοί οι ζωτικοί φυτικοί ιστοί δεν μπορούν να εκτελέσουν βασικές λειτουργίες διατήρησης της ζωής, όπως η ανάπτυξη των ριζών και των βλαστών και η πρόσληψη θρεπτικών συστατικών. Σε συνθήκες πλημμύρας, το έδαφος γίνεται κορεσμένο και τα επίπεδα οξυγόνου εξαντλούνται. Όταν η συγκέντρωση οξυγόνου στο έδαφος μειώνεται σημαντικά, η αναπνοή των φυτών μετατοπίζεται σε μια οδό που μοιάζει με ζύμωση. Αν και παράγεται κάποια ενέργεια μέσω της ζύμωσης, αυτή η διαδικασία μειώνει την παραγωγή ενέργειας έως και 95%. Ουσιαστικά, τα χαμηλά επίπεδα οξυγόνου έχουν ως αποτέλεσμα σημαντικά μειωμένο μεταβολισμό, οδηγώντας δυνητικά σε μειωμένες αποδόσεις και, εάν παραταθεί, σε θάνατο των φυτών (Palovita & Jarvela, 2015).

Παράγοντες που επηρεάζουν την έκταση της ζημιάς

Στάδιο ανάπτυξης των φυτών

- Οι σπόροι που βλασταίνουν, οι οποίοι δεν έχουν ακόμη αναδυθεί, είναι επιρρεπείς σε ζημιές από πλημμύρες λόγω των αναγκών τους σε οξυγόνο

για την αναπνοή. Ο παρατεταμένος χρόνος για την εμφάνιση μετά τη βλάστηση αυξάνει την πιθανότητα απώλειας της στάμπας. Οι συνθήκες κορεσμένου εδάφους μπορεί να εμποδίσουν ή να αναστέλλουν τη βλάστηση λόγω ανεπαρκούς οξυγόνου γύρω από τον σπόρο. Οι μη βλαστημένοι σπόροι μπορούν να επιθεωρηθούν κόβοντάς τους στη μέση για να ελεγχθεί η πίεση του στροβιλισμού. Οι εξαιρετικά μαλακοί σπόροι που δεν διατηρούν τη μορφή τους είναι απίθανο να επιβιώσουν (Palovita & Jarvela, 2015).

- Τα νεαρά φυτά είναι πιο ευάλωτα σε ζημιές για δύο βασικούς λόγους. Πρώτον, το σημείο ανάπτυξης για πολλές καλλιέργειες βρίσκεται στην ή κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, γεγονός που τις καθιστά άμεσα ευαίσθητες στο στρες που έχει εξαντληθεί από το οξυγόνο. Δεύτερον, τα νεαρά φυτά εγκαθιστούν ενεργά ένα εύρωστο ριζικό σύστημα και η στέρηση οξυγόνου μπορεί να ανακόψει ή να σκοτώσει τις ρίζες, παρουσιάζοντας σημαντικό στρες στο φυτό που δεν έχει ακόμη δημιουργηθεί (Palovita & Jarvela, 2015).

Η πιθανότητα τραυματισμού των φυτών αυξάνεται με τη διάρκεια της πλημμύρας ή των συνθηκών με νερό. Αυτό είναι κρίσιμο γιατί οι επιπτώσεις του χαμηλού οξυγόνου είναι αναστρέψιμες εάν η διάρκεια είναι σύντομη. Οι εκτεταμένες περιόδους επιτρέπουν μεγαλύτερη εξάντληση οξυγόνου και συσσώρευση επιβλαβών ουσιών.

Σε συνθήκες πλημμύρας, το όριο ανοχής για τα φυτά είναι συνήθως 36 έως 48 ώρες. Οι συνθήκες ύδατος επηρεάζουν τις καλλιέργειες διαφορετικά, ανάλογα με το είδος του φυτού. Οι περισσότερες ετήσιες καλλιέργειες μπορούν να αντέξουν το στρες του νερού για 3 έως 7 ημέρες. Η ανοχή ποικίλλει μεταξύ των τύπων καλλιεργειών (Palovita & Jarvela, 2015).

Ωστόσο, συγκεκριμένες διάρκειες επιβίωσης κάτω από περίσσεια νερού δεν τεκμηριώνονται εκτενώς, καθώς άλλοι παράγοντες, όπως ο τύπος του εδάφους, η θερμοκρασία του εδάφους και η θερμοκρασία του αέρα, επηρεάζουν επίσης τις περιόδους ανοχής (Amorim & Almeida, 2024).

Η κλιματική αλλαγή παρουσιάζει πολλές άλλες σημαντικές προκλήσεις για την παραγωγή φυτικών τροφίμων πέρα από την ξηρασία και τις έντονες βροχοπτώσεις:

Αυξημένες Θερμοκρασίες

Η άνοδος της θερμοκρασίας μπορεί να στρεσάρει τα φυτά, μειώνοντας τις αποδόσεις και επηρεάζοντας την ποιότητα των προϊόντων. Το θερμικό στρες μπορεί να προκαλέσει:

- ❖ Μειωμένη επικονίαση και σύνολο σπόρων.
- ❖ Συντόμευση των περιόδων ανάπτυξης, που οδηγεί σε πρόωρη ωρίμανση και μειωμένη βιομάζα.
- ❖ Αυξημένοι ρυθμοί αναπνοής, οδηγώντας σε χαμηλότερη καθαρή φωτοσύνθεση και ανάπτυξη (Amorim & Almeida, 2024).

Αλλαγή της δυναμικής των παρασίτων και των ασθενειών

Οι υψηλότερες θερμοκρασίες και τα τροποποιημένα πρότυπα βροχοπτώσεων μπορούν να επεκτείνουν το εύρος και τον επιπολασμό των παρασίτων και των ασθενειών, συμπεριλαμβανομένων:

- ❖ *Παράσιτα εντόμων*: Οι θερμότεροι χειμώνες μπορεί να μειώσουν τη θνησιμότητα των παρασίτων, οδηγώντας σε μεγαλύτερους πληθυσμούς. Νέα παράσιτα επίσης να μεταναστεύουν σε προηγουμένως ακατάλληλες περιοχές.

- ❖ *Ασθένειες των φυτών:* Η αυξημένη υγρασία και οι υψηλότερες θερμοκρασίες ενισχύουν τον πολλαπλασιασμό μυκητιακών και βακτηριακών ασθενειών (Amorim & Almeida, 2024).

Υποβάθμιση του εδάφους

Η κλιματική αλλαγή προκαλεί επιδείνωση της υποβάθμισης του εδάφους:

- ❖ *Διάβρωση:* Η αυξημένη ένταση των βροχοπτώσεων μπορεί να οδηγήσει σε πιο σοβαρή διάβρωση του εδάφους.
- ❖ *Έκπλυση θρεπτικών ουσιών:* Οι πιο συχνές έντονες βροχοπτώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε έκπλυση βασικών θρεπτικών συστατικών του εδάφους.
- ❖ *Απώλεια οργανικής ύλης του εδάφους:* Οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν να αυξήσουν τον ρυθμό αποσύνθεσης της οργανικής ύλης του εδάφους (Amorim & Almeida, 2024).

Αλλαγή διαθεσιμότητας νερού

Οι αλλαγές στο λιώσιμο του χιονιού και ο χρόνος ροής του νερού επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα νερού για άρδευση. Οι μειωμένες συσσωρεύσεις χιονιού και η πρόωγη τήξη του χιονιού είναι αιτίες της έλλειψης νερού κατά των κρίσιμων περιόδων ανάπτυξης (Jordan, 2023).

Άνοδος της στάθμης της θάλασσας και αλάτωση

Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας οδηγεί σε διείσδυση αλμυρού νερού σε παράκτια συστήματα γλυκού νερού και γεωργικές εκτάσεις, επηρεάζοντας την παραγωγικότητα των καλλιεργειών:

- ❖ *Αλατοποίηση εδαφών*: Η αυξημένη αλατότητα του εδάφους εμποδίζει την ανάπτυξη των φυτών και μειώνει τις αποδόσεις.
- ❖ *Πλημμύρες αγροτικών περιοχών χαμηλής στάθμης*: Οι παράκτιες γεωργικές περιοχές δύναται ορισμένες φορές να πλημμυρίσουν, καθιστώντας τις ακατάλληλες για καλλιέργεια (Jordan, 2023).

Αυξημένη συχνότητα ακραίων καιρικών φαινομένων

Τα πιο συχνά και σοβαρά ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως οι τυφώνες, οι κυκλώνες και οι χαλαζοπτώσεις, βλάπτουν άμεσα τις καλλιέργειες και τις υποδομές, οδηγώντας σε σημαντικές απώλειες (Reichle, 2019).

Συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα

Ενώ τα αυξημένα επίπεδα CO₂ διεγείρουν τη φωτοσύνθεση (το λεγόμενο φαινόμενο γονιμοποίησης CO₂), τα οφέλη μπορεί να αντισταθμιστούν από:

- ❖ *Αραίωση θρεπτικών συστατικών*: Τα υψηλότερα επίπεδα CO₂ είναι υπεύθυνα για τη μείωση της συγκέντρωσης βασικών θρεπτικών συστατικών στις καλλιέργειες, όπως πρωτεΐνες, σίδηρος και ψευδάργυρος.
- ❖ *Αποδοτικότητα χρήσης νερού*: Παρόλο που ορισμένα φυτά χρησιμοποιούν το νερό πιο αποτελεσματικά υπό υψηλότερο CO₂, ο συνολικός αντίκτυπος στην απόδοση της καλλιέργειας είναι πολύπλοκος και ποικίλλει ανάλογα με το είδος και τις συνθήκες ανάπτυξης (Reichle, 2019).

Φαινολογικές Μετατοπίσεις

Οι αλλαγές στη θερμοκρασία και τα πρότυπα βροχόπτωσης αλλάζουν το χρονοδιάγραμμα των βασικών σταδίων ανάπτυξης των φυτών (φαινολογία), όπως η ανθοφορία και η καρποφορία, οδηγώντας δυνητικά σε:

- ❖ *Αναντιστοιχίες με επικονιαστές*: Οι τροποποιημένοι χρόνοι ανθοφορίας ορισμένες φορές δε συμπίπτουν με τη δραστηριότητα των επικονιαστών.
- ❖ *Ζητήματα χρονισμού συγκομιδής*: Οι αλλαγές στο χρονοδιάγραμμα ωρίμανσης της καλλιέργειας είναι αιτίες διατάραξης των χρονοδιαγραμμάτων συγκομιδής, καθώς επίσης και ένας από τους λόγους που επηρεάζουν η ποιότητα της απόδοσης (Reichle, 2019).

Ρύπανση από το όζον

Η κλιματική αλλαγή αυξάνει τη συγκέντρωση του όζοντος στο επίπεδο του εδάφους, το οποίο είναι επιβλαβές για πολλές καλλιέργειες. Το όζον είναι υπεύθυνο για τα εξής:

- ❖ *Βλάβη στα φύλλα*: Ορατός τραυματισμός στα φύλλα, μειώνοντας τη φωτοσυνθετική ικανότητα.
- ❖ *Μειωμένες αποδόσεις*: Μειωμένη συνολική υγεία και παραγωγικότητα των φυτών (Reichle, 2019).

Απώλεια Βιοποικιλότητας

Η κλιματική αλλαγή συχνά οδηγεί σε απώλεια της βιοποικιλότητας, συμπεριλαμβανομένων των ωφέλιμων εντόμων, των οργανισμών του εδάφους και άλλων ειδών που υποστηρίζουν τα γεωργικά συστήματα (Yadav et al., 2018):

- ❖ Οι μειωμένοι πληθυσμοί μελισσών και άλλων επικονιαστών επηρεάζουν αρνητικά την επικονίαση και τις αποδόσεις των καλλιεργειών.

- ❖ Οι αλλαγές στη θερμοκρασία και την υγρασία του εδάφους επηρεάζουν επίσης τα ωφέλιμα μικρόβια του εδάφους που είναι σημαντικά για τον κύκλο των θρεπτικών συστατικών (Yadav et al., 2018).

Αυτές οι πρόσθετες προκλήσεις που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή υπογραμμίζουν την ανάγκη για ολοκληρωμένες στρατηγικές προσαρμογής στη γεωργία για τη διασφάλιση της επισιτιστικής ασφάλειας ενόψει ενός μεταβαλλόμενου κλίματος.

1.4 Αύξηση παθογόνων μικροοργανισμών

Η αλλαγή του κλίματος είναι αναμφισβήτητο το κύριο μέλημα του 21ου αιώνα, επηρεάζοντας βαθιά όχι μόνο τις καιρικές συνθήκες που βιώνουν οι άνθρωποι, αλλά και την ποιότητα του αέρα που αναπνέουν, το νερό που πίνουν, τα τρόφιμα που καταναλώνουν, ακόμη και την καταλληλότητα για κατοίκηση ορισμένων περιοχών. Η συχνότητα και η ένταση των ακραίων καιρικών φαινομένων έχουν αυξηθεί τις τελευταίες δεκαετίες, με πολλά ρεκόρ να καταρρίπτονται. Το 2021, περισσότεροι από 400 μετεωρολογικοί σταθμοί παγκοσμίως κατέγραψαν πρωτοφανή επίπεδα θερμότητας, συμπεριλαμβανομένων κορυφών 48,8°C στην Ιταλία (20 Ιουλίου), 49,6°C στον Καναδά (29 Ιουνίου) και 54,4°C στις ΗΠΑ (9 Ιουλίου).

Η παγκόσμια ετήσια θερμοκρασία αυξήθηκε κατά μέσο όρο 0,08°C ανά δεκαετία από το 1880 έως το 1981, φτάνοντας στο μέγιστο το 2021 με θερμοκρασία 0,84°C πάνω από τον μέσο όρο του 20^{ου} αιώνα, όπως αναφέρεται στην «Ετήσια Έκθεση για το Κλίμα 2021» της NOAA. Οι προβλέψεις δείχνουν ότι η μέση ετήσια βροχόπτωση θα μειωθεί στη νότια Ευρώπη και θα αυξηθεί στη βόρεια Ευρώπη, με αποτέλεσμα θερμότερα και ξηρότερα κλίματα στη νότια και κεντρική Ευρώπη κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι. Κατά συνέπεια, η πιθανότητα ακραίων καιρικών φαινομένων όπως καύσωνες, έντονες

βροχοπτώσεις και παρατεταμένες ξηρασίες αναμένεται να αυξηθεί λόγω της κλιματικής αλλαγής (Sobel & Tippet, 2018).

Οι απαρχές της κλιματικής αλλαγής είναι τόσο φυσικές (π.χ. μετατοπίσεις στο μαγνητικό πεδίο της Γης) όσο και ανθρωπογενείς (π.χ. εκπομπές μεθανίου και άνθρακα). Το φαινόμενο περιγράφηκε για πρώτη φορά το 1824 από τον Γάλλο φυσικό Ζοζέφ Φουριέ, αλλά ο όρος «θέρμανση του πλανήτη» έγινε δημοφιλής από τον Wallace Broecker το 1975. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), που ιδρύθηκε το 1991, έχει έκτοτε καθοριστικό ρόλο στη σύνταξη και την αξιολόγηση των στοιχείων που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή. Οριζόμενη ως η μακροπρόθεσμη μεταβολή της θερμοκρασίας και των τυπικών καιρικών μοτίβων, η κλιματική αλλαγή περιλαμβάνει διακυμάνσεις στη θερμοκρασία, τη βροχόπτωση και τα μοτίβα ανέμου, μεταξύ άλλων. Αυτές οι αλλαγές αποτελούν σημαντικές απειλές για τη βιοποικιλότητα και τη ζωή στη Γη. Αν και οι επιπτώσεις στα φυτικά και ζωικά είδη έχουν μελετηθεί και τεκμηριωθεί εκτενώς, οι επιπτώσεις στους μικροοργανισμούς συχνά παραβλέπονται (Sobel & Tippet, 2018).

Οι μικροοργανισμοί, που υπάρχουν εδώ και τουλάχιστον 3,5 δισεκατομμύρια χρόνια, έχουν κύρια σημασία για τη διατήρηση υγιών οικοσυστημάτων λόγω του ρόλου τους στους κύκλους θρεπτικών συστατικών (όπως ο άνθρακας και το άζωτο) και η επιρροή τους στην υγεία των φυτών, των ζώων και του ανθρώπου. Συμβάλλουν σημαντικά στις γεωργικές αποδόσεις και την επισιτιστική ασφάλεια. Η κλιματική αλλαγή, με την επιδείνωση των εποχιακών διαταραχών και την αύξηση της συχνότητας των ακραίων γεγονότων, είναι πιθανό να επηρεάσει τη μικροβιακή βιοποικιλότητα με εκτεταμένες συνέπειες (Cavicchioli et al., 2019).

Μια σημαντική επίδραση της κλιματικής αλλαγής στους μικροοργανισμούς είναι η γεωγραφική εξάπλωση των ζωικών και φυτικών παθογόνων, που διευκολύνεται από

την υπερθέρμανση του πλανήτη. Ωστόσο, η αλληλεπίδραση μεταξύ των μικροοργανισμών και της κλιματικής αλλαγής είναι αμφίδρομη. Οι μικροοργανισμοί επηρεάζουν την κλιματική αλλαγή μέσω του ρόλου τους στην παραγωγή και κατανάλωση αερίων θερμοκηπίου (GHG) και μπορούν επίσης να λειτουργήσουν ως παράγοντες μετριασμού. Η βιοποικιλότητά τους επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές αλλαγές, υπογραμμίζοντας τον κρίσιμο ρόλο τους τόσο στην επιδείνωση όσο και στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής (Cavicchioli et al., 2019).

Η οικολογία επιδιώκει να αποσαφηνίσει τους μηχανισμούς πίσω από τη δημιουργία και τη διατήρηση της βιοποικιλότητας σε χρονικές και χωρικές κλίμακες, με το κλίμα να είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει τις δομές, τις αλληλεπιδράσεις και τις λειτουργίες της κοινότητας. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους κατοίκους των οικοσυστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των μικροοργανισμών, αναμένεται να είναι ουσιαστικές και πολύπλευρες, αν και η ποσοτικοποίηση παραμένει πρόκληση.

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις μικροβιακές κοινότητες τόσο στο χερσαίο όσο και στο υδάτινο περιβάλλον είναι περίπλοκες και περιστασιακά αντιφατικές, με ντετερμινιστικές και στοχαστικές επιρροές. Οι αλλαγές θερμοκρασίας, ειδικότερα, επηρεάζουν τη μικροβιακή βιοποικιλότητα σε πολλαπλά επίπεδα, συμπεριλαμβανομένου του γεωγραφικού εύρους, της φαινολογίας, της κατανομής και της αφθονίας. Καθώς οι θερμοκρασίες αυξάνονται, ο μικροβιακός μεταβολισμός, οι ρυθμοί αύξησης του πληθυσμού και ο αριθμός των ειδών γενικά αυξάνονται. Για παράδειγμα, η ποικιλότητα των βακτηρίων και των μυκήτων τείνει να μειώνεται με μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη καθώς πέφτουν οι θερμοκρασίες (Zhou et al., 2016).

