



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Βελτιστοποίηση Στρατηγικών Αμειψισποράς για
Βιώσιμη Γεωργία με Χρήση Τεχνικών Τεχνητής
Ζωής**



Του φοιτητή
Μελά Γεωργίου-Σεραφείμ
Αρ. Μητρώου: 2020094

Επιβλέπων
Αδαμίδης
Παναγιώτης

Τίτλος Δ.Ε. Βελτιστοποίηση Στρατηγικών Αμειψισποράς για Βιώσιμη Γεωργία με Χρήση Τεχνικών Τεχνητής Ζωής

Κωδικός Δ.Ε. 25101

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Μελάς Γεώργιος-Σεραφείμ

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Αδαμίδης Παναγιώτης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 3/2/2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 3/9/2025

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Γεωργίου-Σεραφείμ Μελά που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιοδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Αφιέρωση»

Από καρδιάς θα ήθελα να αφιερώσω την εργασία αυτή στην οικογένειά μου, που με στήριξε έμπρακτα και ηθικά σε κάθε βήμα της πορείας μου όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών. Μεγαλώνοντας σε αγροτική οικογένεια, διδάχτηκα από νωρίς την αξία της γης, της καλλιέργειας και της υπομονής, αξίες που με συνόδευσαν και στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας. Η αγάπη, οι θυσίες και η αδιάκοπη πίστη τους σε μένα αποτέλεσαν την πραγματική δύναμη πίσω από την παρούσα διπλωματική εργασία.

Πρόλογος

Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία επέλεξα να ασχοληθώ με την αμειψισπορά, καθώς αποτελεί μια βασική πρακτική για τη βιώσιμη γεωργία και με ενδιαφέρει ιδιαίτερα λόγω της προσωπικής μου καταγωγής. Προερχόμενος/η από αγροτική οικογένεια, μεγάλωσα βλέποντας από κοντά τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι καλλιεργητές, τόσο στην παραγωγή όσο και στη διατήρηση της γονιμότητας του εδάφους. Έτσι, η ιδέα να αξιοποιήσω σύγχρονες υπολογιστικές μεθόδους, όπως οι εξελικτικοί αλγόριθμοι και η μοντελοποίηση με πράκτορες, για να προσφέρω λύσεις που μπορούν να κάνουν τη γεωργία πιο αποδοτική και βιώσιμη, ήταν για μένα ιδιαίτερα συναρπαστική.

Μέσα από αυτή τη διαδικασία δεν απέκτησα μόνο τεχνικές γνώσεις σε συστήματα τεχνητής ζωής και υπολογιστική νοημοσύνη, αλλά ένιωσα και ότι συμβάλλω σε έναν τομέα που αγγίζει προσωπικά την οικογένειά μου και τον τόπο μου. Το μεγαλύτερο όφελος για εμένα ήταν να δω πώς η έρευνα και η τεχνολογία μπορούν να συνδεθούν με τις πραγματικές ανάγκες των αγροτών, προσφέροντας πρακτικές και βιώσιμες λύσεις για το μέλλον της γεωργίας.

Περίληψη

Η αμειψισπορά αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πρακτικές της βιώσιμης γεωργίας, καθώς ενισχύει τη γονιμότητα του εδάφους, περιορίζει παράσιτα και ασθένειες και μειώνει την εξάρτηση από χημικές εισροές. Ωστόσο, ο σχεδιασμός βέλτιστων στρατηγικών αμειψισποράς είναι πολύπλοκος, καθώς πρέπει να ισορροπεί οικονομικούς, οικολογικούς και κοινωνικούς στόχους. Η παρούσα εργασία αναπτύσσει ένα υπολογιστικό πλαίσιο βασισμένο σε τεχνικές τεχνητής ζωής (Artificial Life), όπως μοντέλα βασισμένα σε πράκτορες, κυτταρικά αυτόματα και εξελικτικούς αλγορίθμους, με στόχο τη βελτιστοποίηση στρατηγικών αμειψισποράς.

Το σύστημα συλλέγει δεδομένα για τις καλλιέργειες, τη σύσταση του εδάφους, το κλίμα και τις διαθέσιμες εισροές, προσομοιώνει τη δυναμική του αγρο-οικοσυστήματος και δημιουργεί εναλλακτικά πλάνα αμειψισποράς. Μέσω πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης αξιολογούνται παράγοντες όπως η απόδοση, η καταστολή παρασίτων, η οικονομική αποδοτικότητα και η μακροπρόθεσμη υγεία του εδάφους. Επιπλέον, αναπτύχθηκε διαδικτυακή εφαρμογή που επιτρέπει σε αγρότες και συμβούλους να εισάγουν στοιχεία για τον αγρό τους και να λαμβάνουν εξατομικευμένες προτάσεις.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι τεχνικές τεχνητής ζωής μπορούν να προσφέρουν αξιόπιστες και πρακτικές λύσεις, υποστηρίζοντας την υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών και μειώνοντας την αβεβαιότητα στη λήψη αποφάσεων. Η εργασία καταδεικνύει τη σημασία της διεπιστημονικής προσέγγισης, γεφυρώνοντας την υπολογιστική μοντελοποίηση με τις πραγματικές ανάγκες της γεωργίας.