Ένας πρωταρχικός μηχανισμός μέσω του οποίου η θερμοκρασία επηρεάζει τη μικροβιακή βιοποικιλότητα είναι η επιτάχυνση των μεταβολικών ρυθμών, ο οποίος με τη σειρά του αυξάνει τους χρόνους διπλασιασμού του πληθυσμού και τους ρυθμούς

οικολογικών και εξελικτικών διεργασιών όπως η μετάλλαξη, η ειδογένεση και οι αλληλεπιδράσεις. Κατά συνέπεια, τα θερμαινόμενα οικοσυστήματα, από τα τροπικά έως τα αλπικά δάση, αναμένεται να γίνουν πιο διαφορετικά και ενεργά, ενισχύοντας πιθανώς διαδικασίες όπως η αποσύνθεση, ο κύκλος των θρεπτικών ουσιών και η δέσμευση άνθρακα. Ωστόσο, οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν επίσης να λειτουργήσουν ως ντετερμινιστικό φίλτρο, ευνοώντας τους καλά προσαρμοσμένους μικροοργανισμούς και περιορίζοντας τη στοχαστική μετατόπιση και τη διασπορά των ειδών, γεγονός που μπορεί να μειώσει τους χρονικούς ρυθμούς κλιμάκωσης των μικροβιακών κοινοτήτων του εδάφους. Επιπλέον, οι μικροβιακές αποκρίσεις στην κλιματική αλλαγή εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις μικροβιακές γενεαλογίες και τις λειτουργικές ομάδες.

Οι αυξημένες θερμοκρασίες προάγουν επίσης τη φυτική ποικιλότητα, η οποία με τη σειρά της κατανέμει περισσότερα θρεπτικά συστατικά στα υπόγεια οικοσυστήματα, συσχετίζοντας τον πλούτο των μικροβιακών ταξινομικών κατηγοριών με την ποικιλότητα των φυτικών ειδών (Zhou et al., 2016).

Οι μικροοργανισμοί είναι βασικοί παράγοντες στην παραγωγή και κατανάλωση των τριών πρωτογενών αερίων θερμοκηπίου (GHGs) που προκαλούν το 98% της υπερθέρμανσης του πλανήτη: διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), μεθάνιο (CH₄) και οξείδιο του αζώτου (N₂O). Συμμετέχουν στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα εξάγοντας άνθρακα από μη ζωντανές πηγές και καθιστώντας τον διαθέσιμο σε άλλους οργανισμούς, κυρίως μέσω της δέσμευσης άνθρακα από το ατμοσφαιρικό CO₂. Η φωτοσύνθεση, αν και σχετίζεται κυρίως με φυτά, εκτελείται σημαντικά από το θαλάσσιο φυτοπλαγκτόν, όπως το *Vicicitus* spp. και *Emiliania huxleyi*, που συνεισφέρουν στο ήμισυ της παγκόσμιας φωτοσυνθετικής ενσωμάτωσης CO₂ παρόλο

που αντιπροσωπεύουν μόνο το 1% της φωτοσυνθετικής βιομάζας (Vicuña & González, 2021).

Το μεθάνιο, ένας απλός υδρογονάνθρακας περίπου 30 φορές πιο επιδραστικός από το CO₂ ως GHG, παράγεται κυρίως από μικρόβια (70-90% του συνολικού μεθανίου) μέσω φυσικών διεργασιών και ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Οι ανθρωπογενείς πηγές μεθανίου περιλαμβάνουν γεωργικές πρακτικές (π.χ. η πέψη των μηρυκαστικών που διευκολύνεται από μεθανογόνα αρχαία, ορυζώνες), χωματερές, ανθρακωρυχεία και παραγωγή φυσικού αερίου. Οι φυσικές πηγές περιλαμβάνουν ανοξικά ιζήματα, υγροτόπους, φωλιές τερμιτών και εδάφη. Οι μικροοργανισμοί που καταναλώνουν μεθάνιο ή οι μεθανότροφοι είναι απαραίτητοι για τη διατήρηση της παγκόσμιας ισορροπίας μεθανίου, χρησιμοποιώντας το μεθάνιο ως πηγή ενέργειας. Τα εξέχοντα μεθανότροφα περιλαμβάνουν γένη όπως το *Methylococcus* και το *Methylobacter* (Vicuña & González, 2021).

Το άζωτο, που αποτελεί περίπου το 78% της ατμόσφαιρας, υπάρχει σε διάφορες μορφές, συμπεριλαμβανομένων των NH₃, NO και N₂O, με το N₂ να είναι το πιο διαδεδομένο. Ωστόσο, το N₂ δεν είναι άμεσα προσβάσιμο σε φυτά και ζώα και εισέρχεται στη βιόσφαιρα μέσω βιολογικής στερέωσης από βακτήρια όπως το *Azotobacter*, το *Beijerinckia*, το *Clostridium* ή το *Rhizobium* και τα γαλαζοπράσινα φύκια. Αξίζει να σημειωθεί ότι η δέσμευση του θαλάσσιου αζώτου υπερβαίνει την επίγεια δέσμευση αζώτου κατά 30%.

Οι κλιματικές διακυμάνσεις, συμπεριλαμβανομένων των αυξήσεων της θερμοκρασίας, της αστάθειας των βροχοπτώσεων, της υποχώρησης των παγετώνων και των ακραίων καιρικών φαινομένων, έχουν σημαντικές και προβλέψιμες επιπτώσεις σε διάφορους κλάδους. Αυτές οι επιπτώσεις κυμαίνονται από τεχνικά ζητήματα, όπως διακοπές παροχής ρεύματος, έως σοβαρότερα προβλήματα σε πρωτογενείς τομείς όπως

η γεωργία, η δασοκομία, η κτηνοτροφία και η εμπορική αλιεία. Αυτοί οι τομείς, τεράστιας οικονομικής σημασίας, παρουσίασαν παγκόσμια αύξηση αξίας 73% μεταξύ 2000 και 2019, φθάνοντας τα 3,5 τρισεκατομμύρια δολάρια το 2018 (Vicuña & González, 2021).

Επί του παρόντος, τόσο οι αγρότες όσο και οι επιστήμονες εστιάζουν όλο και περισσότερο στη χρήση βιολιπασμάτων και φιλικών προς το περιβάλλον πρακτικών οργώματος για την προστασία της υγείας του εδάφους, τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και τη βελτίωση της δέσμευσης άνθρακα. Ωστόσο, η αύξηση των επιδημιών ασθενειών και η γεωγραφική εξάπλωση διαφόρων παθογόνων παραγόντων αμφισβητεί την ισορροπία μεταξύ βιώσιμων πρακτικών και μετριασμού των νέων κινδύνων που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή.

Οι μικροοργανισμοί διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο σε αυτές τις διαδικασίες, επηρεάζοντας την υγεία του εδάφους, τη δυναμική των ασθενειών και την περιβαλλοντική ανθεκτικότητα. Παρακάτω ακολουθεί μια λεπτομερής εξέταση της συμμετοχής τους στον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και στη διατήρηση φιλικών προς το περιβάλλον γεωργικών πρακτικών (Mangodo et al., 2020).

Βιολιπάσματα και υγεία του εδάφους: Οι μικροοργανισμοί, ιδιαίτερα τα ωφέλιμα βακτήρια και οι μύκητες, αποτελούν αναπόσπαστα συστατικά των βιολιπασμάτων. Αυτά τα βιολιπάσματα ενισχύουν τη διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών, προάγουν την ανάπτυξη των φυτών και βελτιώνουν τη δομή του εδάφους. Για παράδειγμα, τα βακτήρια *Rhizobium* διευκολύνουν τη δέσμευση αζώτου στα όσπρια, ενώ οι μυκόρριζοι μύκητες ενισχύουν την πρόσληψη φωσφόρου στα φυτά. Βελτιώνοντας τον κύκλο των θρεπτικών ουσιών και τη γονιμότητα του εδάφους, αυτοί οι μικροοργανισμοί μειώνουν την ανάγκη για χημικά λιπάσματα, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές GHG που σχετίζονται με την παραγωγή και τη χρήση λιπασμάτων.

Δέσμευση άνθρακα: Οι μικροοργανισμοί του εδάφους διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη δέσμευση άνθρακα με την αποσύνθεση της οργανικής ύλης και τη σταθεροποίηση του άνθρακα του εδάφους. Οι διαδικασίες αποσύνθεσης, που πραγματοποιούνται από βακτήρια και μύκητες, μετατρέπουν τα οργανικά υλικά σε σταθερό οργανικό άνθρακα του εδάφους, ο οποίος μπορεί να αποθηκευτεί στο έδαφος για παρατεταμένες περιόδους. Πρακτικές που προάγουν τη μικροβιακή δραστηριότητα, όπως η μειωμένη άρση και οι οργανικές τροποποιήσεις, ενισχύουν την αποθήκευση άνθρακα στο έδαφος και μετριάζουν την κλιματική αλλαγή (Mangodo et al., 2020).

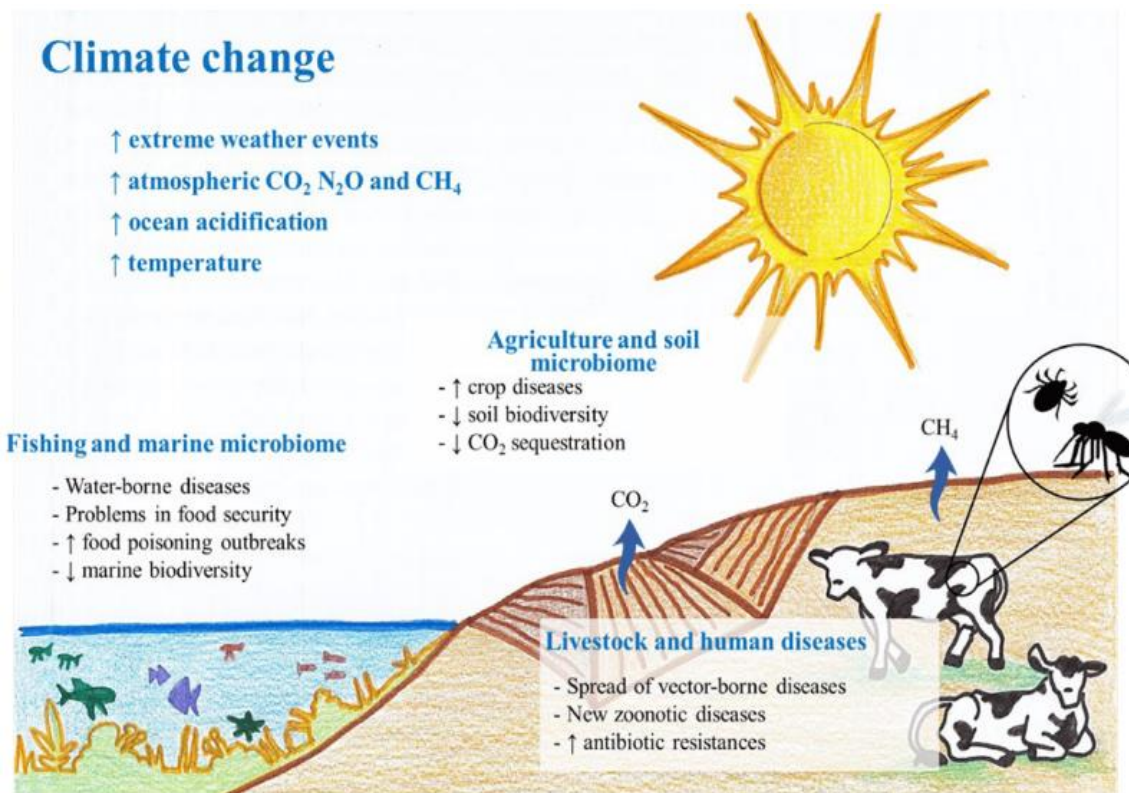
Διαχείριση ασθενειών: Η αύξηση των κρουσμάτων ασθενειών που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή αποτελεί σημαντική απειλή για τη γεωργία. Οι μικροοργανισμοί μπορούν να δράσουν ως παράγοντες βιοελέγχου, καταστέλλοντας τα φυτικά παθογόνα και μειώνοντας την εξάρτηση από χημικά φυτοφάρμακα. Για παράδειγμα, ορισμένα στελέχη *Bacillus* και *Trichoderma* έχουν αποδειχθεί ότι καταπολεμούν αποτελεσματικά τις ασθένειες που μεταδίδονται στο έδαφος. Ωστόσο, η κλιματική αλλαγή μπορεί επίσης να αλλάξει τη δυναμική των παθογόνων, οδηγώντας δυνητικά σε νέες προκλήσεις στη διαχείριση ασθενειών.

Προσαρμογή στο Κλιματικό Στρες: Οι μικροβιακές κοινότητες μπορούν να βοηθήσουν τα φυτά να προσαρμοστούν σε στρεσογόνους παράγοντες όπως η ξηρασία και η ζέστη. Τα ενδοφυτικά βακτήρια και οι μύκητες, που ζουν στους φυτικούς ιστούς, έχουν τη δυνατότητα να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα των φυτών παράγοντας ορμόνες που σχετίζονται με το στρες και βελτιώνοντας την πρόσληψη νερού και θρεπτικών συστατικών. Για παράδειγμα, ο ενδοφυτικός μύκητας *Piriformospora indica* έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει την ανοχή των φυτών στην ξηρασία και την αλατότητα (Mangodo et al., 2020).

Βιώσιμη Διαχείριση Κτηνοτροφίας: Οι μικροοργανισμοί στο έντερο των μηρυκαστικών παίζουν ρόλο στην παραγωγή μεθανίου, ενός ισχυρού αερίου του θερμοκηπίου. Οι στρατηγικές χειραγώγησης αυτών των μικροβιακών κοινοτήτων, όπως οι διατροφικές παρεμβάσεις και η χρήση προβιοτικών, μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές μεθανίου από τα ζώα. Επιπλέον, η κομποστοποίηση και η αναερόβια χώνευση της κοπριάς από μικρόβια είναι σε θέση να ελαχιστοποιήσουν τις εκπομπές GHG από τα ζωικά απόβλητα.

Δασικές υπηρεσίες και υπηρεσίες οικοσυστήματος: Οι μικροοργανισμοί είναι απαραίτητοι για τον κύκλο των θρεπτικών συστατικών και την αποσύνθεση στα δασικά οικοσυστήματα. Βοηθούν στη διατήρηση της υγείας και της παραγωγικότητας των δασών, που είναι κρίσιμα για τη δέσμευση του άνθρακα και τη ρύθμιση του κλίματος. Οι αλλαγές στη θερμοκρασία και τα πρότυπα βροχόπτωσης επηρεάζουν τη μικροβιακή δραστηριότητα και τη σύνθεση στα δάση, επηρεάζοντας παράλληλα την ικανότητά τους να δεσμεύουν άνθρακα και να υποστηρίζουν τη βιοποικιλότητα (Mangodo et al., 2020).

Οι κύριες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους μικροοργανισμούς φαίνονται στην **Εικόνα 1**.



Εικόνα 1: Κύριες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους μικροοργανισμούς: (i) επέκταση και αύξηση των υδατογενών ασθενειών που προσβάλλουν τα ψάρια και τα οστρακοειδή και προκαλούν αύξηση των εστιών τροφικής δηλητηρίασης και απώλεια της θαλάσσιας βιοποικιλότητας. (ii) επέκταση και εντατικοποίηση των παθογόνων μυκητιασικών λοιμώξεων σε καλλιέργειες σε όλο τον κόσμο· και (iii) εστίες ασθενειών των ζώων, εμφάνιση νέων ζωονοσογόνων νόσων και αύξηση της αντοχής στα αντιβιοτικά.

1.5 Επιπτώσεις στην υγεία των καταναλωτών και του περιβάλλοντος

Ο πολλαπλασιασμός των παθογόνων μικροοργανισμών λόγω της κλιματικής αλλαγής εγκυμονεί σημαντικούς κινδύνους για την υγεία των καταναλωτών, επηρεάζοντας τον άνθρωπο, τα ζώα και τα οικοσυστήματα. Οι κίνδυνοι αυτοί, προέρχονται από άμεσες λοιμώξεις, τροφιμογενείς ασθένειες και έμμεσες επιπτώσεις στη διατροφική ποιότητα και την ασφάλεια των τροφίμων.

Όσον αφορά την υγεία των ανθρώπων, οι κύριες επιπτώσεις είναι πολυάριθμες. Πρώτον, οι αυξήσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για την αύξηση των τροφιμογενών παθογόνων όπως *Salmonella* spp., *Escherichia coli* και *Listeria monocytogenes*. Αυτά τα βακτήρια μπορούν να μολύνουν τις καλλιέργειες, οδηγώντας σε κρούσματα τροφιμογενών ασθενειών που χαρακτηρίζονται από συμπτώματα όπως γαστρεντερική δυσφορία, πυρετό και σε σοβαρές περιπτώσεις νοσηλεία ή θάνατο (Sebo, 2022).

Επιπλέον, οι μυκοτοξίνες, τοξικοί μεταβολίτες που παράγονται από μύκητες όπως ο *Aspergillus* και το *Fusarium*, ενέχουν σοβαρούς κινδύνους για την υγεία. Οι αφλατοξίνες και οι φουμονισίνες, για παράδειγμα, είναι ισχυρές καρκινογόνες ουσίες και μπορούν να προκαλέσουν ηπατική βλάβη, καταστολή του ανοσοποιητικού και αναπτυξιακά προβλήματα στα παιδιά. Οι κλιματικές συνθήκες που ευνοούν την ανάπτυξη μυκήτων και την παραγωγή μυκοτοξινών αυξάνουν την πιθανότητα μολυσμένων τροφίμων να εισέλθουν στην ανθρώπινη τροφική αλυσίδα.

Το άγχος που προκαλείται από το κλίμα στις καλλιέργειες μπορεί να αλλάξει τη θρεπτική τους σύνθεση, οδηγώντας ενδεχομένως σε ελλείψεις σε βασικά θρεπτικά συστατικά. Για παράδειγμα, υψηλότερα επίπεδα CO₂ μπορούν να μειώσουν την περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες, ψευδάργυρο και σίδηρο σε βασικές καλλιέργειες όπως το σιτάρι και το ρύζι, επιδεινώνοντας τον υποσιτισμό σε ευάλωτους πληθυσμούς (Sebo, 2022).

Οι αλλαγές στο κλίμα επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις αλλεργιογόνες ιδιότητες των φυτών. Παραδείγματος χάριν, τα αυξημένα επίπεδα CO₂ ενισχύουν την παραγωγή γύρης, επιδεινώνοντας αναπνευστικές αλλεργίες όπως το άσθμα και ο αλλεργικός πυρετός.

Από την άλλη, η κλιματική αλλαγή έχει σοβαρές επιπτώσεις και στην υγεία των ζώων. Οι βασικότερες, είναι οι κάτωθι:

- Η κλιματική αλλαγή ενισχύει την εξάπλωση των παθογόνων παραγόντων που επηρεάζουν τα ζώα, όπως η βρουκέλλα (που προκαλεί βρουκέλλωση), το *Mycobacterium bovis* (προκαλεί φυματίωση των βοοειδών) και διάφορες παρασιτικές λοιμώξεις. Οι αυξημένες θερμοκρασίες και η αλλαγή της βροχόπτωσης δημιουργούν αρκετές φορές ευνοϊκές συνθήκες για φορείς όπως τα τσιμπούρια και τα κουνούπια, οδηγώντας στην εξάπλωση ασθενειών όπως ο καταρροϊκός πυρετός και ο πυρετός της κοιλάδας Rift (Sebo, 2022).
- Τα ζώα που καταναλώνουν ζωοτροφές μολυσμένες με μυκοτοξίνες υποφέρουν από μια σειρά προβλημάτων υγείας, όπως μειωμένους ρυθμούς ανάπτυξης, αναπαραγωγικά προβλήματα, ηπατική και νεφρική βλάβη και ανοσοκαταστολή. Κάτι τέτοιο δεν επηρεάζει μόνο την υγεία και την παραγωγικότητα των ζώων, αλλά οδηγεί επίσης στη μεταφορά τοξινών σε προϊόντα ζωικής προέλευσης όπως το γάλα, το κρέας και τα αυγά, θέτοντας κινδύνους για τους καταναλωτές.
- Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει επίσης τα υδάτινα οικοσυστήματα, προάγοντας την ανάπτυξη επιβλαβών ανθέων φυκιών που παράγουν τοξίνες που επηρεάζουν τα ψάρια και τα οστρακοειδή. Η κατανάλωση μολυσμένων θαλασσινών δύναται να οδηγήσει ορισμένες φορές σε τροφική δηλητηρίαση και άλλα προβλήματα υγείας σε ανθρώπους και ζώα (Sebo, 2022).