Optimization of Crop Rotation Strategies for Sustainable Agriculture Using Artificial Life Techniques

Melas George-Serafeim

Abstract

Crop rotation is a cornerstone of sustainable agriculture, as it enhances soil fertility, reduces pests and diseases, and decreases reliance on chemical inputs. However, designing optimal crop rotation strategies remains challenging, since it must balance economic, ecological, and social objectives. This thesis develops a computational framework based on Artificial Life (ALife) techniques, including agent-based models, cellular automata, and evolutionary algorithms, to optimize crop rotation strategies.

The system integrates data on crops, soil composition, climate, and available inputs, simulating agroecosystem dynamics and generating alternative rotation plans. Through multi-objective optimization, the framework evaluates factors such as yield, pest suppression, economic performance, and long-term soil health. Moreover, a web-based application was implemented, enabling farmers and advisors to input field-specific information and receive customized recommendations.

Results indicate that ALife techniques can provide reliable and practical solutions, supporting the adoption of sustainable practices and reducing uncertainty in decision-making. This work highlights the potential of interdisciplinary approaches, bridging computational modeling with the real-world needs of agriculture, and contributes to the development of resilient and sustainable food production systems.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Παναγιώτη Αδαμίδη, που με εμπιστεύθηκε για την παρούσα διπλωματική εργασία. Η καθοδήγησή του, η διαρκής διαθεσιμότητά του και η άψογη συνεργασία μας έκαναν αυτή την εμπειρία όχι μόνο μια ακαδημαϊκή διαδικασία, αλλά και μια ουσιαστική ευκαιρία μάθησης και εξέλιξης.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iv
Περίληψη	v
Abstract	vi
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα.....	viii
Κατάλογος Σχημάτων	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xi
Συνομογραφίες	xii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	1
1.1 Υπόβαθρο και σημασία του θέματος.....	1
1.2 Σκοπός και στόχοι της εργασίας.....	1
1.3 Μεθοδολογική προσέγγιση.....	2
1.4 Δομή μελέτης	2
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό πλαίσιο	4
2.1 Ορισμοί και έννοιες.....	4
2.1.1 Τι είναι η αμειψισπορά και πως εντάσσεται στη βιώσιμη γεωργία	4
2.1.2 Οφέλη.....	4
2.1.3 Δείκτες και μέτρα αξιολόγησης	5
2.1.4 Περιορισμοί και προκλήσεις στην εφαρμογή.....	6
2.2 Τεχνητή Ζωή	7
2.2.1 Εισαγωγή στην Τεχνητή Ζωή (ALife)	7
2.2.2 Κατηγορίες ALife	7
2.2.3 Κύρια Υπολογιστικά Μοντέλα	8
2.2.4 Τεχνητή Ζωή και Αγρο-οικοσυστημική Μοντελοποίηση	9
2.2.5 Περιορισμοί και Προκλήσεις στη Χρήση ALife στη Γεωργία.....	10
2.2.6 Μελλοντικές Κατευθύνσεις της ALife για Βιώσιμη Γεωργία	10
2.3 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι και Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση.....	11
2.3.1 Εισαγωγή στους Εξελικτικούς Αλγορίθμους	11
2.3.2 Κατηγορίες Εξελικτικών Αλγορίθμων	12
2.3.3 Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση (MOO)	12
2.3.4 Σύνδεση Εξελικτικών Αλγορίθμων με Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση	13
2.3.5 Μελλοντικές Τάσεις και Προκλήσεις	13

2.4	Παρόμοιες Εφαρμογές Μοντέλων Βελτιστοποίησης και Προσομοίωσης στη Γεωργία	14
Κεφάλαιο 3ο:	Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων	16
3.1	Δεδομένα Καλλιεργειών.....	16
3.2	Πηγές Δεδομένων.....	17
3.3	Συλλογή και Ενοποίηση	17
3.4	Εμπειρία του αγρότη	18
Κεφάλαιο 4ο:	Ανάπτυξη του Μοντέλου και της Εφαρμογής	19
4.1	Αρχιτεκτονική Συστήματος.....	19
4.1.1	Frontend.....	19
4.1.2	Backend.....	20
4.1.3	Βάση Δεδομένων.....	21
4.1.4	Κανονικοποίηση και Τυποποίηση.....	21
4.2	Περιγραφή Γενετικού Αλγορίθμου.....	22
4.2.1	Αναπαράσταση λύσης.....	22
4.2.2	Δημιουργία αρχικού πληθυσμού.....	22
4.2.3	Συνάρτηση αξιολόγησης (Fitness Function)	22
4.2.4	Έξοδος.....	23
4.3	Προσομοίωση με Τεχνητή Ζωή.....	23
4.3.1	Αναπαράσταση του Εικονικού Χωραφίου.....	23
4.3.2	Παράσιτα ως Agents.....	24
4.3.3	Κύκλος Προσομοίωσης	24
4.3.4	Αλληλεπίδραση με τον Γενετικό Αλγόριθμο	25
Κεφάλαιο 5ο:	Σχεδίαση και Εφαρμογή Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης	26
5.1	Εισαγωγή στον επιλεγμένο αλγόριθμο	26
5.1.1	Γενική παρουσίαση του Γενετικού Αλγορίθμου	26
5.1.2	Λόγοι επιλογής για το πρόβλημα της αμειψισποράς.....	26
5.1.3	Χρήση της βιβλιοθήκης DEAP.....	27
5.2	Αναπαράσταση στρατηγικών αμειψισποράς	27
5.3	Διαδικασία βελτιστοποίησης	28
5.3.1	Αρχικοποίηση πληθυσμού	28
5.3.2	Επιλογή γονέων	28
5.3.3	Ανασυνδυασμός (Crossover)	28
5.3.4	Μετάλλαξη (Mutation)	28
5.3.5	Κριτήρια τερματισμού	28
5.3.6	Επαναληπτικές δοκιμές και επιλογή βέλτιστων παραμέτρων	28