Εκτός της υγείας των καταναλωτών και των ζώων, η κλιματική αλλαγή αποφέρει ευρύτερες επιπτώσεις στο οικοσύστημα και στην επισιτιστική ασφάλεια, ορισμένες από τις οποίες είναι οι παρακάτω (Manning, 2020):

- *Ανισορροπία στο οικοσύστημα:* Η εξάπλωση παθογόνων μικροοργανισμών διαταράσσει τα φυσικά οικοσυστήματα, επηρεάζοντας τη βιοποικιλότητα και τη λειτουργία των οικολογικών δικτύων. Οι ασθένειες των φυτών έχουν τη δύναμη να αποδεκατίσουν πληθυσμούς άγριων φυτών, αλλάζοντας τα ενδιαιτήματα και τις πηγές τροφής για διάφορα είδη ζώων (Manning, 2020).
- *Ασφάλεια τροφίμων:* Ο πολλαπλασιασμός των παθογόνων που προκαλείται από την κλιματική αλλαγή έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές απώλειες καλλιεργειών, μειώνοντας τη διαθεσιμότητα τροφίμων και αυξάνοντας τις τιμές. Κάτι σαν κι αυτό μπορεί να επιδεινώσει την επισιτιστική ανασφάλεια, ιδιαίτερα σε περιοχές που είναι ήδη ευάλωτες στην κλιματική μεταβλητότητα. Ο υποσιτισμός και η πείνα έχουν κλιμακωτές επιπτώσεις στην υγεία, ενώ παράλληλα αυξάνουν την ευαισθησία σε ασθένειες και μειώνουν τη συνολική ποιότητα ζωής των πασχόντων οργανισμών (Manning, 2020).
- *Μικροβιακή αντοχή:* Η αυξημένη χρήση φυτοφαρμάκων και αντιβιοτικών για την καταπολέμηση των εστιών παθογόνων που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή συμβάλει στην ανάπτυξη μικροβιακής αντοχής (AMR). Η AMR αποτελεί κρίσιμη απειλή τόσο για την υγεία των ανθρώπων όσο και για τα ζώα, καθιστώντας τις λοιμώξεις πιο δύσκολες στη θεραπεία και αυξάνοντας τον κίνδυνο εξάπλωσης της νόσου (Manning, 2020).

1.6 Σκοπός της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η συλλογή, η σύνθεση και η κριτική ανάλυση επιστημονικών μελετών που έχουν διεξαχθεί σχετικά με τον αντίκτυπο της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή φυτικών τροφίμων. Εξετάζοντας

μια ολοκληρωμένη σειρά ερευνητικών ευρημάτων, η διατριβή στοχεύει να καταλήξει σε μια ολοκληρωμένη κατανόηση του πώς η κλιματική αλλαγή επηρεάζει τις αποδόσεις των καλλιεργειών, τη δυναμική των παθογόνων και την ασφάλεια των τροφίμων. Επιπλέον, η παρούσα μελέτη θα διερευνήσει τις φυσιολογικές και αγρονομικές αποκρίσεις των καλλιεργειών σε στρεσογόνους παράγοντες που προκαλούνται από το κλίμα, όπως η ξηρασία και οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, θα συγκεντρωθούν και θα συνδυαστούν δεδομένα από επιστημονικά άρθρα με κριτές, μελέτες περιπτώσεων και αναφορές που σχετίζονται με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή φυτικών τροφίμων. Τα ευρήματα θα συνοψιστούν και θα αξιολογηθούν για τον εντοπισμό τάσεων, προτύπων και κενών στην τρέχουσα γνώση, που περιλαμβάνει στατιστική ανάλυση και συγκριτικές μελέτες για την κατανόηση των περιφερειακών και παγκόσμιων επιπτώσεων. Η διατριβή θα χρησιμοποιήσει επίσης περιπτωσιολογικές μελέτες και εμπειρικά δεδομένα για την απεικόνιση συγκεκριμένων περιπτώσεων επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή καλλιεργειών και τον πολλαπλασιασμό των παθογόνων παραγόντων.

Κεφάλαιο 2. Υλικά και Μέθοδοι

2.1 Συλλογή δεδομένων

Οι πληροφορίες για την παρούσα διατριβή συλλέχθηκαν από τη βάση δεδομένων Google Scholar, με εστίαση σε 35 επιστημονικά άρθρα που δημοσιεύτηκαν σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά που ευρετηριάστηκαν από το ScienceDirect, Elsevier και το IEEE. Για την εύρεση σχετικών άρθρων, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες λέξεις-κλειδιά: «κλιματική αλλαγή», «παραγωγή φυτών τροφίμων», «απόδοση καλλιεργειών», «επιπτώσεις στην υγεία των καταναλωτών», «αγροτική βιωσιμότητα»,

«στρές ξηρασίας», «διατροφική ασφάλεια» και «μετα- ανάλυση." Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αφορούν τις φυσιολογικές αντιδράσεις των καλλιεργειών στο κλιματικό στρες, την επίδραση παθογόνων και παρασίτων στη γεωργική παραγωγικότητα και τις ευρύτερες επιπτώσεις για την ασφάλεια και την ασφάλεια των τροφίμων. Συνολικά 70 εργασίες και διατριβές εξετάστηκαν αρχικά, αλλά η τελική επιλογή επικεντρώθηκε στις 35 πιο σχετικές μελέτες που παρείχαν ολοκληρωμένες γνώσεις για αυτά τα ζητήματα.

Η τελική επιλογή των άρθρων έγινε με βάση τη συνάφεια, την ποιότητά τους και την ευθυγράμμισή τους με τα κύρια θέματα αυτής της διατριβής. Τα άρθρα επιλέχθηκαν επειδή δημοσιεύτηκαν σε καθιερωμένα περιοδικά, διασφαλίζοντας ότι η έρευνα ήταν επιστημονικά αξιόπιστη και υψηλής ακαδημαϊκής αυστηρότητας.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας για την επιλογή αυτών των άρθρων ήταν η εστίασή τους στα βασικά θέματα της διατριβής, όπως η κλιματική αλλαγή, οι αποδόσεις των καλλιεργειών, η εξάπλωση των παθογόνων παραγόντων και οι διάφορες επιπτώσεις που δύναται να εμφανιστούν στους ανθρώπους εξαιτίας της κατανάλωσης όχι τόσο ασφαλών προϊόντων. Οι μελέτες επιλέχθηκαν για την ικανότητά τους να παρέχουν συγκεκριμένες και λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με το πώς η κλιματική αλλαγή επηρεάζει τη γεωργία, βοηθώντας στο να απαντηθούν τα κεντρικά ερευνητικά ερωτήματα της διατριβής.

Επιπλέον, οι επιλεγμένες μελέτες ήταν πρόσφατες και συναφείς παγκοσμίως, καλύπτοντας μια σειρά από γεωγραφικές περιοχές που επηρεάζονται από την κλιματική αλλαγή. Όλο αυτό εξασφάλισε ότι η έρευνα δεν ήταν μόνο ενημερωμένη αλλά και αντικατοπτρίζει τις ποικίλες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι διάφορες περιοχές όσον αφορά τη διατήρηση της γεωργικής παραγωγικότητας και της επισιτιστικής ασφάλειας υπό μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.

2.2 Στατιστική ανάλυση

Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων της έρευνας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση υπολογιστικών φύλλων Excel. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τις επιλεγμένες έρευνες οργανώθηκαν και υποβλήθηκαν σε επεξεργασία για τον εντοπισμό προτύπων και τάσεων που σχετίζονται με τον αντίκτυπο της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή φυτικών τροφίμων και μετέπειτα στις επιπτώσεις πάνω στην υγεία των καταναλωτών. Το Excel χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία γραφημάτων και πινάκων για την οπτική αναπαράσταση των ευρημάτων, καθιστώντας τα δεδομένα ευκολότερα στην ανάλυση και ερμηνεία.

Σε περιπτώσεις όπου τα δεδομένα δεν έδειχναν σαφείς συσχετίσεις ή σχέσεις, δεν ήταν δυνατό να δημιουργηθούν γραφήματα με νόημα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα δεδομένα παρουσιάζονταν αποκλειστικά σε πίνακες, διασφαλίζοντας ότι οι πληροφορίες κοινοποιούνταν ακόμη με σαφήνεια. Αυτήν η προσέγγιση επέτρεψε μια ολοκληρωμένη αναπαράσταση των δεδομένων διατηρώντας παράλληλα την ακρίβεια και τη διαφάνεια. Η χρήση πινάκων παρείχε μια λεπτομερή, δομημένη προβολή των δεδομένων, ακόμη και όταν η γραφική αναπαράσταση δεν ήταν κατάλληλη, διασφαλίζοντας ότι όλες οι σχετικές πληροφορίες περιλαμβάνονταν στην ανάλυση.

Κεφάλαιο 3. Αποτελέσματα

3.1 Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις καλλιέργειες φυτικών τροφίμων

Οι Raza et al. (2019) διερεύνησαν πρωτίστως τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις γεωργικές καλλιέργειες, με έμφαση στις στρατηγικές προσαρμογής για τον μετριασμό των αρνητικών επιπτώσεών της. Εξέτασαν τόσο τις βιοτικές όσο και τις αβιοτικές πιέσεις που έχουν προκύψει λόγω παγκόσμιων περιβαλλοντικών αλλαγών, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας, τα ακανόνιστα μοτίβα βροχοπτώσεων, οι αυξημένες συγκεντρώσεις CO₂ στην ατμόσφαιρα και άλλα φαινόμενα που σχετίζονται με το

κλίμα. Η έρευνα επικεντρώθηκε στο πώς αυτές οι πιέσεις επηρέασαν αρνητικά την ανάπτυξη των φυτών, την παραγωγικότητα και την ασφάλεια των τροφίμων παγκοσμίως, με ιδιαίτερη προσοχή στις βασικές καλλιέργειες όπως το σιτάρι, ο αραβόσιτος και το ρύζι (Raza et al., 2019).

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη περιελάμβαναν μια σύνθεση προηγούμενων ερευνών και εμπειρικών μελετών, που συγκεντρώθηκαν από διάφορες παγκόσμιες πηγές, όπως εκθέσεις του FAO (Food and Agriculture Organization) και περιβαλλοντικές βάσεις δεδομένων. Οι ερευνητές βασίστηκαν σε εθνικές στατιστικές απόδοσης καλλιεργειών, έρευνες με ερωτηματολόγια και πειραματικά δεδομένα από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές για την αξιολόγηση των τρωτών σημείων σε όλες τις ηπείρους, ιδιαίτερα στην Ευρώπη. Η μελέτη βασίστηκε σε ποσοτικά δεδομένα που σχετίζονται με τις αποδόσεις των καλλιεργειών, την άνοδο της θερμοκρασίας, τη μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων και τη συχνότητα των ακραίων κλιματικών γεγονότων, προσφέροντας μια ευρεία ανάλυση του πώς οι κλιματικές μεταβλητές επηρέασαν τη φυσιολογία των φυτών και τα αποτελέσματα της απόδοσης.

Επιπλέον, η μελέτη ενσωμάτωσε γενετικά και μοριακά δεδομένα από διάφορα είδη φυτών για να διερευνήσει το ρόλο της γενετικής μηχανικής και της μοριακής αναπαραγωγής στην ανάπτυξη καλλιεργειών ανθεκτικών στο κλίμα. Αξιολογώντας αποτελέσματα από μελέτες συσχέτισης σε όλο το γονιδίωμα (GWAS), χαρτογράφηση ποσοτικών τόπων χαρακτηριστικών (QTL) και άλλες γονιδιωματικές τεχνικές, η μελέτη παρείχε πληροφορίες για το πώς οι σύγχρονες τεχνικές αναπαραγωγής θα μπορούσαν ενδεχομένως να ενισχύσουν την προσαρμοστικότητα των καλλιεργειών στα ακραία κλίματα (Kole et al., 2015). Συζήτησε επίσης τους γενετικούς δείκτες και τα ανθεκτικά στο στρες γονίδια που προσδιορίζονται μέσω αυτών των προηγμένων τεχνικών, όπως οι μεταγραφικοί παράγοντες DREB και ERF, που ήταν ζωτικής

σημασίας για τη βελτίωση της ανοχής στην ξηρασία, τη ζέστη και την αλατότητα στις καλλιέργειες (Sharoni et al., 2010).

Η μελέτη περιελάμβανε πολλά βασικά κομμάτια αριθμητικών δεδομένων για να υποστηρίξει την ανάλυσή της για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη φυτική παραγωγή, τα οποία παρουσιάζονται λεπτομερώς στον **Πίνακα 1**. Μερικά από τα αξιοσημείωτα στοιχεία είναι τα ακόλουθα:

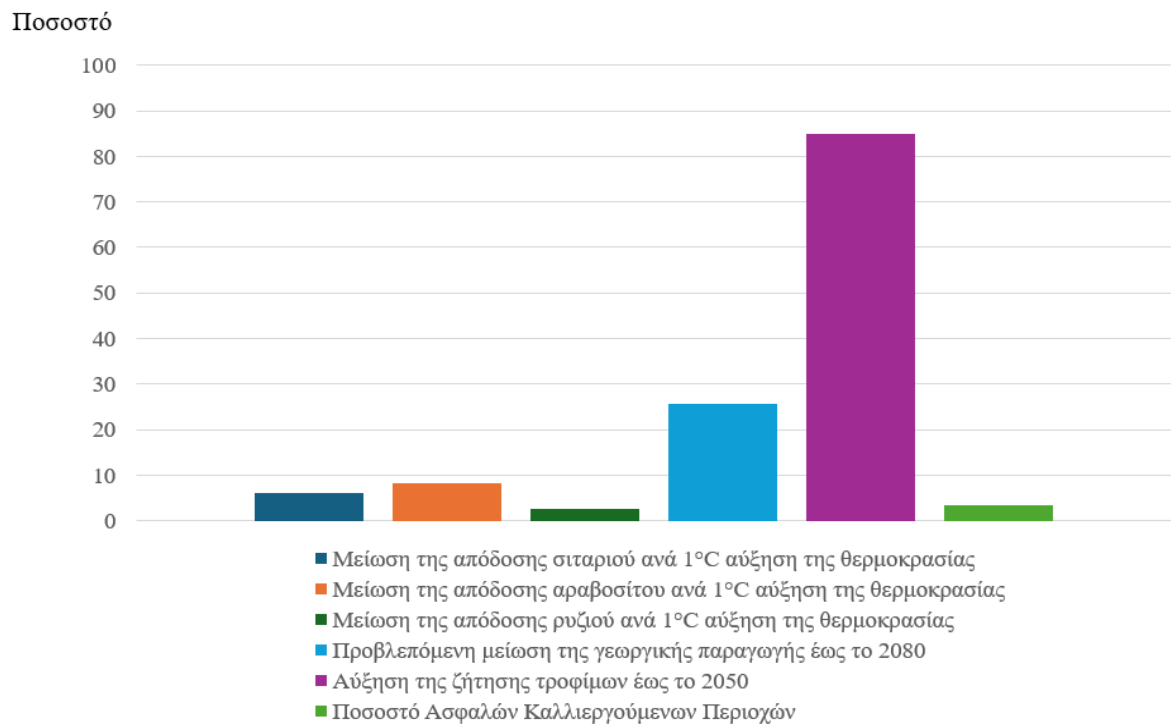
- *Συγκέντρωση CO₂*: Η μελέτη ανέφερε ότι τα επίπεδα CO₂ της ατμόσφαιρας είχαν αυξηθεί από 280 μmol^{-1} σε 400 μmol^{-1} και προβλεπόταν ότι θα διπλασιαστούν σε 800 μmol^{-1} έως το τέλος του αιώνα, καταδεικνύοντας τη σημαντική αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου που επηρεάζουν το παγκόσμιο κλίμα (Vaughan et al., 2018).
- *Αύξηση θερμοκρασίας*: Προβλεπόταν ότι η μέση θερμοκρασία της Γης θα αυξανόταν κατά 2 έως 4,5°C μέχρι το τέλος του 21ου αιώνα. Η αύξηση της θερμοκρασίας συνδέθηκε με επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών και στην παραγωγικότητα των καλλιεργειών, ιδιαίτερα για ευαίσθητες στη θερμοκρασία καλλιέργειες όπως το σιτάρι και το ρύζι.
- *Μείωση της απόδοσης των καλλιεργειών*: Δόθηκαν διάφορα στοιχεία για τη μείωση των αποδόσεων των καλλιεργειών λόγω της κλιματικής πίεσης:
 - Οι αποδόσεις σιταριού προβλεπόταν να μειώνονται κατά 6% για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C (Asseng et al., 2015).
 - Μια άνοδος της θερμοκρασίας κατά 2°C συσχετίστηκε με μείωση 7% στις αποδόσεις σιταριού και μια αύξηση κατά 4°C θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση των αποδόσεων κατά 34% (Easterling, 2007).

- Για τον αραβόσιτο, κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C εκτιμήθηκε ότι μειώνει τις αποδόσεις κατά 8,3%.
 - Παρόμοια στοιχεία δόθηκαν για το ρύζι, με εκτιμώμενη μείωση της απόδοσης κατά 2,6% για κάθε αύξηση 1°C.
- *Επιπτώσεις στην παγκόσμια φυτική παραγωγή:* Προβλέφθηκε ότι έως το 2080, η γεωργική παραγωγή θα μπορούσε να μειωθεί έως και 25,7% σε ορισμένες περιοχές (Μεξικό) λόγω παραγόντων που σχετίζονται με το κλίμα (Hellin et al., 2014). Ο αραβόσιτος, ειδικότερα, επισημάνθηκε ως καλλιέργεια που θα επηρεαζόταν περισσότερο στο Μεξικό, με σοβαρές μειώσεις στην απόδοση.
- *Αύξηση πληθυσμού και ζήτηση τροφίμων:* Η μελέτη αναφέρθηκε στον παγκόσμιο πληθυσμό που προβλέπεται να φτάσει τα 9 δισεκατομμύρια έως το 2050, γεγονός που θα οδηγήσει σε αύξηση της ζήτησης τροφίμων κατά 85%, τονίζοντας περαιτέρω την επείγουσα ανάγκη αντιμετώπισης των κλιματικών επιπτώσεων στη γεωργία (FAOSTAT, 2017).
- *Ποσοστό ασφαλών καλλιεργούμενων περιοχών:* Σύμφωνα με μια έκθεση του FAO του 2007, μόνο το 3,5% των καλλιεργούμενων εκτάσεων παγκοσμίως θεωρήθηκαν ασφαλείς από περιβαλλοντικούς περιορισμούς, με τη συντριπτική πλειονότητα να επηρεάζεται από παράγοντες που σχετίζονται με το κλίμα.