5.4	Συνάρτηση Καταλληλότητας (Fitness Function).....	29
5.4.1	Σκοπός και ρόλος της fitness function	29
5.4.2	Κριτήρια αξιολόγησης και κανονικοποίηση	29
5.4.3	Στάθμιση και σύνθεση της συνολικής καταλληλότητας	30
5.4.4	Εσωτερική ροή υπολογισμού.....	30
5.4.5	Παράδειγμα λειτουργίας στην πράξη.....	31
Κεφάλαιο 6ο:	Πειραματική Διαδικασία και Σενάρια Προσομοίωσης.....	32
6.1	Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας για την εύρεση κατάλληλων παραμέτρων	32
6.1.1	Πρώτη φάση δοκίμων	32
6.1.2	Δεύτερη φάση δοκίμων.....	34
6.1.3	Τρίτη φάση δοκίμων.....	35
6.2	Διαδικασία δοκίμων σεναρίων	36
6.2.1	Σενάριο 1 – Έδαφος χαμηλής περιεκτικότητας σε θρεπτικά στοιχεία.....	36
6.2.2	6.2.2 Σενάριο 2 – Απουσία άρδευσης	36
Κεφάλαιο 7ο:	Αποτελέσματα και Ανάλυση	37
7.1	Σενάριο 1: Έλλειψη θρεπτικών συστατικών.....	37
7.2	Σενάριο 2: Μηδενική Άρδευση	41
7.3	Συμπεράσματα από τα Αποτελέσματα και την Ανάλυση	44
Κεφάλαιο 8ο:	Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις.....	46
8.1	Συνοπτικά συμπεράσματα της εργασίας.....	46
8.2	Αξιολόγηση του μοντέλου.....	46
8.3	Περιορισμοί της προσέγγισης.....	46
8.4	Σύνδεση με τη σύγχρονη αγροτική πολιτική	47
8.5	Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.....	47
8.6	Μελλοντικές κατευθύνσεις.....	47
8.7	Τελική αποτίμηση.....	48
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	49

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 7.1: Κατανομή καλύτερων fitness σεναρίου 1	38
Σχήμα 7.2: Boxplot καλύτερων fitness σεναρίου 1	39
Σχήμα 7.3: Χρόνοι εκτέλεσης σεναρίου 1	40
Σχήμα 7.4: Γενιές μέχρι τερματισμό σεναρίου 1	40
Σχήμα 7.5: Κατανομή καλύτερων fitness σεναρίου 2	42
Σχήμα 7.6: Boxplot καλύτερων fitness σεναρίου 2	42
Σχήμα 7.7: Χρόνοι εκτέλεσης σεναρίου 2.....	43
Σχήμα 7.8: Γενιές μέχρι τερματισμό σεναρίου 2.....	44

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 6.1: Σετ παραμέτρων που δοκιμάστηκαν για την παραμετροποίηση του εξελικτικού αλγορίθμου.....	33
Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα κάθε σετ παραμέτρων	33
Πίνακας 6.3: Παραλλαγές του σετ 7 στη δεύτερη φάση δοκιμών	34
Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα 20 εκτελέσεων ανά παραλλαγή	35
Πίνακας 6.5: Τελικό σετ παραμέτρων	35

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
Τεχνητή Ζωή	ALife
Cellular Automata	CA
Agent-Based Modelling	ABM
Γενετικοί Αλγόριθμοι	ΓΑ
Γενετικός Προγραμματισμός	ΓΠ
Στρατηγικές Εξέλιξης	ΣΕ
Διαφορική Εξέλιξη	ΔΕ
Εξελικτική Στρατηγική	ΕΣ
Εξελικτικός Προγραμματισμός	ΕΠ
Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση	ΜΟΟ
Προγραμματιζόμενων Κυτταρικών Αυτομάτων	ΡCΑ
Internet of Things	ΙοT
Τεχνητή νοημοσύνη	ΑΙ
Life Cycle Assessment	LCA

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Υπόβαθρο και σημασία του θέματος.

Η αμειψισπορά αποτελεί μία από τις παλαιότερες και πλέον αποδεδειγμένα αποτελεσματικές γεωργικές πρακτικές για την προώθηση της βιώσιμης γεωργίας. Με τον όρο αμειψισπορά περιγράφεται η εναλλαγή διαφορετικών καλλιεργειών στον ίδιο αγρό με σκοπό την μεγιστοποίηση της απόδοσης αλλά και την διατήρηση της ισορροπίας του αγρο-οικοσυστήματος.

Με την εναλλαγή διαφορετικών καλλιεργειών σε μια έκταση διατηρείται ή βελτιώνεται η γονιμότητα του εδάφους, διακόπτονται κύκλοι παρασίτων και ασθενειών, μειώνεται η εξάρτηση από συνθετικά λιπάσματα και ενισχύεται η ανθεκτικότητα του συστήματος στις περιβαλλοντικές πιέσεις. Επιπλέον, η διαφοροποίηση της αμειψισποράς έχει δείξει ότι αυξάνει την παραγωγή, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, συμβάλλοντας σε μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στη βελτίωση της δομής και βιοποικιλότητας του εδάφους. Αντίθετα, η απουσία ενός καλά οργανωμένου πλάνου αμειψισποράς μπορεί να οδηγήσει στην εξάντληση της γονιμότητας του εδάφους, στην αύξηση φυτοπαθολογικών προβλημάτων και στη συσσώρευση ζιζανίων και παρασίτων, καθιστώντας το αγρόκτημα λιγότερο παραγωγικό ή ακόμη και άγονο για αρκετά χρόνια. Τα παραπάνω έχουν τεκμηριωθεί σε πλήθος πρόσφατων μελετών που αφορούν τα οφέλη της αμειψισποράς στην παραγωγικότητα, την υγεία του εδάφους και τη μείωση εισροών, τόσο σε περιβαλλοντικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο.

Παρά τα σαφή οφέλη, η σχεδίαση και εφαρμογή στρατηγικών αμειψισποράς που να είναι ταυτόχρονα αποδοτικές, ανθεκτικές και προσαρμοσμένες σε τοπικές συνθήκες παραμένει πρόκληση. Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις συχνά δεν επαρκούν να συλλάβουν τη δυναμική, τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ καλλιεργειών, εδάφους και περιβάλλοντος, ούτε τους πολλαπλούς αντικρουόμενους στόχους (π.χ. μέγιστη απόδοση σε συνδυασμό με την διατήρηση γονιμότητας). Η ανάγκη για σύνθετες, δεδομένο-καθοδηγούμενες και ευέλικτες μεθοδολογίες έχει οδηγήσει στην ενσωμάτωση υπολογιστικών μοντέλων και τεχνικών τεχνητής ζωής σε γεωργικά συστήματα [1]

1.2 Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Ο κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός υπολογιστικού πλαισίου για τη βελτιστοποίηση στρατηγικών αμειψισποράς, αξιοποιώντας τεχνικές τεχνητής ζωής και πολυκριτηριακής εξελικτικής βελτιστοποίησης. Στόχος είναι η υποστήριξη της λήψης αποφάσεων από τους παραγωγούς και τους γεωργικούς συμβούλους, μέσα από προσαρμοσμένες λύσεις που μεγιστοποιούν την παραγωγή, διατηρούν τη γονιμότητα του εδάφους και μειώνουν την επίδραση των παρασίτων.

Οι επιμέρους στόχοι περιλαμβάνουν:

1. **Σχεδίαση και ανάπτυξη μοντέλου τεχνητής ζωής**
Δημιουργία συστήματος προσομοίωσης (agent-based modeling και/ή cellular automata) που αναπαριστά τη χωρική και χρονική δυναμική καλλιεργειών, εδάφους, παρασίτων και περιβαλλοντικών παραμέτρων.
2. **Ενσωμάτωση πραγματικών και βιβλιογραφικών δεδομένων**
Συλλογή, οργάνωση και προεπεξεργασία δεδομένων για τις καλλιέργειες, τους κύκλους ανάπτυξης, τις θρεπτικές απαιτήσεις, την ευαισθησία σε παράσιτα, καθώς και τις κλιματικές και εδαφικές συνθήκες.
3. **Ανάπτυξη αλγορίθμου πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης**
Εφαρμογή και παραμετροποίηση εξελικτικού αλγορίθμου για τη δημιουργία και αξιολόγηση εναλλακτικών πλάνων αμειψισποράς, λαμβάνοντας υπόψη κριτήρια όπως η υγεία του εδάφους, η καταστολή παρασίτων και η οικονομική απόδοση.

4. Ανάπτυξη εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων

Υλοποίηση διαδραστικής εφαρμογής που επιτρέπει στον χρήστη να εισάγει στοιχεία σχετικά με τον αγρό του, να εκτελεί προσομοιώσεις και να λαμβάνει προσαρμοσμένες προτάσεις βέλτιστων στρατηγικών αμειψισποράς.

5. Αξιολόγηση και επικύρωση του μοντέλου

Έλεγχος της αξιοπιστίας του συστήματος μέσω ανάλυσης ευαισθησίας και, όπου είναι εφικτό, σύγκρισης των αποτελεσμάτων με ιστορικά δεδομένα ή πειραματικές μετρήσεις.

Με την ολοκλήρωση της εργασίας, αναμένεται να έχει δημιουργηθεί ένα πρακτικό και ευέλικτο υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο θα γεφυρώνει τις σύγχρονες υπολογιστικές τεχνικές με τις πραγματικές ανάγκες της βιώσιμης γεωργίας.