Πίνακας 1: Δεδομένα και προβλέψεις της μελέτης για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (Raza et al., 2019).

Μεταβλητή	Δεδομένα
Αύξηση συγκέντρωσης CO ₂	280 έως 800 μmol^{-1}

Προβλεπόμενη αύξηση θερμοκρασίας (έως το 2100)	2°C έως 4,5°C
Μείωση της απόδοσης σιταριού ανά 1°C	6% ανά 1°C αύξηση
Μείωση της απόδοσης αραβοσίτου ανά 1°C	8,3% ανά 1°C αύξηση
Μείωση της απόδοσης ρυζιού ανά 1°C	2,6% ανά 1°C αύξηση
Προβλεπόμενη μείωση της γεωργικής παραγωγής έως το 2080	25.70%
Αύξηση της ζήτησης τροφίμων έως το 2050	85%
Ποσοστό Ασφαλών Καλλιεργούμενων Περιοχών	3.50%



Γράφημα 1: Μακροχρόνιες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σύμφωνα με Raza et al. (2019).

Οι Gitz et al. (2016) διερεύνησαν πρωτίστως τους κινδύνους που ενέχει η κλιματική αλλαγή για την παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια και τα γεωργικά συστήματα. Επέστησαν την προσοχή τους στις κλιμακωτές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή τροφίμων, ξεκινώντας από τις φυσικές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και περνώντας μέσα από οικονομικές και κοινωνικές διαστάσεις. Οι συγγραφείς ανέλυσαν τους τρόπους με τους οποίους οι αλλαγές στη θερμοκρασία, τα πρότυπα βροχοπτώσεων και ο επιπολασμός παρασίτων και ασθενειών, άμεσα και έμμεσα, επηρέασαν τις αποδόσεις των καλλιεργειών, την παραγωγικότητα των ζώων και την υδατοκαλλιέργεια. Οι επιπτώσεις αυτές ήταν ιδιαίτερα σημαντικές σε περιοχές που ήταν πιο ευάλωτες στις κλιματικές αλλαγές, όπως οι ξηρές και ημίξηρες περιοχές, τα μικρά νησιωτικά αναπτυσσόμενα κράτη και οι μεσόγειες χώρες (Gitz et al., 2016).

Η μελέτη είχε στόχο να παράσχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των κινδύνων που εγκυμονεί η κλιματική αλλαγή για τη γεωργία, δίνοντας έμφαση στον τρόπο με τον οποίο αυτοί οι κίνδυνοι μεταφράζονται σε επισιτιστική ανασφάλεια για τους ευάλωτους πληθυσμούς. Οι ερευνητές τόνισαν ότι ενώ η γεωργική παραγωγή σε περιοχές μεγάλου γεωγραφικού πλάτους μπορεί να έχει κάποια οφέλη λόγω των μεγαλύτερων καλλιεργητικών περιόδων, οι περιοχές χαμηλού γεωγραφικού πλάτους ήταν πιθανό να αντιμετωπίσουν σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στις αποδόσεις των καλλιεργειών. Τα δεδομένα επικεντρώθηκαν στην εμφάνιση της αυξημένης αστάθειας στην παραγωγή τροφίμων, της αύξησης των τιμών των τροφίμων και των επακόλουθων απειλών για τα μέσα διαβίωσης, ιδιαίτερα για τους αγρότες μικρής κλίμακας και τους επισιτιστικά επισφαλείς πληθυσμούς.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη προήλθαν από έρευνα δύο δεκαετιών σχετικά με τις κλιματικές επιπτώσεις στη γεωργία. Ενσωματώθηκαν εμπειρικές μελέτες από πολλές πηγές, συμπεριλαμβανομένων παγκόσμιων γεωργικών μοντέλων, εκθέσεων του FAO και αξιολογήσεων της IPCC. Έγιναν αριθμητικές προβλέψεις σχετικά με τις μειώσεις της απόδοσης σε μεγάλες καλλιέργειες όπως το σιτάρι και ο αραβόσιτος λόγω υψηλότερων θερμοκρασιών και μεταβαλλόμενων μοτίβων βροχοπτώσεων.

Η μελέτη ανέφερε επίσης δεδομένα σχετικά με τα πρότυπα μετανάστευσης των ψαριών, τη λεύκανση των κοραλλιογενών υφάλων και άλλες αλλαγές στο οικοσύστημα που επηρεάζουν τα συστήματα παραγωγής τροφίμων παγκοσμίως. Τα συνολικά δεδομένα παρείχαν μια σαφή αφήγηση για το πώς η κλιματική αλλαγή αναμόρφωσε τα αγροτικά τοπία, εισάγοντας κινδύνους τόσο για τη διαθεσιμότητα τροφίμων όσο και για την οικονομική σταθερότητα.

Η μελέτη παρείχε αρκετά σημαντικά σημεία αριθμητικών δεδομένων που σχετίζονται με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην επισιτιστική ασφάλεια και τη γεωργική παραγωγή, τα οποία παρουσιάζονται επίσης στον **Πίνακα 2**:

- *Μείωση στις αποδόσεις των καλλιεργειών*: Η μελέτη ανέφερε ότι τα παγκόσμια μοντέλα και η εμπειρική έρευνα είχαν δείξει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στις κύριες καλλιέργειες, όπως το σιτάρι και το καλαμπόκι, λόγω της κλιματικής αλλαγής. Οι αποδόσεις είχαν ήδη επηρεαστεί αρνητικά σε πολλές περιοχές. Σημειώθηκε επίσης ότι οι επιπτώσεις έγιναν πιο έντονες σε υψηλότερα επίπεδα θέρμανσης, ιδιαίτερα σε περιοχές με χαμηλό γεωγραφικό πλάτος.
- *Αυξήσεις των τιμών των τροφίμων*: Η μελέτη τόνισε ότι οι κλιματικές κρίσεις, συμπεριλαμβανομένων των ξηρασιών και των πλημμυρών, οδηγούν σε άνοδο των τιμών των γεωργικών προϊόντων. Αν και οι συγκεκριμένες ποσοστιαίες αυξήσεις δεν αναφέρθηκαν λεπτομερώς, η μελέτη κατέστησε σαφές ότι η αστάθεια των τιμών επιδείνωσε την επισιτιστική ανασφάλεια.
- *Προβλεπόμενη ευάλωτοτητα πληθυσμού*: Η έκθεση επεσήμανε ότι οι παραγωγοί τροφίμων μικρής κλίμακας, ιδιαίτερα εκείνοι που εξαρτώνται από φυσικούς πόρους, αντιμετώπιζαν αυξημένους κινδύνους λόγω της περιορισμένης ικανότητάς τους να ανταποκρίνονται στις κλιματικές κρίσεις. Αν και το ακριβές ποσοστό των πληγέντων πληθυσμών δεν ήταν λεπτομερές, η έκθεση τόνισε ότι ένα σημαντικό μέρος του παγκόσμιου πληθυσμού, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες, κινδυνεύει.
- *Οικονομικός αντίκτυπος στα μέσα διαβίωσης*: Η κλιματική αλλαγή προβλεπόταν ότι θα μειώσει τα επίπεδα εισοδήματος και την οικονομική σταθερότητα για τους μικροκαλλιεργητές, αν και δεν δόθηκαν συγκεκριμένα

νομισματικά στοιχεία. Η απώλεια κεφαλαίων, όπως το ζωικό κεφάλαιο, περιγράφηκε ως περαιτέρω διακύβευση της ανθεκτικότητας των νοικοκυριών.

Πίνακας 2: Δεδομένα που σχετίζονται με τις καλλιέργειες που επηρεάζονται από την κλιματική αλλαγή και οι αντίστοιχες στρατηγικές μετριασμού (Gitz et al., 2016).

Καλλιέργειες που επηρεάστηκαν	Επιρροή	Στρατηγική Μετριασμού
Σιτάρι	Μείωση απόδοσης λόγω θέρμανσης	Ανάπτυξη ανθεκτικών στο κλίμα ποικιλιών σιταριού
Αραβόσιτος	Μείωση απόδοσης λόγω θέρμανσης	Υιοθέτηση ποικιλιών αραβοσίτου ανθεκτικών στην ξηρασία
Παγκόσμια αλιεία ψαριών (Τροπικοί)	40% μείωση	Προσαρμοστικές αλιευτικές πρακτικές, επιλογή ειδών, παρακολούθηση των υδάτων

Οι Ali et al. (2017), εξέτασαν κυρίως τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη γεωργική παραγωγικότητα του Πακιστάν, εστιάζοντας στις αποδόσεις βασικών καλλιεργειών όπως το σιτάρι, το ρύζι, ο αραβόσιτος και το ζαχαροκάλαμο. Εξέτασαν τη σχέση μεταξύ διαφόρων κλιματικών μεταβλητών - συμπεριλαμβανομένων των μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών, βροχοπτώσεων, σχετικής υγρασίας και ηλιοφάνειας - και την επιρροή τους στις αποδόσεις των καλλιεργειών. Χρησιμοποιώντας δεδομένα από το 1989 έως το 2015, οι ερευνητές προσπάθησαν να

ποσοτικοποιήσουν τους τρόπους που αυτοί οι περιβαλλοντικοί παράγοντες επηρέασαν την επισιτιστική ασφάλεια, δεδομένου ότι το Πακιστάν είναι εξαιρετικά ευάλωτο στην κλιματική αλλαγή λόγω της εξάρτησής του από τη γεωργία (Ali et al., 2017).

Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν στατιστικά μοντέλα όπως το FGLS (Feasible Generated Least Square) και το HAC (Heteroscedasticity And Autocorrelation) για να αξιολογήσουν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε αυτές τις καλλιέργειες. Συνέλεξαν κλιματικά δεδομένα από δέκα διαφορετικούς μετεωρολογικούς σταθμούς σε όλο το Πακιστάν και δεδομένα απόδοσης καλλιεργειών από διάφορα τμήματα της Γεωργικής Στατιστικής του Πακιστάν. Η ανάλυση ήταν κρίσιμη για τον προσδιορισμό του βαθμού στον οποίο η κλιματική αλλαγή θα μπορούσε να απειλήσει τον γεωργικό τομέα και την επισιτιστική ασφάλεια.

Η μελέτη παρουσίασε πολλά κομμάτια αριθμητικών δεδομένων για να επεξηγήσει τα ευρήματά της, που συνοψίζονται στον **Πίνακα 3**, αλλά πιο εκτενέστερα ως εξής:

➤ *Απόδοση σίτου:*

- *Μέγιστη Θερμοκρασία:* Παρατηρήθηκε σημαντική και αρνητική επίδραση. Για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας, η απόδοση του σιταριού μειώθηκε κατά 1,7991%.
- *Ελάχιστη Θερμοκρασία:* Θετική επίδραση στην απόδοση του σιταριού, με συντελεστή 0,6216%.
- *Βροχόπτωση:* Παρουσίασε αρνητική επίδραση στην απόδοση του σιταριού με συντελεστή -0,1195%, αλλά δεν ήταν στατιστικά σημαντική.
- *Σχετική Υγρασία:* Αν και παρουσίαζε αρνητική επίδραση, η επίδραση δεν ήταν στατιστικά σημαντική.

- *Ηλιοφάνεια*: Θετική αλλά όχι στατιστικά σημαντική για την απόδοση του σιταριού.

➤ *Απόδοση ρυζιού:*

- *Μέγιστη θερμοκρασία*: Η μελέτη βρήκε θετικό και σημαντικό αντίκτυπο, με αύξηση 3,9200% στην απόδοση ρυζιού για κάθε αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας.
- *Ελάχιστη Θερμοκρασία*: Εμφάνισε σημαντική αρνητική επίδραση - 0,7041%.
- *Βροχόπτωση*: Είχε αρνητικό αλλά μη σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση του ρυζιού.
- *Σχετική Υγρασία*: Θετική συσχέτιση με την απόδοση του ρυζιού, αν και όχι στατιστικά σημαντική.
- *Ηλιοφάνεια*: Αρνητική αλλά όχι σημαντική για την απόδοση του ρυζιού.

➤ *Απόδοση καλαμποκιού:*

- *Μέγιστη θερμοκρασία*: Επηρέασε θετικά την απόδοση του αραβοσίτου αλλά ήταν μη σημαντική με συντελεστή 0,1174%.
- *Ελάχιστη θερμοκρασία*: Επίσης είχε θετική αλλά μη σημαντική επίδραση στην απόδοση του αραβοσίτου (0,5458%).
- *Σχετική Υγρασία*: Παρουσίασε σημαντική αρνητική επίπτωση -1,3219% στην απόδοση του καλαμποκιού.
- *Βροχόπτωση και ηλιοφάνεια*: Και οι δύο είχαν μη σημαντικές και αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση του αραβοσίτου.

➤ *Απόδοση ζαχαροκάλαμου:*

- *Μέγιστη θερμοκρασία*: Θετική και στατιστικά σημαντική επίπτωση στην απόδοση ζαχαροκάλαμου (0,4743%).

- *Ελάχιστη Θερμοκρασία:* Επίσης θετική και σημαντική συσχέτιση με την απόδοση ζαχαροκάλαμου (0,2578%).
- *Σχετική Υγρασία:* Θετική και σημαντική επίδραση με συντελεστή 0,3135%.
- *Βροχόπτωση και ηλιοφάνεια:* Και οι δύο είχαν αρνητικές αλλά μη σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση ζαχαροκάλαμου.

➤ *Μέση απόδοση (kg/στρέμμα):*

- Σιτάρι: 879,91
- Ρύζι: 737,29
- Αραβόσιτος: 949,31
- Ζαχαροκάλαμο: 18.284,91

➤ *Μέση Μέγιστη Θερμοκρασίας:*

- Σιτάρι: 25,50°C
- Ρύζι: 36,91°C
- Αραβόσιτος: 32,39°C
- Ζαχαροκάλαμο: 28,86°C

➤ *Μέση ελάχιστη θερμοκρασία:*

- Σιτάρι: 10,85°C
- Ρύζι: 24,84°C
- Αραβόσιτος: 18,29°C
- Ζαχαροκάλαμο: 14,81°C

➤ *Μέση βροχόπτωση (mm):*

- Σιτάρι: 22,28
- Ρύζι: 70,89
- Αραβόσιτος: 33,56

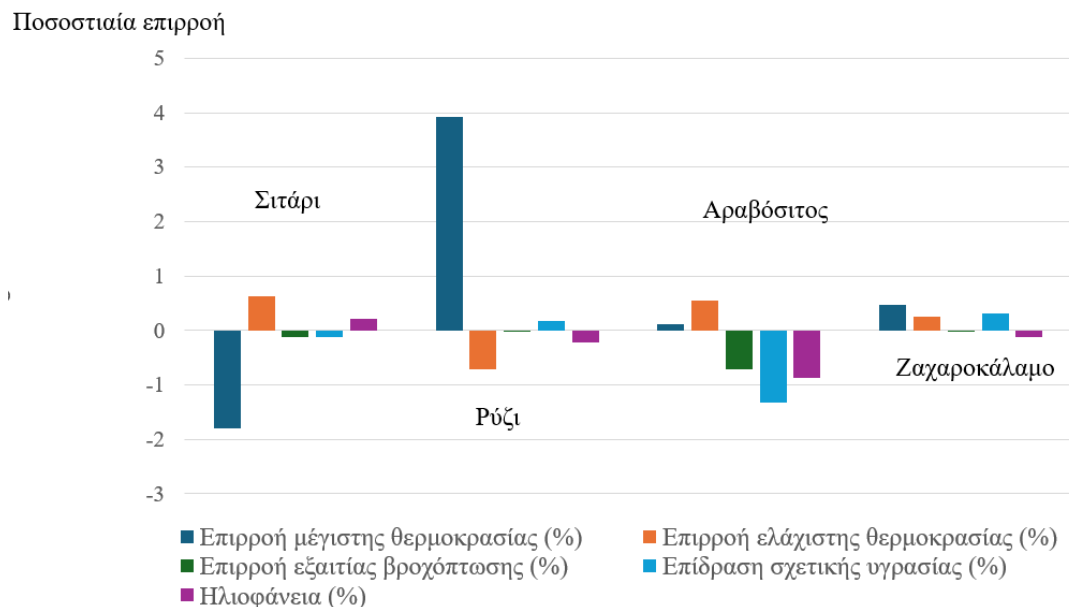
- Ζαχαροκάλαμο: 28,76

Η μελέτη έδειξε ότι η κλιματική μεταβλητότητα, ιδιαίτερα οι αλλαγές στη θερμοκρασία, επηρέασαν σημαντικά τις αποδόσεις των καλλιεργειών στο Πακιστάν. Η μέγιστη θερμοκρασία βρέθηκε να έχει ισχυρή αρνητική επίδραση στο σιτάρι, ενώ επηρέασε θετικά το ρύζι και το ζαχαροκάλαμο. Οι βροχοπτώσεις παρουσίασαν ποικίλες επιπτώσεις, με αρνητικές επιπτώσεις στις περισσότερες καλλιέργειες αλλά όχι πάντα στατιστικά σημαντικές. Τα αποτελέσματα υπογράμμισαν την πολυπλοκότητα των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία, με θετικές και αρνητικές αλληλεπιδράσεις ανάλογα με την καλλιέργεια και την κλιματική μεταβλητή.

Αυτήν η ανάλυση βάσει δεδομένων παρείχε πειστικά στοιχεία για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, υποδεικνύοντας ότι η γεωργία και η επισιτιστική ασφάλεια του Πακιστάν απειλούνταν ολοένα και περισσότερο από την κλιματική αλλαγή. Τα ευρήματα πρότειναν επίσης την αναγκαιότητα προσαρμοστικών στρατηγικών, συμπεριλαμβανομένης της ανάπτυξης καλλιεργειών ανθεκτικών στο κλίμα και βελτιώσεων στις πρακτικές άρδευσης και γεωργίας.

Πίνακας 3: Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στις βασικές καλλιέργειες, με συσχετίσεις μεταξύ διαφορετικών κλιματικών μεταβλητών και των επιπτώσεών τους στην απόδοση διαφορετικών καλλιεργειών (Ali et al., 2017).

Καλλιέργεια	Επιρροή μέγιστης θερμοκρασίας (%)	Επιρροή ελάχιστης θερμοκρασίας (%)	Επιρροή εξαιτίας βροχόπτωσης (%)	Επίδραση σχετικής υγρασίας (%)	Ηλιοφάνεια (%)
Σιτάρι	-1.7991	0.6216	-0.1195	-0.1107	0.2169
Ρύζι	3.9200	-0.7041	-0.0126	0.183	-0.2114
Αραβόσιτος	0.1174	0.5458	-0.703	-1.3219	-0.8761
Ζαχαροκάλαμο	0.4743	0.2578	-0.0094	0.3135	-0.1253



Γράφημα 3: Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στις βασικές καλλιέργειες, με συσχετίσεις μεταξύ διαφορετικών κλιματικών μεταβλητών και των επιπτώσεών τους στην απόδοση.

Στη μελέτη των Malhi & Kaur (2021), εξετάστηκαν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία και παρουσιάστηκαν διάφορες στρατηγικές μετριασμού για την καταπολέμηση των επιπτώσεών της (Malhi & Kaur, 2021).