1.3 Μεθοδολογική προσέγγιση

Η μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας εργασίας βασίζεται στη συνδυασμένη χρήση της τεχνητής ζωής, της υπολογιστικής προσομοίωσης και της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης για την παραγωγή εξατομικευμένων στρατηγικών αμειψισποράς. Ειδικότερα, η συνολική αρχιτεκτονική περιλαμβάνει ένα διαδραστικό πληροφοριακό σύστημα μέσω διαδικτυακής εφαρμογής (React/TypeScript), στο οποίο ο αγρότης εισάγει τα χαρακτηριστικά του αγρού του: γεωγραφική τοποθεσία (με αυτόματη ανάκτηση κλιματικών δεδομένων), χημική σύσταση του εδάφους (άζωτο, φώσφορος, κάλιο, pH), επιθυμητές καλλιέργειες (από σύνολο 70), χρονικό ορίζοντα σχεδιασμού, επίπεδο εισροών (άρδευση, λίπανση, ψεκασμοί), προηγούμενες καλλιέργειες που καλλιεργήθηκαν στον αγρό, διαθεσιμότητα αγροτικών μηχανημάτων, και δικές του παρατηρήσεις για επιτυχημένους ή αποτυχημένους συνδυασμούς καλλιεργειών.

Στη συνέχεια, τα δεδομένα αποστέλλονται μέσω API (FastAPI) στο backend, όπου υλοποιείται ο υπολογιστικός πυρήνας σε Python. Το σύστημα ενσωματώνει έναν εξελικτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης (DEAP), ο οποίος δημιουργεί και αξιολογεί υποψήφια πλάνα αμειψισποράς. Η αξιολόγηση κάθε πλάνου βασίζεται σε πολυκριτηριακή συνάρτηση καταλληλότητας, η οποία συνυπολογίζει το αναμενόμενο οικονομικό κέρδος (προσαρμοσμένο στην κατάσταση του χωραφιού), τη συμβατότητα με το κλίμα, τους επιθυμητούς ή απαγορευμένους (σύμφωνα με τον αγρότη) συνδυασμούς στο πλάνο, τη διαθεσιμότητα εξοπλισμού, την ορθολογική εναλλαγή καλλιεργειών (ψυχανθή, ριζικό βάθος κ.λπ.), καθώς και τους αποδεδειγμένα αποδοτικούς συνδυασμούς βάσει βιβλιογραφικών πηγών.

Έπειτα, το μοντέλο αξιοποιεί τεχνητή ζωή μέσω προσομοίωσης του αγρού ως δυναμικού περιβάλλοντος, στο οποίο προσομοιώνονται μεταβολές στη γονιμότητα του εδάφους και η παρουσία παρασίτων με τη χρήση πρακτόρων (agents). Οι πράκτορες αλληλεπιδρούν με τις καλλιέργειες και το ιστορικό του αγρού, επηρεάζοντας την εξέλιξη της κατάστασης και τη βαθμολογία των πλάνων, ενσωματώνοντας έτσι μια πιο ρεαλιστική και εξελικτική διάσταση στην προσομοίωση.

Το τελικό αποτέλεσμα είναι η βέλτιστη στρατηγική αμειψισποράς, πλήρως εξατομικευμένη στις ανάγκες και τις δυνατότητες του παραγωγού, η οποία επιστρέφεται στον χρήστη μέσω της διεπαφής.

1.4 Δομή μελέτης

Η εργασία οργανώνεται σε οκτώ κεφάλαια, το καθένα από τα οποία πραγματεύεται μια διαφορετική διάσταση του προβλήματος της βελτιστοποίησης στρατηγικών αμειψισποράς με χρήση τεχνικών τεχνητής ζωής.

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζονται η εισαγωγή, το υπόβαθρο και η σημασία του θέματος, οι στόχοι της έρευνας καθώς και η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε. Εξηγούνται οι λόγοι για τους οποίους η αμειψισπορά αποτελεί κομβικό στοιχείο της βιώσιμης γεωργίας και πώς η υπολογιστική μοντελοποίηση μπορεί να υποστηρίξει τη λήψη αποφάσεων.

Το **Κεφάλαιο 2** αναπτύσσει το θεωρητικό πλαίσιο. Εξετάζονται βασικές έννοιες της αμειψισποράς, οι τύποι και τα οφέλη της, οι δείκτες αξιολόγησης και οι περιορισμοί εφαρμογής της. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η Τεχνητή Ζωή (ALife) και τα υπολογιστικά μοντέλα που σχετίζονται με

αυτήν, δίνοντας έμφαση στα μοντέλα βασισμένα σε πράκτορες και στους Εξελικτικούς Αλγόριθμους. Επιπλέον, αναλύεται η πολύκριτηριακή βελτιστοποίηση και παρατίθενται παρόμοιες εφαρμογές μοντέλων στη γεωργία.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται η διαδικασία συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των καλλιεργειών που ενσωματώθηκαν στο μοντέλο, οι πηγές προέλευσης των δεδομένων και οι μέθοδοι προ-επεξεργασίας τους, ώστε να διασφαλιστεί η ακρίβεια και η χρησιμότητα των αποτελεσμάτων.

Το **Κεφάλαιο 4** εστιάζει στην ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου. Αναλύεται η αρχιτεκτονική του συστήματος, οι βασικές παράμετροι του εξελικτικού αλγορίθμου, οι τελεστές επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης, καθώς και οι μέθοδοι αξιολόγησης που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται η υλοποίηση του συστήματος. Περιγράφεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε, η διαδικτυακή εφαρμογή που δημιουργήθηκε για αλληλεπίδραση με τον χρήστη, καθώς και οι τεχνικές λεπτομέρειες της επικοινωνίας frontend–backend.