Η μελέτη διερεύνησε τον αντίκτυπο των αυξανόμενων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ιδιαίτερα του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), του μεθανίου (CH₄) και του υποξειδίου του αζώτου (N₂O), στη γεωργική παραγωγικότητα. Διερευνήθηκαν οι τρόποι με τους οποίους αυτές οι εκπομπές συνέβαλαν στις αυξήσεις της παγκόσμιας θερμοκρασίας, στις αλλαγές των βροχοπτώσεων και στα ακραία καιρικά μοτίβα, τα οποία όλα επηρέασαν άμεσα τις αποδόσεις των καλλιεργειών. Οι ερευνητές εστίασαν επίσης στις φυσιολογικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις καλλιέργειες, συμπεριλαμβανομένων των αλλαγών στους κύκλους ανάπτυξης, των προσβολών από παράσιτα, της γονιμότητας του εδάφους και της διαθεσιμότητας νερού. Επιπλέον, η μελέτη ανέλυσε διαφορετικές κλιματικές έξυπνες γεωργικές πρακτικές με στόχο τον μετριασμό των αρνητικών συνεπειών της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή τροφίμων, που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4** (Malhi & Kaur, 2021).

Το έγγραφο ενσωμάτωσε ένα ευρύ φάσμα αριθμητικών δεδομένων για να ποσοτικοποιήσει τον αντίκτυπο της κλιματικής αλλαγής στις καλλιέργειες και να αξιολογήσει την αποτελεσματικότητα διαφόρων στρατηγικών μετριασμού:

- *Συγκέντρωση CO₂*: Η συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα αυξήθηκε από 315,98 ppm το 1959 σε 411,43 ppm το 2019.
- *Ανοδος θερμοκρασίας*: Η παγκόσμια θερμοκρασία προβλεπόταν να αυξηθεί κατά 2°C έως το 2100 και πιθανώς 4,2°C έως το 2400, προκαλώντας σοβαρές γεωργικές συνέπειες εάν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου συνεχίζονταν με τους σημερινούς ρυθμούς.
- *Αλλαγές στην απόδοση καλλιέργειας*:
 - *Σιτάρι*: Μείωση 6% στην απόδοση σιταριού για κάθε αύξηση κατά 1°C στη μέση παγκόσμια θερμοκρασία.

- *Ρύζι*: Μείωση 3,5% στην απόδοση του ρυζιού έως το 2100 λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και της διακύμανσης των βροχοπτώσεων.
 - *Αραβόσιτος*: Μείωση 7,4% στις αποδόσεις αραβοσίτου υπό παρόμοιες συνθήκες.
 - *Καλαμπόκι*: Προβλέφθηκε μείωση της απόδοσης κατά 23-34% έως το 2055.
- *Καλλιέργειες στην Υποσαχάρια Αφρική*: Οι αποδόσεις του καλαμποκιού προβλεπόταν να μειωθούν κατά 5,8%, ενώ η μανιόκα και το ανθεκτικό στην ξηρασία σόργο παρουσίασαν ελαφρές αυξήσεις.
- *Τομέας Αλιείας*: Προβλεπόμενη απώλεια στην παραγωγή ψαριών λόγω της κλιματικής αλλαγής, ιδιαίτερα σε περιοχές όπως τα νησιά του Σολομώντα, με σημαντική μείωση στην κατά κεφαλήν κατανάλωση που αναμένεται έως το 2050.

Η μελέτη περιελάμβανε προβολές από διάφορα μοντέλα, όπως το μοντέλο Hadley III, μοντέλα στατιστικής παλινδρόμησης και άλλα που χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη αυτών των επιπτώσεων σε διάφορες παγκόσμιες περιοχές.

Η μελέτη διερευνήσε επίσης ορισμένες έξυπνες για το κλίμα γεωργικές τεχνολογίες, όπως:

- *Μηδενική καλλιέργεια*: Μειωμένο κόστος καλλιέργειας και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου με παράλληλη αύξηση των αποδόσεων των καλλιεργειών.
- *Laser Land Leveling*: Βελτιωμένη απόδοση άρδευσης, εξοικονόμηση 21% του νερού άρδευσης και αύξηση του εισοδήματος των αγροτών.
- *Ανθεκτικές στην ξηρασία ποικιλίες*: Αυξημένη ανθεκτικότητα της καλλιέργειας στη θερμότητα και το στρες στο νερό.

- *Direct-Seeded Rice (DSR)*: Μειωμένη χρήση νερού κατά 73% και μειωμένες εκπομπές μεθανίου σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους καλλιέργειας ρυζιού.

Η όλη προσέγγιση βάσει δεδομένων έδειξε ότι η κλιματική αλλαγή είχε σημαντικές επιπτώσεις στην παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια και τόνισε την ανάγκη για ευρεία υιοθέτηση προσαρμοστικών στρατηγικών για τον μετριασμό των δυσμενών συνεπειών της.

Πίνακας 4: Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις καλλιέργειες και στρατηγικές μετριασμού της μελέτης των Mahli & Kaur (2021).

Καλλιέργεια/Προϊόν	Επίδραση (Ποσοστιαία Αλλαγή)	Στρατηγική Μετριασμού
Σιτάρι	-6% (ανά 1°C αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας)	Μηδενική Κατεργασία (Zero Tillage)
Ρύζι	-3.5% έως το 2100	Άμεση Σπορά Ρυζιού (Direct-Seeded Rice - DSR)
Καλαμπόκι	-7.4%	Βελτιωμένες ποικιλίες ανθεκτικές στην ξηρασία
Βρόχινο Καλαμπόκι	-23% έως -34% έως το 2055	Αποτελεσματική Άρδευση και Προσαρμογή
Υποσαχάρια Αφρική (Καλαμπόκι)	-5.8%	Βελτιωμένες ποικιλίες και κλιματικά έξυπνες πρακτικές

Μανιόκα (Κασάβα)	+0.7%	Αυξημένη ανθεκτικότητα στην ποικιλία καλλιέργειας
Σόργο Ανθεκτικό στην Ξηρασία	+1.7%	Υιοθέτηση ποικιλιών ανθεκτικών στην ξηρασία
Αλιεία (Νησιά Σολομώντα)	Μειωμένη κατανάλωση ανά κάτοικο έως το 2050	Βιώσιμες αλιευτικές πρακτικές

3.2 Επιπτώσεις στην παραγωγή φυτικών προϊόντων – μεταποίηση

Η μελέτη των Ali et al. (2020), παρείχε μια λεπτομερή εξέταση του πώς διάφοροι κλιματικοί παράγοντες επηρέασαν τόσο τη φυσιολογία πριν τη συγκομιδή όσο και τη μετασυλλεκτική φυσιολογία των βρώσιμων φυτικών προϊόντων (Πίν. 5). Οι ερευνητές εστίασαν ιδιαίτερα στις σχέσεις μεταξύ του αυξημένου CO₂, των αλλαγών θερμοκρασίας και των επιπτώσεών τους στην ποιότητα αποθήκευσης και στη σύνθεση των θρεπτικών συστατικών.

Βρέθηκε μια κρίσιμη συσχέτιση μεταξύ των αυξημένων επιπέδων CO₂ της ατμόσφαιρας και της ποιότητας των κόκκων και των σπόρων. Για παράδειγμα, μια αύξηση κατά 50% στη συγκέντρωση CO₂ είχε ως αποτέλεσμα τη δυσμορφία των κονδύλων της πατάτας, η οποία αντανακλάται από την αυξημένη αμαύρωση και το σχηματισμό ακρυλαμιδίου κατά την επεξεργασία. Επιπλέον, η μελέτη σημείωσε ότι η αυξημένη συγκέντρωση CO₂ οδήγησε άμεσα σε μείωση των βασικών θρεπτικών συστατικών όπως το ασβέστιο, το άζωτο, το θείο και το μαγνήσιο στο αλεύρι σίτου. Αυτή η μείωση στα βασικά θρεπτικά συστατικά έδειξε αρνητική συσχέτιση μεταξύ των αυξανόμενων επιπέδων CO₂ και της ποιότητας των κόκκων κατά την αποθήκευση.

Η συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας και της φυσιολογίας μετά τη συγκομιδή ήταν ένα άλλο κομβικό σημείο της έρευνας. Η αυξημένη θερμοκρασία κατά τη φάση παραγωγής προκάλεσε σημαντική μείωση στη συσσώρευση αμύλου στους κόκκους σιταριού. Μια μελέτη που αναφέρεται στην έκθεση έδειξε ότι οι υψηλότερες θερμοκρασίες μείωσαν την περιεκτικότητα σε αδιάλυτη αμυλόζη κατά την αποθήκευση, επηρεάζοντας έτσι αρνητικά το διατροφικό προφίλ του κόκκου. Επιπλέον, το θερμικό στρες μετά την ανθοφορία στο σκληρό σιτάρι είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των πρωτεϊνών, των καροτενοειδών και της αντιοξειδωτικής δραστηριότητας, καθιερώνοντας μια σαφή συσχέτιση μεταξύ θερμικής καταπόνησης και μειωμένης ποιότητας κόκκου.

Επιπλέον, όσον αφορά την ποιότητα των καρπών, η μελέτη παρατήρησε ότι οι αυξημένες θερμοκρασίες είχαν ποικίλες επιπτώσεις στις συνθέσεις λιπαρών οξέων σε ελαιοπαραγωγικές καλλιέργειες όπως η σόγια. Τα επίπεδα του ελαϊκού οξέος αυξήθηκαν, ενώ οι συγκεντρώσεις του λινολεϊκού οξέος μειώθηκαν, καταδεικνύοντας μια μετατόπιση που προκαλείται από τη θερμοκρασία στα προφίλ λιπαρών οξέων. Οι ερευνητές ανέφεραν επίσης ότι τα αυξημένα επίπεδα CO₂ στην ατμόσφαιρα οδήγησαν σε αύξηση της συχνότητας εμφάνισης της κοινής ψώρας και δυσμορφίας κονδύλων στις πατάτες κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης μετά τη συγκομιδή, η οποία συσχετίστηκε με αλλαγές στη μειωμένη περιεκτικότητα σε σάκχαρα των κονδύλων.

Στην περίπτωση των σταφυλιών, η έρευνα αποκάλυψε μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των θερμοκρασιών θέρμανσης και της πρώιμης ωρίμανσης. Για παράδειγμα, δεδομένα από 44 αμπελώνες έδειξαν μέση πρόοδο στην ωριμότητα των σταφυλιών κατά 1,7 ημέρες ετησίως κατά την περίοδο 1993-2009, υποδηλώνοντας ότι η αύξηση της θερμοκρασίας επιτάχυνε τη διαδικασία ωρίμανσης. Η τάση συνοδεύτηκε από

αύξηση των επιπέδων σακχάρου και μείωση της τιτλοδοτήσιμης οξύτητας στα φρούτα του σταφυλίου.

Επιπλέον, η αυξημένη βροχόπτωση λόγω της κλιματικής αλλαγής κατά τη συγκομιδή συσχετίστηκε με την αλλοίωση των σιτηρών κατά την αποθήκευση. Ο συνδυασμός αυξημένης θερμοκρασίας και αυξημένης υγρασίας διευκόλυνε την ανάπτυξη μούχλας και τον πολλαπλασιασμό των εντόμων, αυξάνοντας τελικά τον κίνδυνο μόλυνσης από μυκοτοξίνες. Το φαινόμενο τεκμηρίωσε περαιτέρω τον ισχυρισμό των ερευνητών ότι τα επίπεδα θερμοκρασίας και υγρασίας επηρέασαν σημαντικά την αλλοίωση των σιτηρών μετά τη συγκομιδή.

Τέλος, η μελέτη τόνισε πώς οι συνθήκες ξηρασίας πριν τη συγκομιδή και η ρυθμιζόμενη ελλειμματική άρδευση (RDI) επηρέασαν την ποιότητα μετά τη συγκομιδή. Για παράδειγμα, σε μελέτες σε βατόμουρα, η RDI με ρυθμό εξατμισοδιαπνοής 75% ενίσχυσε την οξύτητα, τη σφριγηλότητα και τα διαλυτά στερεά του φρούτου, ενώ μείωσε την απώλεια βάρους κατά την αποθήκευση. Παρόμοια τάση παρατηρήθηκε στα ρόδια, όπου η RDI βελτίωσε τα επίπεδα αντιοξειδωτικών και ενίσχυσε την αισθητική ποιότητα χωρίς να επηρεάσει το μέγεθος ή την εμπορεύσιμη απόδοση του καρπού.

Πίνακας 5: Επίπτωση της κλιματικής αλλαγής στη μεταποίηση των φυτικών προϊόντων, βάση της έρευνας των Ali et al. (2020).

Κλιματικός Παράγοντας	Επίδραση στα βρώσιμα προϊόντα	Αντίκτυπος
Αύξηση CO ₂ (50%)	Δυσμορφία κονδύλων πατάτας	50% υψηλότερο CO ₂
Αύξηση θερμοκρασίας (Γενική)	Μειωμένο άμυλο στο σιτάρι	Μειωμένη αδιάλυτη αμυλόζη
Αύξηση θερμοκρασίας (Σιτάρι)	Μειωμένη πρωτεΐνη στο σιτάρι	Μειωμένα καροτενοειδή, αντιοξειδωτικά
Αύξηση θερμοκρασίας (σταφύλια)	Πρώιμη ωρίμανση σταφυλιού	Πρώιμη ωρίμανση 1,7 ημέρες/έτος
Αύξηση βροχοπτώσεων	Αυξημένη αλλοίωση των σιτηρών	Αυξημένη ανάπτυξη μούχλας

Μια μελέτη από τους Fanzo et al. (2020), εξέτασε τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην επεξεργασία των τροφίμων μετά τη συγκομιδή. Συγκεκριμένα, η μελέτη εξέτασε το πώς η αποθήκευση και η επεξεργασία τροφίμων μετά τη συγκομιδή είναι ευάλωτες στις προκλήσεις που σχετίζονται με το κλίμα. Καθώς οι θερμοκρασίες αυξάνονται, η ζήτηση για αποθήκευση στο ψυγείο αυξάνεται για να διατηρηθεί η διάρκεια ζωής και η ποιότητα των τροφίμων με υψηλή περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά. Ωστόσο, εναλλακτικές τεχνικές επεξεργασίας, όπως η ξήρανση, μπορούν επίσης να βελτιώσουν τη σταθερότητα των τροφίμων, μειώνοντας την εξάρτηση από την αποθήκευση σε ψύξη εντατικής κατανάλωσης. Επιπλέον, η κλιματική αλλαγή

αναμένεται να αυξήσει την εμφάνιση τροφιμογενών παθογόνων και μυκοτοξινών, τονίζοντας έτσι τη σημασία της βελτίωσης των μέτρων ασφάλειας των τροφίμων κατά την αποθήκευση και την επεξεργασία (Fanzo et al., 2020).

Η μελέτη τόνισε επίσης ότι η αυξημένη αλλοίωση και η σπατάλη τροφίμων λόγω των ακραίων καιρικών φαινομένων είναι άμεσες συνέπειες της κλιματικής αλλαγής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η έλλειψη υποδομής για την κατάλληλη αποθήκευση τροφίμων μπορεί να επιδεινώσει αυτά τα ζητήματα, ιδιαίτερα στις αγροτικές περιοχές. Έτσι, οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης με προστασία από το κλίμα και οι εναλλακτικές μέθοδοι επεξεργασίας είναι απαραίτητες για τον μετριασμό αυτών των επιπτώσεων και τη διατήρηση της ποιότητας των τροφίμων.

Όσον αφορά τα δεδομένα, η μελέτη παρουσίασε τα ακόλουθα σχετικά στοιχεία, που παρουσιάζονται και πιο συνοψισμένα στον **Πίνακα 6**:

- ❖ Σχεδόν το ένα τρίτο των τροφίμων που παράγονται παγκοσμίως σπαταλάται ετησίως, με περίπου 95 έως 115 κιλά/κάτοικο τροφίμων να σπαταλούνται από τους καταναλωτές στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική (FAO, 2011).
- ❖ Περισσότεροι από 500.000 επιπλέον θάνατοι προβλέπονται μέχρι το 2050 λόγω των κλιματικών αλλαγών στην πρόσληψη τροφής, ιδιαίτερα των μειώσεων στην κατανάλωση λαχανικών και φρούτων.
- ❖ Υπάρχουν 1,9 δισεκατομμύρια άνθρωποι που λαμβάνουν το 70% του σιδήρου και του ψευδάργυρου τους από καλλιέργειες δημητριακών, με μελλοντικές συγκεντρώσεις CO₂ που προβλέπεται να μειώσουν το θρεπτικό περιεχόμενο αυτών των καλλιεργειών (π.χ. πρωτεΐνες, σίδηρος και ψευδάργυρος) (Muller et al., 2015).

Πίνακας 6: Βασικά αριθμητικά δεδομένα για τον αντίκτυπο της κλιματικής αλλαγής στην επεξεργασία τροφίμων μετά τη συγκομιδή σύμφωνα με τα όσα μελέτησαν οι Ali et al. (2020).

Κατηγορία	Περιγραφή	Αριθμητικά Δεδομένα
Παγκόσμια Σπατάλη Τροφίμων	Ετήσια σπατάλη τροφίμων από καταναλωτές στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική	95 - 115 κιλά/άτομο
Προβλεπόμενοι Θάνατοι (2050)	Πρόσθετοι θάνατοι λόγω κλιματικών αλλαγών στην πρόσληψη τροφής (ειδικά εξαιτίας της μείωσης λαχανικών και φρούτων)	>500.000 επιπλέον θάνατοι
Εξάρτηση από Δημητριακά	Άτομα που βασίζονται στα δημητριακά για το 70% της πρόσληψης σιδήρου και ψευδαργύρου	1,9 δισεκατομμύρια άτομα

3.3 Επιπτώσεις στην υγεία των καταναλωτών

Η μελέτη του Von Braun (2020) επικεντρώθηκε στις ευρείες και σύνθετες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία, την επισιτιστική ασφάλεια και τη δημόσια υγεία. Διερεύνησε τις αλλαγές στα κλιματικά πρότυπα, συμπεριλαμβανομένων των αυξανόμενων θερμοκρασιών, των αλλαγών

βροχοπτώσεων και της αυξημένης συχνότητας ακραίων καιρικών φαινομένων, καθώς και το πώς επηρέασαν τις αποδόσεις των καλλιεργειών, τη διαθεσιμότητα τροφίμων και, τελικά, την ανθρώπινη υγεία. Κεντρικό θέμα της έρευνας ήταν οι άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις αυτών των αλλαγών στην παγκόσμια παραγωγή τροφίμων, ιδιαίτερα βασικών προϊόντων όπως το σιτάρι, το ρύζι, ο καλαμπόκι και η σόγια, που παρείχαν την πλειονότητα της θερμιδικής πρόσληψης για τον παγκόσμιο πληθυσμό (Al-Delaimy et al., 2020).

Ο Von Braun ανέφερε ότι μέχρι τη δεκαετία του 2030, η παγκόσμια παραγωγή καλλιεργειών θα μειωνόταν κατά 9%, και αυτό θα αυξανόταν σε μείωση 23% μέχρι τη δεκαετία του 2050. Αυτές οι προβλέψεις βασίστηκαν σε μοντέλα που έλαβαν υπόψη διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των αλλαγών στη θερμοκρασία, των μοτίβων βροχοπτώσεων και των επιπτώσεων των ακραίων καιρικών φαινομένων (Haile et al., 2017). Η μελέτη σημείωσε ότι τέτοιες μειώσεις στις αποδόσεις των καλλιεργειών θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε εκτεταμένη επισιτιστική ανασφάλεια, ιδιαίτερα σε ευάλωτες περιοχές του κόσμου. Αυτό, με τη σειρά του, αναμενόταν να επιδεινώσει τον υποσιτισμό και τα προβλήματα υγείας, ειδικά στους φτωχότερους πληθυσμούς.

Εκτός από τις μειώσεις στη φυτική παραγωγή, η μελέτη διαπίστωσε ότι η κλιματική αλλαγή θα αύξανε τη διακύμανση στις αποδόσεις των καλλιεργειών, με τους κινδύνους παραγωγής να αυξάνονται κατά 1,4% τη δεκαετία του 2030 και 2,8% τη δεκαετία του 2050. Η μεταβλητότητα στη γεωργική παραγωγή θα οδηγούσε σε αυξημένη αστάθεια των τιμών στις παγκόσμιες αγορές τροφίμων, καθιστώντας δυσκολότερη για τους πληθυσμούς τόσο των αναπτυσσόμενων όσο και των αναπτυγμένων χωρών την πρόσβαση σε προσιτά, θρεπτικά τρόφιμα. Ο Von Braun προειδοποίησε ότι αυτού του

είδους η αστάθεια θα μπορούσε να έχει σοβαρές επιπτώσεις στις παγκόσμιες οικονομίες, τη δημόσια υγεία και την πολιτική σταθερότητα.

Η μελέτη εξέτασε επίσης τις επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην υγεία των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με την παραγωγή τροφίμων. Τόνισε ότι έως το 2050, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με τα τρόφιμα θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν το 50% των συνολικών εκπομπών που είναι απαραίτητες για τον περιορισμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη κάτω από τους 2°C, στόχος που έχει τεθεί από τη Συμφωνία του Παρισιού. Η μελέτη πρότεινε ότι χωρίς σημαντικές αλλαγές στις γεωργικές πρακτικές και τα συστήματα τροφίμων, ο κλάδος θα συνέχιζε να συμβάλλει σημαντικά στην κλιματική αλλαγή.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, η μελέτη πρότεινε διάφορες στρατηγικές μετριασμού. Μία από τις πιο αξιοσημείωτες προτάσεις ήταν η θέσπιση παγκόσμιου φόρου για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την παραγωγή τροφίμων. Εκτιμήθηκε ότι ένας τέτοιος φόρος θα μπορούσε να μειώσει τις εκπομπές που σχετίζονται με τα τρόφιμα μεταξύ 8,6% και 9,3%, ανάλογα με τον σχεδιασμό και την εφαρμογή της συγκεκριμένης πολιτικής. Αυτό όχι μόνο θα μπορούσε να προσφέρει στη μείωση της συμβολής του γεωργικού τομέα στην υπερθέρμανση του πλανήτη, αλλά θα δημιουργήσει επίσης οικονομικά κίνητρα για πιο βιώσιμες και έξυπνες για το κλίμα γεωργικές πρακτικές.

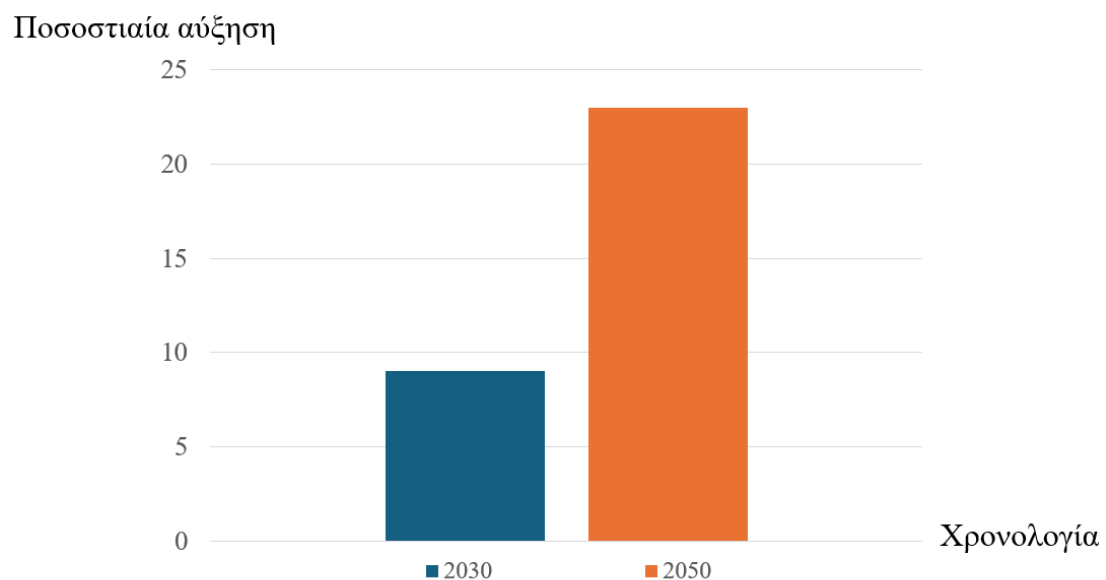
Η μελέτη εξέτασε επίσης τις ευρύτερες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην υγεία. Σημείωσε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας και οι αλλαγές στα πρότυπα βροχοπτώσεων θα συνέβαλαν στην εξάπλωση των τροφιμογενών ασθενειών και άλλων κινδύνων για την υγεία, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η πρόσβαση σε καθαρό νερό και υγιονομική περίθαλψη ήταν περιορισμένη. Επιπλέον, η μείωση των αποδόσεων των

καλλιιεργειών και η αύξηση των τιμών των τροφίμων θα οδηγούσαν σε υποσιτισμό, ιδίως στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου οι άνθρωποι ήδη υπέφεραν από υποσιτισμό.

Η προβλεπόμενη παγκόσμια πτώση της φυτικής παραγωγής σύμφωνα με Von Braun (2020) παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 7).

Πίνακας 7: Προβλεπόμενη παγκόσμια πτώση της φυτικής παραγωγής σύμφωνα με τη μελέτη Von Braun (2020).

Έτος	Παγκόσμια μείωση της φυτικής παραγωγής (%)
2030s	9
2050s	23



Γράφημα 4: Προβλεπόμενη παγκόσμια πτώση της φυτικής παραγωγής τις επόμενες δεκαετίες, βάση της έρευνας του Von Braun (2020).

Οι Oyedele et al. (2020) εξέτασαν τους τρόπους με τους οποίους η κλιματική αλλαγή απειλεί την ασφάλεια των τροφίμων και την υγεία των καταναλωτών, εστιάζοντας τόσο στις άμεσες όσο και στις έμμεσες επιπτώσεις των μεταβαλλόμενων κλιματικών προτύπων. Τόνισαν τους τρόπους με τους οποίους η άνοδος της παγκόσμιας θερμοκρασίας, η αλλαγή των μοτίβων βροχοπτώσεων και τα συχνότερα ακραία καιρικά φαινόμενα όπως ξηρασίες, πλημμύρες και καύσωνες δημιούργησαν ένα περιβάλλον που ευνοεί τον πολλαπλασιασμό επιβλαβών μικροοργανισμών, τοξινών και ρύπων που μπορούν να επηρεάσουν την ασφάλεια των τροφίμων, όπως παρουσιάζεται και στον **Πίνακα 8** (Oyedele et al., 2020). Ορισμένα από τα ευρήματα της έρευνας ήταν τα εξής:

➤ *Επίδραση στη μόλυνση των καλλιεργειών από μυκοτοξίνες:*

- Μία από τις σημαντικές ανησυχίες που τέθηκαν από τη μελέτη ήταν ο αυξημένος κίνδυνος μόλυνσης από μυκοτοξίνες σε καλλιέργειες τροφίμων λόγω της κλιματικής αλλαγής. Οι μυκοτοξίνες είναι τοξικές ενώσεις που παράγονται από ορισμένους τύπους μυκήτων, όπως ο *Aspergillus* και το *Fusarium*, οι οποίοι μπορούν να αναπτυχθούν σε καλλιέργειες υπό ορισμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Η μελέτη σημείωσε ότι η κλιματική αλλαγή, ιδιαίτερα οι αυξημένες θερμοκρασίες, τα αυξημένα επίπεδα CO₂ και οι συνθήκες ξηρασίας, ευνόησαν την ανάπτυξη αυτών των μυκήτων και την παραγωγή μυκοτοξινών, ιδιαίτερα σε βασικές καλλιέργειες όπως ο αραβόσιτος, το ρύζι και το σιτάρι.
- Για παράδειγμα, σε περιοχές όπως η Βόρεια Ιταλία, οι παρατεταμένες συνθήκες ξηρασίας και οι ακραίες θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 35°C σε ορισμένα χρόνια οδήγησαν τις καλλιέργειες αραβοσίτου να

είναι πιο επιρρεπείς σε προσβολή από τον *Aspergillus flavus*, ο οποίος παράγει αφλατοξίνες - μια εξαιρετικά τοξική ομάδα μυκοτοξινών. Αυτές οι αφλατοξίνες ενέχουν σοβαρούς κινδύνους για την υγεία, συμπεριλαμβανομένης της ηπατικής βλάβης και αυξημένου κινδύνου για καρκίνο του ήπατος (ηπατοκυτταρικό καρκίνωμα), ιδιαίτερα όταν συσσωρεύονται σε προμήθειες τροφίμων.

- Η μελέτη ανέφερε επίσης ότι αυτό το ζήτημα δεν περιορίζεται σε μία περιοχή, αλλά θα μπορούσε να επηρεάσει πολλές περιοχές παγκοσμίως όπου οι καλλιέργειες υπόκεινται σε αυξημένη ξηρασία και θερμική καταπόνηση. Ο συνδυασμός ξηρασίας και αυξημένων επιπέδων CO₂ συνέβαλε σε μεγαλύτερο αποικισμό μυκήτων, οδηγώντας σε υψηλότερες συγκεντρώσεις μυκοτοξινών στα γεωργικά προϊόντα, που με τη σειρά τους αύξησαν τους κινδύνους τροφιμογενών ασθενειών όταν καταναλώνονται αυτά τα προϊόντα.

➤ *Τροφιμογενείς ασθένειες και παθογόνα:*

- Η μελέτη επικεντρώθηκε εκτενώς στον αυξημένο κίνδυνο τροφιμογενών ασθενειών λόγω της κλιματικής αλλαγής. Οι αλλαγές στη θερμοκρασία και τα πρότυπα βροχόπτωσης έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην αλλαγή της επιμονής και της εξάπλωσης των παθογόνων που προκαλούν τροφιμογενείς ασθένειες. Για παράδειγμα, αυξημένες θερμοκρασίες και υψηλά επίπεδα βροχόπτωσης συνδέθηκαν με την ενισχυμένη εξάπλωση παθογόνων όπως *Salmonella* spp., *Campylobacter* spp. και *L. monocytogenes*. Αυτά τα βακτήρια είναι υπεύθυνα για ασθένειες όπως η σαλμονέλλωση, η λιστερίωση και η

καμυλοβακτηρίωση, οι οποίες ενέχουν σοβαρούς κινδύνους για την υγεία των καταναλωτών.

- Η μελέτη παρείχε παραδείγματα από περιοχές όπως ο Καναδάς, όπου οι αυξήσεις στις θερμοκρασίες της επιφάνειας του αέρα και της θάλασσας, σε συνδυασμό με υψηλότερες βροχοπτώσεις και πλημμύρες, οδήγησαν σε μεγαλύτερη επιβάρυνση των τροφιμογενών παθογόνων. Συνέδεσε αυτές τις περιβαλλοντικές αλλαγές με τη μόλυνση των πηγών τροφής και νερού, υπογραμμίζοντας πώς τα απρόβλεπτα καιρικά μοτίβα θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε συχνές εστίες τροφιμογενών ασθενειών.

➤ *Μετάδοση ζωνοσογόνων νόσων:*

- Η κλιματική αλλαγή διευκόλυνε επίσης την εξάπλωση ζωνοσογόνων ασθενειών—ασθένειες που μπορούν να μεταδοθούν από τα ζώα στον άνθρωπο. Καθώς τα κλιματικά πρότυπα μετατοπίστηκαν, τα ζώα εκτέθηκαν σε νέα ενδιαίτηματα και συνθήκες που αύξαναν την πιθανότητα μετάδοσης ασθενειών. Για παράδειγμα, ασθένειες όπως ο πυρετός της κοιλάδας Rift, ο ιός Hendra και ο ιός Nipah - οι οποίοι μεταδίδονται μεταξύ ζώων, άγριας ζωής και ανθρώπων - έγιναν πιο διαδεδομένες λόγω των μεταβαλλόμενων περιβαλλοντικών συνθηκών.
- Αυτές οι ζωνοσογόνες ασθένειες αποτελούν σημαντικές απειλές για τη δημόσια υγεία, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου άνθρωποι και ζώα ζουν σε κοντινή απόσταση. Η μελέτη επεσήμανε ότι καθώς τα οικοσυστήματα της άγριας ζωής και των ζώων αλλάζουν λόγω των κλιματικών αλλαγών, οι άνθρωποι είναι πιο πιθανό να έρθουν σε επαφή με μολυσμένα ζώα, με αποτέλεσμα την αυξημένη μετάδοση αυτών των επικίνδυνων παθογόνων.

➤ *Μόλυνση υδάτων και πλημμύρες:*

- Οι πλημμύρες, οι οποίες γίνονται όλο και πιο συχνές και έντονες λόγω της κλιματικής αλλαγής, αποτελούσαν σημαντική απειλή για την ασφάλεια των τροφίμων. Η μελέτη τόνισε πώς οι πλημμύρες μόλυναν γεωργικές εκτάσεις με επιβλαβείς χημικές ουσίες, υπολείμματα φυτοφαρμάκων και βαρέα μέταλλα από τις γύρω περιοχές, συμπεριλαμβανομένης της αστικής απορροής. Αυτές οι προσμείξεις εισήλθαν στην τροφική αλυσίδα μέσω των καλλιεργειών που καλλιεργούνται σε πλημμυρισμένα εδάφη, θέτοντας σοβαρό κίνδυνο για την υγεία των καταναλωτών.
- Εκτός από τη χημική μόλυνση, παθογόνοι μικροοργανισμοί όπως το *Vibrio vulnificus* και το *Vibrio parahaemolyticus* —που ευδοκιμούν σε ζεστό, πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά νερό— μεταφέρονταν συχνά από τα νερά της πλημμύρας, οδηγώντας σε μόλυνση των καλλιεργειών και των αποθεμάτων νερού. Αυτά τα παθογόνα μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές ασθένειες στον άνθρωπο, ειδικά όταν οι καλλιέργειες που αρδεύονται με μολυσμένο νερό καταναλώνονται ωμά ή μισοψημένα.
- Ο συνδυασμένος αντίκτυπος των έντονων βροχοπτώσεων και της θέρμανσης των ωκεανών επηρέασε επίσης την ασφάλεια των θαλασσινών. Η μελέτη ανέφερε ότι οι αυξημένες θερμοκρασίες στα θαλάσσια περιβάλλοντα, σε συνδυασμό με την οξίνιση των ωκεανών και τις αλλαγές στην αλατότητα, οδήγησαν σε επιβλαβείς ανθίσεις φυκών, οι οποίες μόλυναν τα οστρακοειδή και άλλα θαλασσινά με τοξίνες. Αυτές οι τοξίνες προκάλεσαν τροφιμογενείς ασθένειες όπως

παραλυτική, διαρροϊκή και νευροτοξική δηλητηρίαση από οστρακοειδή στους ανθρώπους μετά την κατανάλωση.

➤ *Επιπτώσεις στην υγεία στους καταναλωτές:* Οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής για την ασφάλεια των τροφίμων μεταφράζονται άμεσα σε πολλαπλές επιπτώσεις στην υγεία για τους καταναλωτές:

- *Τροφιμογενείς ασθένειες:* Εστίες ασθενειών που προκαλούνται από μολυσμένα τρόφιμα και νερό, όπως η σαλμονέλλωση, η χολέρα και η λιστερίωση.
- *Μυκοτοξικώσεις:* Έκθεση σε μυκοτοξίνες όπως οι αφλατοξίνες, οι οποίες είναι καρκινογόνες και μπορεί να προκαλέσουν καρκίνο του ήπατος, καθυστέρηση στην ανάπτυξη και καταστολή του ανοσοποιητικού.
- *Ζωονοσωστικές ασθένειες:* Αυξημένη μετάδοση ζωονοσογόνων ασθενειών από τα ζώα στον άνθρωπο λόγω της αλλαγής των ενδιαιτημάτων της άγριας ζωής.
- *Διατροφικές ελλείψεις:* Υποσιτισμός και υποσιτισμός που προκαλείται από μολυσμένες καλλιέργειες, ειδικά σε περιοχές με περιορισμένη επισιτιστική ασφάλεια.

➤ *Προσαρμοστικές στρατηγικές για την ασφάλεια των τροφίμων:*

- Υπό το πρίσμα των αυξανόμενων απειλών που θέτει η κλιματική αλλαγή για την ασφάλεια των τροφίμων, η μελέτη υποστήριξε τις προσαρμοστικές στρατηγικές για τον μετριασμό αυτών των κινδύνων. Αυτές οι στρατηγικές περιελάμβαναν:
- Εφαρμογή προγραμμάτων διαχείρισης της ασφάλειας των τροφίμων όπως το "One Health", το οποίο ενσωμάτωσε την ασφάλεια των

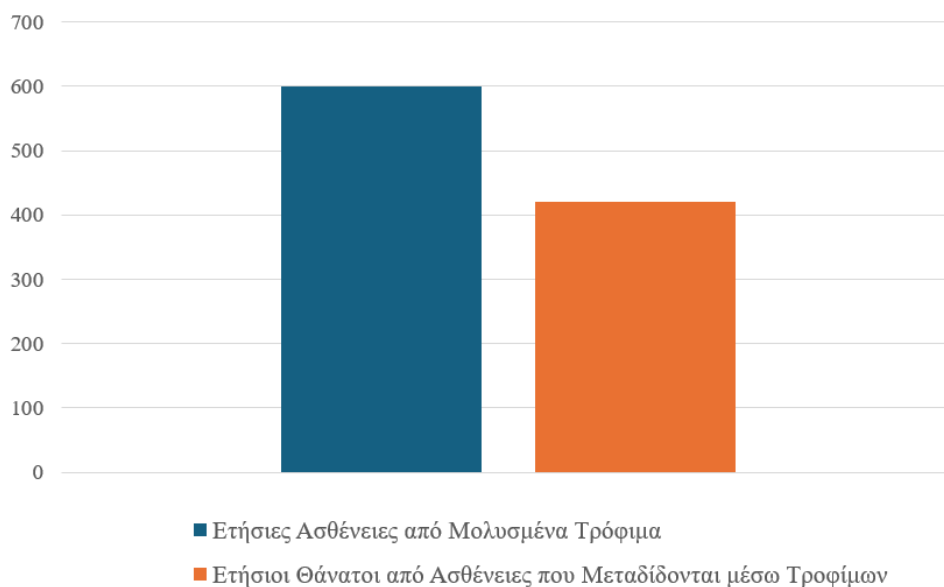
τροφίμων, τη δημόσια υγεία και τις προσπάθειες για την υγεία των ζώων για την καλύτερη παρακολούθηση και αντιμετώπιση των αναδυόμενων κινδύνων.