Το **Κεφάλαιο 6** αναλύει την πειραματική διαδικασία. Αρχικά, περιγράφονται οι φάσεις δοκιμών που οδήγησαν στην επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων του αλγορίθμου και στη συνέχεια εφαρμόζονται σενάρια προσομοίωσης, όπως η έλλειψη θρεπτικών στοιχείων και η απουσία άρδευσης, ώστε να αξιολογηθεί η πρακτική αποτελεσματικότητα του μοντέλου.

Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Αναλύονται οι αποδόσεις του αλγορίθμου στα διαφορετικά σενάρια, συνοδευόμενες από διαγράμματα και στατιστικά στοιχεία. Γίνεται σχολιασμός των προτεινόμενων πλάνων αμειψισποράς και ερμηνεία της συμπεριφοράς του μοντέλου.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 8** παρατίθενται τα συμπεράσματα της έρευνας και προτείνονται μελλοντικές κατευθύνσεις. Συνοψίζονται τα επιτεύγματα της εργασίας σε σχέση με τους στόχους που τέθηκαν, επισημαίνονται οι περιορισμοί της μεθοδολογίας και προτείνονται πιθανές επεκτάσεις, όπως η ενσωμάτωση περισσότερων καλλιεργειών, πραγματικών δεδομένων και οικονομικών παραμέτρων.

Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό πλαίσιο

2.1 Ορισμοί και έννοιες

2.1.1 Τι είναι η αμειψισπορά και πως εντάσσεται στη βιώσιμη γεωργία

Η αμειψισπορά (crop rotation) είναι η πρακτική διαδοχικής εναλλαγής διαφορετικών καλλιεργειών σε ένα αγροτεμάχιο ανά διαστήματα – συνήθως σε ετήσια βάση – με σκοπό την μεγιστοποίηση της σοδειάς, τη βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους και τη μείωση των φυτοπαθολογικών πιέσεων [2]. Σε αντίθεση με τη μονοκαλλιέργεια, όπου το ίδιο φυτό καλλιεργείται συνεχώς, η αμειψισπορά εισάγει ποικιλία θρεπτικών απαιτήσεων και διαφοροποίησης βιολογικών διεργασιών στο έδαφος.

Αναλυτικότερα η αμειψισπορά αποτελεί έναν από τους βασικότερους άξονες της βιώσιμης γεωργίας, καθώς προάγει την ορθολογική και μακροπρόθεσμα αποδοτική διαχείριση των φυσικών πόρων. Είναι γενικά παραδεκτό πως με την εναλλαγή καλλιεργειών διαφορετικών ειδών, βελτιώνεται η δομή και η βιολογική δραστηριότητα του εδάφους, ενισχύεται η βιοποικιλότητα, ενώ περιορίζεται η εξάρτηση από χημικά λιπάσματα και φυτοπροστατευτικά προϊόντα [3].

Επιπρόσθετα πρέπει να αναφερθεί η ιδιαίτερη σημασία της ενσωμάτωσης ψυχανθών στους κύκλους αμειψισποράς, καθώς συνεισφέρουν στη φυσική αζωτοδέσμευση, μειώνοντας την ανάγκη για εξωτερικές αζωτούχες εισροές. Παράλληλα, η συστηματική εναλλαγή φυτών λειτουργεί ανασταλτικά για την εξάπλωση εντόμων, ζιζανίων και παθογόνων, καθιστώντας την καλλιέργεια πιο ανθεκτική, με λιγότερες παρεμβάσεις. Επομένως, η αμειψισπορά δεν αποτελεί μόνο καλλιεργητική τεχνική, αλλά και στρατηγικό εργαλείο αειφορίας, που ευνοεί τη διατήρηση της εδαφικής γονιμότητας, την προστασία του περιβάλλοντος και την οικονομική βιωσιμότητα της αγροτικής παραγωγής.

Στο συγκεκριμένο σημείο θα αναφερθούμε στους τύπους της αμειψισποράς. Στην πράξη διακρίνονται διάφοροι τύποι αμειψισποράς, ανάλογα με τη σύνθεση και τη χρονική διάταξη των καλλιεργειών:

- **Διαδοχική εναλλαγή:** Η πλέον συνηθισμένη μορφή, όπου δύο ή τρία είδη εναλλάσσονται κυκλικά (π.χ. σιτάρι → λούπινα → καλαμπόκι), επιτυγχάνοντας απλή διαχείριση και μειώνοντας τον κίνδυνο εξάντλησης συγκεκριμένων θρεπτικών στοιχείων [2].
- **Πολυετής αμειψισπορά:** Επεκτείνει το σχήμα σε πάνω από τρεις καλλιέργειες, δημιουργώντας πιο πολύπλοκες ακολουθίες που επαναλαμβάνονται μετά από αρκετά έτη. Τέτοια σχήματα ενισχύουν τη δομική ποικιλία του εδάφους και προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία στη διαχείριση εισροών [3].
- **Αμειψισπορά με ψυχανθή:** Ενσωματώνει είδη όπως κουκιά, φασόλια ή λούπινα, τα οποία μέσω συμβιωτικής αζωτοδέσμευσης εμπλουτίζουν το έδαφος με άζωτο και βελτιώνουν το οργανικό περιεχόμενό του [4].
- **Αμειψισπορά με αγρανάπωση:** Για μια χρονική περίοδο κάποιων μηνών ή ακόμα και ενός έτους ο αγρός μένει χωρίς κύρια καλλιέργεια ή καλύπτεται με φυτά κάλυψης (cover crops), επιτρέποντας την ανάκτηση γονιμότητας και τον έλεγχο διάβρωσης πριν από την επόμενη κύρια καλλιέργεια [1].