- Ενίσχυση της ευαισθητοποίησης των καταναλωτών σχετικά με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην ασφάλεια των τροφίμων, μέσω εκπαιδευτικών προγραμμάτων που ενημερώνουν το κοινό σχετικά με τους τροφιμογενείς κινδύνους.
- Ενίσχυση της επιδημιολογικής επιτήρησης για τον εντοπισμό πρώιμων εστιών τροφιμογενών ασθενειών και ζωνοσογόνων λοιμώξεων, επιτρέποντας ταχύτερες και πιο αποτελεσματικές απαντήσεις.
- Χρήση φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών για τη μείωση της περιβαλλοντικής μόλυνσης και την προστασία των οικοσυστημάτων, τα οποία είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ασφαλούς παραγωγής τροφίμων.

Πίνακας 8: Κλιματική Αλλαγή Και Ασθένειες Από Τρόφιμα σύμφωνα με τη μελέτη των Oyedele et al. (2020).

Θνησιμότητα	Αριθμός ατόμων
Ετήσιες Ασθένειες από Μολυσμένα Τρόφιμα	600.000.000
Ετήσιοι Θάνατοι από Ασθένειες που Μεταδίδονται μέσω Τροφίμων	420.000

Μέγεθος θνησιμότητας



Γράφημα 5: Κλιματική Αλλαγή Και Ασθένειες Από Τρόφιμα βάση των στοιχείων που παρείχαν στην έρευνά τους οι Oyedele et al. (2020).

Κεφάλαιο 4. Συζήτηση

Ο αντίκτυπος της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή φυτικών τροφίμων είναι μια αυξανόμενη ανησυχία, με σημαντικές επιπτώσεις στην παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια, τη φυσιολογία των καλλιεργειών και τη συνολική βιωσιμότητα των γεωργικών συστημάτων. Καθώς οι παγκόσμιες θερμοκρασίες αυξάνονται, η συχνότητα και η σοβαρότητα των ακραίων καιρικών φαινομένων —όπως ξηρασίες, καύσωνες και έντονες βροχοπτώσεις— αποσταθεροποιούν όλο και περισσότερο τις παραδοσιακές γεωργικές πρακτικές. Οι αλλαγές επηρεάζουν όχι μόνο τις αποδόσεις των καλλιεργειών αλλά και τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των γεωργικών συστημάτων.

Μία από τις πιο έντονες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι η διαταραχή της φυσιολογίας των καλλιεργειών. Οι καλλιέργειες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στις

διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, με ακόμη και μικρές αυξήσεις στη θερμότητα να προκαλούν σημαντικό φυσιολογικό στρες. Για παράδειγμα, η θερμική καταπόνηση πυροδοτεί έναν καταρράκτη εσωτερικών αποκρίσεων των φυτών, όπως το κλείσιμο του στομίου, το οποίο μειώνει την απώλεια νερού αλλά περιορίζει επίσης την απορρόφηση του CO₂, απαραίτητου για τη φωτοσύνθεση. Αυτή η μείωση της φωτοσύνθεσης οδηγεί σε μειωμένη ανάπτυξη των φυτών και, τελικά, σε μειωμένες αποδόσεις των καλλιεργειών, επηρεάζοντας τα τρόφιμα σε μεταγενέστερο βαθμό. Οι Hoffman et al. (2021) τόνισαν ότι καλλιέργειες όπως το σιτάρι και ο αραβόσιτος στις μεσογειακές περιοχές αντιμετωπίζουν σοβαρές απώλειες απόδοσης λόγω τέτοιων φυσιολογικών διαταραχών. Ως αποτέλεσμα, οι αγρότες αντιμετωπίζουν μειωμένες αποδόσεις, ιδιαίτερα σε περιοχές που ήδη υποφέρουν από λειψυδρία. Όλο αυτό αντικατοπτρίζει την ευρύτερη πρόκληση της διατήρησης της παραγωγικότητας των καλλιεργειών σε περιοχές που πλήττονται όλο και περισσότερο από την ξηρασία.

Δε θα μπορούσε με τίποτα να μην αναφερθεί ο οικονομικός αντίκτυπος της κλιματικής αλλαγής. Το περιβαλλοντικό κόστος της παραγωγής ενέργειας είναι σημαντικό και πολύπλευρο, επηρεάζοντας τα οικοσυστήματα, τη βιοποικιλότητα και τη σταθερότητα του κλίματος. Η εξόρυξη και η καύση ορυκτών καυσίμων -άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου- απελευθερώνουν μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων του θερμοκηπίου, συμβάλλοντας στην υπερθέρμανση του πλανήτη και στην επιδείνωση της κλιματικής αλλαγής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα έναν καταρράκτη περιβαλλοντικών ζητημάτων, όπως αύξηση της θερμοκρασίας, συχνότερα ακραία καιρικά φαινόμενα και αλλαγές στα πρότυπα βροχοπτώσεων που επηρεάζουν άμεσα τη γεωργία και την παραγωγή τροφίμων. Επιπλέον, η ίδια η διαδικασία εξόρυξης, όπως η εξόρυξη και η γεώτρηση, μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή οικοτόπων, διάβρωση του εδάφους και μόλυνση των πηγών νερού. Ο μακροπρόθεσμος

οικολογικός αντίκτυπος της παραγωγής ενέργειας περιλαμβάνει όχι μόνο την άμεση εκπομπή ρύπων αλλά και δευτερογενείς επιπτώσεις όπως η αύξηση της οξύτητας των ωκεανών και η μείωση της καλλιεργήσιμης γης, απειλώντας την επισιτιστική ασφάλεια και τα φυσικά οικοσυστήματα.

Το οικονομικό κόστος της παραγωγής ενέργειας περιλαμβάνει τόσο άμεσες όσο και έμμεσες δαπάνες, που επηρεάζουν τις εθνικές οικονομίες και τα ατομικά μέσα διαβίωσης. Το άμεσο κόστος περιλαμβάνει τις δαπάνες που σχετίζονται με την εξόρυξη, τη διύλιση και τη διανομή ενεργειακών πόρων, οι οποίες απαιτούν σημαντικές οικονομικές επενδύσεις σε υποδομές, τεχνολογία και εργατικό δυναμικό. Το κόστος μπορεί να είναι ιδιαίτερα επαχθές για τις αναπτυσσόμενες χώρες που ενδέχεται να μην διαθέτουν τα κεφάλαια για την ανάπτυξη βιώσιμης ενεργειακής υποδομής, βασιζόμενες αντ' αυτού σε εισαγόμενα καύσιμα που υπόκεινται σε αστάθεια των τιμών. Το έμμεσο κόστος, όπως οι δαπάνες υγειονομικής περίθαλψης που προκύπτουν από ζητήματα υγείας που σχετίζονται με τη ρύπανση, επιβαρύνουν επίσης σημαντικά τα δημόσια οικονομικά. Επιπλέον, οι οικονομικές επιπτώσεις επεκτείνονται στον αγροτικό τομέα, όπου οι δραστηριότητες με υψηλή κατανάλωση ενέργειας, όπως η άρδευση και η μηχανοποιημένη γεωργία γίνονται πιο δαπανηρές όταν αυξάνονται οι τιμές της ενέργειας, οδηγώντας δυνητικά σε υψηλότερο κόστος παραγωγής και αύξηση των τιμών των τροφίμων.

Το κοινωνικό κόστος της παραγωγής ενέργειας εντείνει περαιτέρω τις προκλήσεις που τίθενται από περιβαλλοντικούς και οικονομικούς παράγοντες. Οι κοινότητες που ζουν κοντά σε χώρους εξόρυξης, διυλιστήρια και σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής υποφέρουν συχνά από υποβαθμισμένη ποιότητα αέρα και νερού, οδηγώντας σε αναπνευστικά προβλήματα, ασθένειες που μεταδίδονται μέσω του νερού και άλλα προβλήματα υγείας. Η έκθεση επηρεάζει δυσανάλογα τους περιθωριοποιημένους και

χαμηλού εισοδήματος πληθυσμούς που μπορεί να μην έχουν τα μέσα να μετακινηθούν ή να υποστηρίξουν την περιβαλλοντική δικαιοσύνη. Το κοινωνικό κόστος εκδηλώνεται επίσης σε ανισορροπίες στην αγορά εργασίας; Ενώ ο ενεργειακός τομέας δημιουργεί ευκαιρίες απασχόλησης, η εξάρτηση από μη ανανεώσιμες πηγές μπορεί να οδηγήσει σε οικονομική αστάθεια όταν οι πόροι εξαντλούνται ή όταν η πολιτική μετατοπίζεται προς πιο πράσινες εναλλακτικές λύσεις. Επιπλέον, η κοινωνική αναταραχή μπορεί να προκύψει από ζητήματα που σχετίζονται με την ενέργεια, όπως οι διαφωνίες γης, ο αναγκαστικός εκτοπισμός λόγω έργων υποδομής και η άνιση κατανομή των ενεργειακών πόρων. Αυτοί οι παράγοντες συμβάλλουν στις κοινωνικοοικονομικές ανισότητες και μειώνουν τη συνολική ποιότητα ζωής, υπογραμμίζοντας τη σημασία της μετάβασης σε πιο βιώσιμες και δίκαιες ενεργειακές πρακτικές.

Εξίσου ανησυχητική είναι η αύξηση της συχνότητας και της έντασης των ακραίων καιρικών φαινομένων. Τα κύματα καύσωνα, για παράδειγμα, όχι μόνο βλάπτουν άμεσα τις καλλιέργειες αλλά και επιδεινώνουν υποκείμενα ζητήματα όπως η υποβάθμιση του εδάφους. Όπως τονίζεται από τους Rajaram et al. (2022), οι διαδοχικοί καύσωνες στη Νότια Ευρώπη έχουν επιταχύνει τη διάβρωση του εδάφους, μειώνοντας την ικανότητα του εδάφους να διατηρεί θρεπτικά συστατικά και να υποστηρίζει την ανάπτυξη των φυτικών προϊόντων. Αυτήν η διάβρωση, που επιδεινώνεται από τις έντονες βροχοπτώσεις που συχνά ακολουθούν τα κύματα καύσωνα, αφαιρεί από το έδαφος τη γονιμότητά του, υπονομεύοντας περαιτέρω τη μακροπρόθεσμη γεωργική παραγωγικότητα. Τα ευρήματα ενισχύουν το επιχείρημα της διατριβής ότι οι ακραίες καιρικές συνθήκες που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή δεν είναι μεμονωμένα γεγονότα αλλά μέρος ενός ευρύτερου κύκλου οικολογικής ζημίας που απειλεί τη βιωσιμότητα των γεωργικών συστημάτων και κατ' επέκταση τα φυτικά προϊόντα.

Εκτός από την καταπόνηση της θερμοκρασίας, η μεταβλητότητα στα πρότυπα βροχόπτωσης αποτελεί σημαντική πρόκληση. Ενώ ορισμένες περιοχές αντιμετωπίζουν παρατεταμένες ξηρασίες, άλλες υπόκεινται όλο και περισσότερο σε έντονες βροχοπτώσεις και πλημμύρες. Τα υδάτινα εδάφη διαταράσσουν την ευαίσθητη ισορροπία που χρειάζονται οι καλλιέργειες για υγιή ανάπτυξη. Οι Palovita και Jarvela (2015) τόνισαν τις επιζήμιες επιπτώσεις των υπερβολικών βροχοπτώσεων στα ριζικά συστήματα των καλλιεργειών, ιδιαίτερα στη Βόρεια Ευρώπη. Όταν τα εδάφη είναι κορεσμένα με νερό, οι ρίζες των φυτών στερούνται οξυγόνου, οδηγώντας σε καθυστερημένη ανάπτυξη και αυξημένο κίνδυνο ασθενειών των ριζών. Αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο για καλλιέργειες όπως οι πατάτες και τα ζαχαρότευτλα, που απαιτούν καλά στραγγιζόμενα εδάφη για βέλτιστη ανάπτυξη. Ο φυσιολογικός αντίκτυπος της υπερχειλίσης, όπως καταδεικνύεται από αυτή την έρευνα, ευθυγραμμίζεται με το ευρύτερο θέμα αυτής της διατριβής: ότι η αλλαγή των καιρικών προτύπων δημιουργεί συνθήκες επιζήμιες τόσο για την υγεία των φυτών όσο και για τη συνολική επισιτιστική ασφάλεια.

Καθώς οι θερμοκρασίες αυξάνονται και τα πρότυπα βροχοπτώσεων γίνονται πιο απρόβλεπτα, οι καλλιέργειες δεν επηρεάζονται μόνο από το άμεσο φυσιολογικό στρες αλλά και από την εξάπλωση ασθενειών των φυτών. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες και η αυξημένη υγρασία δημιουργούν ιδανικές συνθήκες για την ανάπτυξη των παθογόνων μικροοργανισμών. Μυκητιασικές και βακτηριακές ασθένειες, που κάποτε περιορίζονταν σε περιφερειακό επίπεδο, εξαπλώνονται τώρα σε νέες περιοχές καθώς αλλάζει το κλίμα. Αυτό το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα ανησυχητικό για τις βασικές καλλιέργειες που είναι κρίσιμες για την παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια. Οι Sobel και Tippet (2018) σημείωσαν ότι οι υψηλότερες θερμοκρασίες επιτρέπουν σε μυκητιακά παθογόνα όπως το *Fusarium* να επεκτείνουν τη γεωγραφική τους περιοχή,

εκθέτοντας νέες περιοχές και καλλιέργειες σε προηγουμένως αόρατες απειλές. Ο πολλαπλασιασμός αυτών των παθογόνων παραγόντων επιδεινώνει τις απώλειες των καλλιεργειών και δημιουργεί πρόσθετες προκλήσεις για τους αγρότες που πρέπει τώρα να αντιμετωπίσουν πιο συχνές και σοβαρές εστίες φυτικών ασθενειών.

Επιπλέον, καθώς αυτά τα παθογόνα εξαπλώνονται, ασκούν περαιτέρω πίεση στα ήδη καταπονημένα γεωργικά συστήματα. Η αύξηση των παρασίτων και των ασθενειών αναγκάζει τους αγρότες να χρησιμοποιούν περισσότερα φυτοφάρμακα, τα οποία μπορούν να βλάψουν το περιβάλλον και να μειώσουν τη συνολική βιωσιμότητα των γεωργικών πρακτικών. Ο Jordan (2023) επεσήμανε ότι οι υψηλές θερμοκρασίες επιταχύνουν τους κύκλους αναπαραγωγής των παρασίτων, οδηγώντας σε υψηλότερους πληθυσμούς παρασίτων και μεγαλύτερες απώλειες καλλιεργειών κατά τα κρίσιμα στάδια ανάπτυξης. Αυτός ο φαύλος κύκλος της αύξησης της θερμοκρασίας, του πολλαπλασιασμού των παρασίτων και της αυξημένης χρήσης φυτοφαρμάκων υπογραμμίζει τις πολύπλοκες, πολύπλευρες προκλήσεις που θέτει η κλιματική αλλαγή στα φυτικά προϊόντα, που ήταν και το κεντρικό θέμα αυτής της διατριβής.

Παρά αυτές τις ζοφερές πραγματικότητες, υπάρχουν στρατηγικές που μπορούν να βοηθήσουν στον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή φυτικών τροφίμων. Μια βασική προσέγγιση είναι η βελτίωση των τεχνικών διαχείρισης των υδάτων. Σε περιοχές επιρρεπείς στην ξηρασία, πιο αποτελεσματικά συστήματα άρδευσης, όπως η στάγδην άρδευση, μπορούν να βοηθήσουν τους αγρότες να εξοικονομήσουν νερό, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι οι καλλιέργειες λαμβάνουν την απαραίτητη υγρασία για την ανάπτυξη. Οι Hoffman et al. (2021) υποστήριξαν την υιοθέτηση τέτοιων μεθόδων σε περιοχές που πλήττονται από την ξηρασία, σημειώνοντας ότι η στοχευμένη άρδευση μπορεί να μειώσει τη σπατάλη νερού και να ενισχύσει την ανθεκτικότητα των καλλιεργειών στο υδατικό στρες. Με τη

διασταύρωση αυτών των ευρημάτων, αυτή η διατριβή τονίζει τη σημασία της ανάπτυξης προσαρμοστικών γεωργικών πρακτικών που μπορούν να βοηθήσουν στον μετριασμό των κινδύνων που ενέχει η κλιματική αλλαγή.

Εκτός από τη διαχείριση του νερού, η αναπαραγωγή και η γενετική τροποποίηση προσφέρουν ελπιδοφόρες λύσεις για την αύξηση της ανθεκτικότητας των καλλιεργειών. Οι Amorim και Almeida (2024) διερεύνησαν το πώς η επιλεκτική αναπαραγωγή και η γενετική μηχανική θα μπορούσαν να παράγουν καλλιέργειες που είναι καλύτερα εξοπλισμένες για να αντέχουν σε ακραίες καιρικές συνθήκες, όπως η ξηρασία ή η υπερβολική ζέστη. Τέτοιες στρατηγικές είναι ιδιαίτερα κρίσιμες για τη διατήρηση της επισιτιστικής ασφάλειας σε περιοχές που επηρεάζονται δυσανάλογα από την κλιματική αλλαγή, ενισχύοντας το επιχείρημα της διατριβής ότι τα προληπτικά μέτρα είναι απαραίτητα για την προσαρμογή σε ένα αβέβαιο μέλλον.

Ο πολλαπλασιασμός των φυτικών παθογόνων παραγόντων ως άμεση συνέπεια της κλιματικής αλλαγής αποτελεί μια από τις σημαντικότερες απειλές για τη γεωργική βιωσιμότητα και την επισιτιστική ασφάλεια. Καθώς οι θερμοκρασίες αυξάνονται και τα μοτίβα βροχοπτώσεων μετατοπίζονται, οι περιβαλλοντικές συνθήκες που ευνοούν την ανάπτυξη των παθογόνων - υψηλότερες θερμοκρασίες και υψηλότερη υγρασία - γίνονται πιο συνηθισμένες. Όλο αυτό δημιουργεί ιδανικές συνθήκες για την εξάπλωση τόσο ασθενειών από μύκητες όσο και ασθενειών από βακτήρια που καταστρέφουν τις καλλιέργειες και υπονομεύουν την παραγωγή τροφίμων σε παγκόσμια κλίμακα. Η εξάπλωση των παθογόνων παραγόντων, ιδιαίτερα σε περιοχές που δεν είχαν επηρεαστεί στο παρελθόν, δείχνει τον βαθμό στον οποίο η κλιματική αλλαγή αναδιαμορφώνει τα γεωργικά οικοσυστήματα και δημιουργεί νέες προκλήσεις για τους αγρότες.