2.1.2 Οφέλη

Η αμειψισπορά συνιστά έναν από τους θεμελιώδεις άξονες της αγρο-οικολογικής διαχείρισης, προσφέροντας πολυδιάστατα οφέλη τόσο για τη γεωργική παραγωγή όσο και για τη μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική σταθερότητα. Σύμφωνα με την έρευνα των Bowles et al. (2020) [5], η εναλλαγή καλλιεργειών δεν περιορίζεται μόνο στον περιορισμό των θρεπτικών απωλειών του εδάφους, αλλά ενισχύει ουσιαστικά τη γονιμότητά του, μέσω της αυξημένης προσθήκης οργανικής ύλης και της βελτίωσης της φυσικοχημικής του δομής.

Παράλληλα, η πρακτική της αμειψισποράς οδηγεί σε αύξηση της βιοποικιλότητας, γεγονός που ενισχύει τη σταθερότητα του αγρο-οικοσυστήματος και μειώνει σημαντικά την εμφάνιση επιβλαβών εντόμων και φυτοπαθογόνων οργανισμών. Αυτή η βιολογική ρύθμιση των παρασίτων συμβάλλει στη σταδιακή μείωση της ανάγκης για συνθετικά φυτοφάρμακα και λιπάσματα, προωθώντας έτσι πιο οικολογικά βιώσιμες μορφές φυτοπροστασίας και λίπανσης.

Επιπλέον, η διατήρηση κάλυψης του εδάφους με διαφορετικά είδη φυτών και η βελτίωση του εδαφικού οργανικού άνθρακα συμβάλλουν στη διατήρηση της υγρασίας στο χωράφι και κατά συνέπεια στη μείωση της ανάγκης για αρδευτικό νερό, γεγονός ιδιαίτερα κρίσιμο σε περιοχές με αυξανόμενα προβλήματα λειψυδρίας. Ιδιαίτερης σημασίας είναι και η συμβολή της αμειψισποράς στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των καλλιεργειών σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Σύμφωνα με την έρευνα που αναφέρθηκε παραπάνω, η εφαρμογή συστημάτων αμειψισποράς μείωσε την απώλεια της παραγωγής λόγω ξηρασίας σε ποσοστά που κυμαίνονται από 14% έως και 89,9%, ενώ σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπως σε πειράματα με αραβόσιτο, παρατηρήθηκε αύξηση της απόδοσης κατά 7% σε σχέση με τη μονοκαλλιέργεια.

Πέρα από τα άμεσα αγρονομικά οφέλη, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η αμειψισπορά διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο και στη μετρίαση της κλιματικής αλλαγής. Αναλυτικότερα, η μείωση της χρήσης συνθετικών εισροών συμβάλλει όχι μόνο στη μείωση της ρύπανσης του εδάφους και των υδάτων, αλλά και στη μείωση των εκπομπών ρύπων που συνδέονται με την παραγωγή και μεταφορά λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων. Επιπλέον, η αμειψισπορά προάγει τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα στο έδαφος, ενισχύοντας το απόθεμα οργανικού άνθρακα και συμβάλλοντας έτσι στην αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου μέσω φυσικών μηχανισμών αποθήκευσης άνθρακα.

Τέλος, τα οφέλη της αμειψισποράς αφορούν και τον οικονομική τομέα, καθώς η σταδιακή μείωση της εξάρτησης από ακριβείς εισροές, όπως τα λιπάσματα, τα φυτοφάρμακα και το νερό, οδηγεί σε μείωση του κόστους παραγωγής για τον αγρότη. Αυτό καθιστά την πρακτική όχι μόνο οικολογικά ωφέλιμη, αλλά και οικονομικά αποδοτική, ιδιαίτερα σε μακροχρόνιο ορίζοντα.

2.1.3 Δείκτες και μέτρα αξιολόγησης

Επίσημα και διεθνώς αποδεκτά συστήματα αξιολόγησης ενός σχεδίου αμειψισποράς δεν υπάρχουν ακόμη, καθώς η ετερογένεια των γεωργικών συστημάτων καθιστά δύσκολη τη δημιουργία καθολικών προτύπων. Ωστόσο, η αξιολόγηση της βιωσιμότητας ενός γεωργικού πλάνου, στο οποίο εντάσσεται και η πρακτική της αμειψισποράς, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα από την ανάλυση δεικτών που καλύπτουν τις οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές διαστάσεις της γεωργικής δραστηριότητας.