Μία από τις πιο άμεσες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην υγεία των φυτών είναι η επέκταση του γεωγραφικού εύρους των παθογόνων. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες επιτρέπουν στις ασθένειες να μεταναστεύσουν σε περιοχές όπου προηγουμένως δεν μπορούσαν να επιβιώσουν. Για παράδειγμα, οι Sobel και Tippet (2018) απέδειξαν ότι τα παθογόνα μυκήτων, όπως το *Fusarium*, ευδοκιμούν τώρα σε μεγαλύτερα υψόμετρα και γεωγραφικά πλάτη καθώς το παγκόσμιο κλίμα θερμαίνεται. Η μετατόπιση αυτή αποτελεί σοβαρή πρόκληση για τους αγρότες, ειδικά εκείνους σε περιοχές που δεν χρειαζόταν προηγουμένως να καταπολεμήσουν αυτά τα παθογόνα. Η ξαφνική εμφάνιση νέων ασθενειών σε αυτές τις περιοχές απειλεί τις τοπικές καλλιέργειες και αναγκάζει τους αγρότες να προσαρμοστούν γρήγορα, συχνά με μεγάλο οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος. Η επέκταση των παθογόνων παραγόντων σε νέα εδάφη δεν είναι απλώς ένα τοπικό ζήτημα, αλλά παγκόσμιο, καθώς αποδυναμώνει την ανθεκτικότητα των γεωργικών συστημάτων παγκοσμίως και εντείνει την πίεση στις παγκόσμιες προμήθειες τροφίμων.

Ο πολλαπλασιασμός των παθογόνων είναι ιδιαίτερα ανησυχητικός επειδή συνδυάζει άλλους στρεσογόνους παράγοντες που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή, όπως η ξηρασία και η υποβάθμιση του εδάφους. Καθώς οι καλλιέργειες γίνονται πιο αδύναμες λόγω θερμικής καταπόνησης ή λειψυδρίας, γίνονται πιο ευάλωτες στη μόλυνση. Αυτήν η διπλή απειλή είναι εμφανής στην έρευνα των Caviglioli et al. (2019), η οποία έδειξε πώς ο συνδυασμός της αύξησης της θερμοκρασίας και της υγρασίας δημιουργεί τέλειες συνθήκες για μυκητιάσεις σε καλλιέργειες που ήδη υποβάλλονται σε πίεση από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Η έμφαση της διατριβής στο πώς η κλιματική αλλαγή αποδυναμώνει τη φυσιολογία των καλλιεργειών μέσω της ξηρασίας και της ζέστης υποστηρίζεται άμεσα από αυτά τα ευρήματα. Οι καλλιέργειες που κανονικά θα αντιστέκονταν στις μολύνσεις υποκύπτουν

τώρα σε ασθένειες με πολύ υψηλότερα ποσοστά, ένα φαινόμενο που είναι πιθανό να επιδεινωθεί καθώς το κλίμα συνεχίζει να αλλάζει.

Εκτός από την εξάπλωση των παθογόνων μικροοργανισμών, η κλιματική αλλαγή μετατοπίζει επίσης το χρόνο εμφάνισης των ασθενειών. Πολλά παθογόνα φυτών είναι ευαίσθητα στις εποχιακές αλλαγές θερμοκρασίας και καθώς το κλίμα θερμαίνεται, οι κύκλοι ζωής αυτών των παθογόνων επιταχύνονται. Για παράδειγμα, οι Rajaram et al. (2022) παρατήρησαν πως οι θερμότεροι χειμώνες στη Νότια Ευρώπη έχουν μειώσει τα ποσοστά θανάτωσης ορισμένων παρασίτων και παθογόνων, οδηγώντας σε πιο σοβαρές προσβολές κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Η διαταραχή των παραδοσιακών εποχιακών προτύπων επιδεινώνει την απρόβλεπτη κατάσταση που αντιμετωπίζουν οι αγρότες, καθιστώντας δύσκολο τον σχεδιασμό για τη διαχείριση ασθενειών ή την προσαρμογή των γεωργικών πρακτικών ως απάντηση στις μεταβαλλόμενες συνθήκες. Αυτό αποτελεί ένα βασικό μέλημα της διατριβής, η οποία έχει υποστηρίξει ότι η οικολογική ισορροπία στα γεωργικά συστήματα μεταβάλλεται θεμελιωδώς από την κλιματική αλλαγή.

Μια περαιτέρω επιπλοκή προκύπτει από την αυξανόμενη αντίσταση των παθογόνων στα υπάρχοντα μέτρα ελέγχου. Καθώς οι αγρότες χρησιμοποιούν περισσότερα μυκητοκτόνα και φυτοφάρμακα για την καταπολέμηση της αυξανόμενης απειλής ασθενειών, τα παθογόνα αναπτύσσουν αντοχή σε αυτές τις θεραπείες. Έτσι, δημιουργείται ένας φαύλος κύκλος στον οποίο απαιτούνται ισχυρότερες χημικές ουσίες για να επιτευχθούν τα ίδια αποτελέσματα, οδηγώντας σε μεγαλύτερη περιβαλλοντική ζημιά και μειωμένη βιωσιμότητα. Ο Jordan (2023) επεσήμανε ότι οι επιταχυνόμενοι κύκλοι αναπαραγωγής παρασίτων και παθογόνων παραγόντων, που οδηγούνται από υψηλότερες θερμοκρασίες, έχουν επιταχύνει τον ρυθμό με τον οποίο αναπτύσσεται η αντίσταση. Τα ευρήματα της μελέτης του διασταυρώνονται με την ευρύτερη ανησυχία

της διατριβής για τη βιωσιμότητα των τρεχουσών γεωργικών πρακτικών ενόψει της κλιματικής αλλαγής. Καθώς τα παθογόνα γίνονται πιο ανθεκτικά στα μέτρα ελέγχου, οι αγρότες αναγκάζονται να υιοθετήσουν πιο ακραίες παρεμβάσεις, οι οποίες υποβαθμίζουν περαιτέρω την υγεία του εδάφους και τη βιοποικιλότητα.

Η εξάπλωση των ασθενειών αλληλεπιδρά επίσης με άλλα φαινόμενα που οφείλονται στο κλίμα, όπως η αυξημένη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων. Οι έντονες βροχοπτώσεις, για παράδειγμα, μπορούν να ξεπλύνουν όχι μόνο το επιφανειακό έδαφος που είναι κρίσιμο για την υγεία των φυτών, αλλά και να εξαπλώσουν παθογόνους οργανισμούς που μεταδίδονται μέσω νερού σε ευρύτερες περιοχές. Οι Mangodo et al. (2020) τόνισαν τους τρόπους με τους οποίους οι πλημμύρες και οι καταιγίδες δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη ασθενειών, ιδιαίτερα σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές. Αυτές οι περιοχές, οι οποίες είναι ήδη ευάλωτες στην επισιτιστική ανασφάλεια, αντιμετωπίζουν πρόσθετες προκλήσεις καθώς η κλιματική αλλαγή εντείνει την εξάπλωση των υδατογενών παθογόνων παραγόντων που μπορούν να εξαφανίσουν ολόκληρες καλλιέργειες σε μία μόνο εποχή.

Επιπλέον, η διατριβή προσδιορίζει πώς τα παθογόνα γίνονται πιο επιθετικά καθώς μεταβάλλονται οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι θερμότερες, πιο υγρές συνθήκες ευνοούν τον γρήγορο πολλαπλασιασμό λοιμώξεων που οφείλονται σε βακτήρια και μύκητες που προηγουμένως ήταν λιγότερο καταστροφικές. Οι Vicuña και González (2021) έδειξαν ότι σε περιοχές όπως η Νοτιοανατολική Ασία και η Υποσαχάρια Αφρική, οι καλλιέργειες ρυζιού και αραβοσίτου έχουν δει μια απότομη αύξηση στις μολύνσεις από βακτηρίδια και σκουριές, αντίστοιχα, ως αποτέλεσμα πιο ευνοϊκών συνθηκών για αυτά τα παθογόνα. Η αλλαγή στη συμπεριφορά των παθογόνων είναι σημαντική επειδή υπογραμμίζει το πώς η κλιματική αλλαγή όχι μόνο αυξάνει τον

επιπολασμό των ασθενειών αλλά επίσης μεταβάλλει την ένταση και τη λοιμογόνο δράση τους. Οι καλλιέργειες που κάποτε επιβίωσαν από μικρές μολύνσεις τώρα αποδεκατίζονται από πιο επιθετικά στελέχη παθογόνων, αφήνοντας τους αγρότες με λίγες επιλογές για μετριασμό.

Η διατριβή τονίζει επίσης την κυματιστή επίδραση που έχει ο πολλαπλασιασμός των παθογόνων στην επισιτιστική ασφάλεια. Καθώς οι εστίες ασθενειών γίνονται πιο συχνές και σοβαρές, οι απώλειες καλλιεργειών αυξάνονται, οδηγώντας σε υψηλότερες τιμές των τροφίμων και μειωμένη πρόσβαση σε τρόφιμα, ιδιαίτερα σε περιοχές που ήδη αντιμετωπίζουν επισιτιστική ανασφάλεια. Οι Rajaram et al. (2022) κατέστησαν αυτό το σημείο σαφές τεκμηριώνοντας το πώς τα κρούσματα παθογόνων στη Νότια Ευρώπη έχουν προκαλέσει σημαντικές οικονομικές απώλειες, αυξάνοντας τις τιμές των τροφίμων και μειώνοντας τη διαθεσιμότητα βασικών προϊόντων όπως το σιτάρι και ο αραβόσιτος.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Στο σύνολό της, η μελέτη υπογράμμισε τις βαθιές και πολύπλευρες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή φυτικών τροφίμων. Το βασικό στοιχείο είναι ότι χωρίς σημαντικές στρατηγικές προσαρμογής και την παγκόσμια συνεργασία, οι κίνδυνοι για την παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια θα συνεχίσουν να κλιμακώνονται. Προληπτικά μέτρα όπως η βελτιωμένη διαχείριση των υδάτων, η ανάπτυξη ανθεκτικών στην ξηρασία καλλιεργειών και η ολοκληρωμένη διαχείριση παρασίτων είναι απαραίτητα για τον μετριασμό αυτών των επιπτώσεων.

Επιπλέον, μια στροφή προς πιο βιώσιμες γεωργικές πρακτικές, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον γεωργικό τομέα και της ενίσχυσης της υγείας του εδάφους, θα διαδραματίσει κρίσιμο

ρόλο στη διασφάλιση της μελλοντικής επισιτιστικής ασφάλειας. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής πρέπει να δώσουν προτεραιότητα σε αυτές τις στρατηγικές, ειδικά σε περιοχές που είναι πιο ευάλωτες στην κλιματική αλλαγή. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει επίσης να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και πρακτικών που επιτρέπουν στα γεωργικά συστήματα να προσαρμοστούν αποτελεσματικότερα στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, μειώνοντας ταυτόχρονα το αποτύπωμα άνθρακα στην παραγωγή τροφίμων.

Εκτός από την επιτακτική ανάγκη για στρατηγικές προσαρμογής και μετριασμού, η διπλωματική υπογραμμίζει επίσης τη σημασία της διεθνούς συνεργασίας για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που θέτει η κλιματική αλλαγή στην παραγωγή φυτικών τροφίμων. Η κλιματική αλλαγή είναι ένα παγκόσμιο ζήτημα που ξεπερνά τα σύνορα, πράγμα που σημαίνει ότι οι επιπτώσεις στην παραγωγή τροφίμων σε μια περιοχή μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στις παγκόσμιες αγορές τροφίμων και στο εμπόριο. Οι αναπτυσσόμενες χώρες, οι οποίες συχνά βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στη γεωργία για την οικονομική σταθερότητα και την επισιτιστική ασφάλεια, διατρέχουν ιδιαίτερο κίνδυνο και ενδέχεται να χρειαστούν σημαντική οικονομική και τεχνική υποστήριξη για την εφαρμογή αποτελεσματικών στρατηγικών προσαρμογής. Επιπλέον, οι επενδύσεις στη γεωργική έρευνα και ανάπτυξη είναι κομβικό σημείο για την ανακάλυψη καινοτόμων λύσεων, όπως ποικιλίες καλλιεργειών ανθεκτικές στο κλίμα και βιώσιμες γεωργικές πρακτικές που μπορούν να αντέξουν τις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Μόνο μέσω ενός συνδυασμού τοπικών, εθνικών και παγκόσμιων προσπάθειών μπορούμε να ελπίζουμε ότι θα μετριαστούν οι αρνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα συστήματα τροφίμων και θα διασφαλίσουμε έναν πιο βιώσιμο και ασφαλή εφοδιασμό τροφίμων για τις μελλοντικές γενιές.

Βιβλιογραφία

- Al-Delaimy, W., Ramanathan, V., & Sánchez Sorondo, M. (2020). *Health of people, health of planet and our responsibility: Climate change, air pollution and health* (p. 419). Springer Nature.
- Ali, S., Liu, Y., Ishaq, M., Shah, T., Abdullah, Ilyas, A., & Din, I. U. (2017). *Climate change and its impact on the yield of major food crops: Evidence from Pakistan*. Foods, 6(6), 39.
- Amorim, L., Almeida, F., (2024). *Climate change and food security: A study applied to the milk production chain in Minas Gerais*. Our Knowledge Publishing, 35 – 36.
- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., ... & Zhu, Y. (2015). *Rising temperatures reduce global wheat production*. Nature climate change, 5(2), 143-147.
- Cavicchioli, R., Ripple, J., Timmis, N., Azam, F., Bakken, R., Baylis, M., Behrenfeld, J., Boetius, A., Boyd, W., Classen, T., (2019). *Scientists'*

warning to humanity: Microorganisms and climate change. Nat. Rev. Microbiol. Vol. 17, 569–586.

- Easterling, W.E.; Aggarwal, P.K.; Batima, P.; Brander, K.M.; Erda, L.; Howden, S.M.; Kirilenko, A.; Morton, J.; Soussana, J.-F.; Schmidhuber, J. (2007). *Food, fibre and forest products*. Clim. Chang., 273, 313.
- FAO, (2011). *Energy-smart food for people and climate*. Rome.
- FAOSTAT. 2017. Available online: <http://www.fao.org/faostat/en/#data> (accessed on 2 August 2017).
- Filho, W., Djekic, I., Smetana, S., Kovaleva, M., (2022). *Handbook of Climate Change Across the Food Supply Chain (Climate Change Management)*. Springer, 654 – 655.
- Gary, P., Churchill, L., (2022). *Climate Change and the Built Environment*. American Council of Engineering Companies, 193 – 195.
- Gitz, V., Meybeck, A., Lipper, L., Young, C. D., & Braatz, S. (2016). *Climate change and food security: risks and responses*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Report, 110(2), 3-36.
- Haile, M. G., Wossen, T., Tesfaye, K., & von Braun, J. (2017). *Impact of climate change, weather extremes, and price risk on global food supply*. Economics of Disasters and Climate Change, 1, 1–17.
<https://doi.org/10.1007/s41885-017-0005-2>
- Hellin, J.; Bellon, M.R.; Hearne, S.J. (2014). *Maize landraces and adaptation to climate change in Mexico*. J. Crop Improv., 28, 484–501.
- Hoffmann, M., Koplinka-Loehr, C., Elseman, D., (2021). *Our Changing Menu: Climate Change and the Foods We Love and Need*. Comstock Publishing Associates, 211 – 213.

- Jordan, S., (2023). *The Impact of Global Climate Change on Agriculture and Food Security: Nourishing the Future: Unveiling the Consequences of Global Climate Change for Agriculture and Food Security*.
- Kole, C., Muthamilarasan, M., Henry, R., Edwards, D., Sharma, R., Abberton, M., ... & Prasad, M. (2015). *Application of genomics-assisted breeding for generation of climate resilient crops: progress and prospects*. *Frontiers in plant science*, 6, 563.
- Mangodo, C., Adeyemi, A., Bakpolor, R., Adegboyega, A., (2020). *Impact of microorganisms on climate change: A review*. *World News Nat. Sci.* 31, 36–47.
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). *Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review*. *Sustainability*, 13(3), 1318.
- Manning, W., (2020). *Trees and Global Warming: The Role of Forests in Cooling and Warming the Atmosphere*. Cambridge University Press; 1st edition, 283 – 284.
- Müller, C., Elliott, J., Chryssanthacopoulos, J., Deryng, D., Folberth, C., Pugh, T. A., & Schmid, E. (2015). *Implications of climate mitigation for future agricultural production*. *Environmental Research Letters*, 10(12), 125004.
- Nyerges, C., Begley, E., (2014). *Guide to Wild Foods and Useful Plants*. Chicago Review Press; Second Edition, Second edition, Revised & Updated, 218 – 220.

- Oyedele, O. A., Akinyemi, M. O., Kovač, T., Eze, U. A., & Ezekiel, C. N. (2020). *Food safety in the face of climate change: Consequences for consumers*. Croatian journal of food science and technology, 12(2), 280-286.
- Pavolita, A., Jarvela, M., (2015). *Climate Change Adaptation and Food Supply Chain Management (Routledge Advances in Climate Change Research)*. Routledge; 1st edition, 89 – 90.
- Rajaram, V., Olson, K., Tiede, Lynn, (2022). *Climate Change and Environment : How It Impacts Us All*. Notion Press, 103 – 104.
- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S. S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. (2019). *Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review*. Plants, 8(2), 34.
- Reichle, D., (2019). *The Global Carbon Cycle and Climate Change: Scaling Ecological Energetics from Organism to the Biosphere*. Elsevier; 1st edition, 212 – 213.
- Sebo, J., (2022). *Saving Animals, Saving Ourselves: Why Animals Matter for Pandemics, Climate Change, and other Catastrophes*. Oxford University Press, 199 – 200.
- Sharoni, A.M.; Nuruzzaman, M.; Satoh, K.; Shimizu, T.; Kondoh, H.; Sasaya, T.; Choi, I.-R.; Omura, T.; Kikuchi, S. (2010). *Gene structures, classification and expression models of the AP2/EREBP transcription factor family in rice*. Plant Cell Physiol. 52, 344–360.
- Sears, R., Tucker, C., (2024). *Environmental and Financial Impact of Climate Change and Global Warming: Examination of Fact and Myth, Science and Rhetoric, Problems and Solutions*. Dino James Books, LLC, 144 – 145.

- Sobel, H., Tippet, K., (2018). *Extreme Events: Trends and Risk Assessment Methodologies. In Resilience: The Science of Adaptation to Climate Change*. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 3–12. ISBN 9780128118917.
- Thayer, S., (2023). *Sam Thayer's Field Guide to Edible Wild Plants: of Eastern and Central North America*. Foragers Harvest Press, 381 – 382.
- Tol., R., (2019). *Climate Economics: Economic Analysis of Climate, Climate Change and Climate Policy, Second Edition*. Edward Elgar Publishing; 2nd edition, 99 – 101.
- Tol, R., (2023). *Climate Economics: Economic Analysis of Climate, Climate Change and Climate Policy, Third Edition*. Edward Elgar Publishing; 3rd edition, 113 – 114.
- Vaughan, M. M., Block, A., Christensen, S. A., Allen, L. H., & Schmelz, E. A. (2018). *The effects of climate change associated abiotic stresses on maize phytochemical defenses*. *Phytochemistry Reviews*, 17, 37-49.
- Vicuña, R., González, B., (2021). *The microbial world in a changing environment*. *Rev. Chil. Hist. Nat.* 94, 2.
- Wolfson, R., (2017). *Energy, Environment, and Climate*. W. W. Norton & Company; Third edition, 477 – 478.
- Yadav, S., Redden, R., Hatfield, J., Ebert, A., Hunter, D., (2018). *Food Security and Climate Change*. Wiley-Blackwell; 1st edition, 380 – 382.
- Zhou, J., Deng, Y., Shen, L., Wen, C., Yan, Q., Ning, D., Qin, Y., Xue, K., Wu, L., He, Z., (2016) *Temperature mediates continental-scale diversity of microbes in forest soils*. *Nat. Commun.*, 7-9.