Σύμφωνα με τους Martínez et al. (2023) [6], η αξιολόγηση της βιώσιμης γεωργίας στηρίζεται σε ένα σύνολο δεικτών που αποτυπώνουν αυτές τις τρεις βασικές διαστάσεις. Αρχικά, η οικονομική διάσταση περιλαμβάνει δείκτες που μετρούν την παραγωγικότητα, την αποδοτικότητα στη χρήση των εισροών και το καθαρό οικονομικό όφελος για τον παραγωγό. Στη συνέχεια, η περιβαλλοντική διάσταση εξετάζει παραμέτρους όπως η κατανάλωση νερού, η χρήση ενέργειας, η διαχείριση των θρεπτικών στοιχείων και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, επισημαίνοντας τη σημασία της προστασίας των φυσικών πόρων και της μείωσης του οικολογικού αποτυπώματος. Τέλος, η κοινωνική διάσταση αφορά δείκτες που σχετίζονται με την αποδοχή και εφαρμοσιμότητα των πρακτικών από τους αγρότες, τη συμβολή τους στην ασφάλεια τροφίμων και την ενίσχυση της τοπικής κοινωνίας.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η χρήση τέτοιων δεικτών παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη βάση για την αξιολόγηση γεωργικών συστημάτων, σε αντίθεση με παραδοσιακές προσεγγίσεις που επικεντρώνονται αποκλειστικά στην παραγωγικότητα ή στο οικονομικό κέρδος. Μέσα από αυτήν την πολυδιάστατη θεώρηση, οι δείκτες λειτουργούν ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων, βοηθώντας στον σχεδιασμό στρατηγικών που επιτυγχάνουν ισορροπία ανάμεσα στη γεωργική απόδοση, την περιβαλλοντική προστασία και τη βιωσιμότητα των αγροτικών κοινοτήτων.

2.1.4 Ανάγκη για βελτιστοποίηση της αμειψισποράς στη βιώσιμη γεωργία

Η βελτιστοποίηση της αμειψισποράς αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για τη βιώσιμη γεωργία, καθώς οι παραδοσιακές πρακτικές καλλιέργειας δεν επαρκούν πλέον μπροστά στις αυξανόμενες περιβαλλοντικές, κοινωνικές και παραγωγικές προκλήσεις. Η απλή εναλλαγή καλλιεργειών, χωρίς επιστημονικά τεκμηριωμένο σχεδιασμό, δεν μπορεί να διασφαλίσει τη μακροπρόθεσμη υγεία του εδάφους ούτε τη σταθερότητα της παραγωγής. Αντίθετα, η προσεκτική επιλογή και αλληλεπίδραση καλλιεργειών, με βάση τις θρεπτικές τους απαιτήσεις, τους κύκλους ζωής τους και την αλληλεπίδρασή τους με το οικοσύστημα, μπορεί να ενισχύσει ουσιαστικά τη γονιμότητα του εδάφους, να περιορίσει τις απώλειες θρεπτικών στοιχείων μέσω απορροής ή έκπλυσης και να μειώσει την εξάρτηση από χημικά λιπάσματα και φυτοπροστατευτικά προϊόντα [46]. Με αυτό τον τρόπο, η αμειψισπορά λειτουργεί όχι μόνο ως καλλιεργητική τεχνική αλλά και ως στρατηγικό εργαλείο οικολογικής ισορροπίας.

Παράλληλα, η ανάγκη για ισορροπία ανάμεσα στην οικονομική παραγωγικότητα και την προστασία του περιβάλλοντος καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη νέων υπολογιστικών εργαλείων και μεθόδων βελτιστοποίησης. Μέσα από πολυκριτηριακές προσεγγίσεις, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη παραμέτρους όπως η μέγιστη παραγωγή, η ελαχιστοποίηση κόστους, η διατήρηση της βιοποικιλότητας και η ανθεκτικότητα στις κλιματικές διακυμάνσεις, μπορεί να υποστηριχθεί ο σχεδιασμός αποτελεσματικών και προσαρμοστικών συστημάτων αμειψισποράς [44].

Επιπλέον, η κλιματική αλλαγή, η συνεχώς αυξανόμενη λειψυδρία και η πίεση για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ενισχύουν την ανάγκη για νέα μοντέλα γεωργικής διαχείρισης που να συνδυάζουν οικολογική βιωσιμότητα και οικονομική αποδοτικότητα [9]. Σε αυτό το πλαίσιο, η χρήση εξελιγμένων μεθόδων βελτιστοποίησης δεν αποτελεί απλώς μια ακαδημαϊκή ή επιστημονική πρόκληση, αλλά και ένα ουσιαστικό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για αγρότες, ερευνητές και φορείς χάραξης πολιτικής. Η συμβολή τους μπορεί να καθορίσει σε μεγάλο βαθμό το κατά πόσο η γεωργία θα μπορέσει να ανταποκριθεί με επιτυχία στις προκλήσεις του 21ου αιώνα, εξασφαλίζοντας βιώσιμα συστήματα παραγωγής τροφίμων.

2.1.5 Περιορισμοί και προκλήσεις στην εφαρμογή

Η εφαρμογή της αμειψισποράς, παρά τα τεκμηριωμένα οφέλη της, συνοδεύεται από σημαντικούς περιορισμούς και προκλήσεις που επηρεάζουν την ευρεία υιοθέτησή της από τους αγρότες. Ένας από τους βασικούς περιορισμούς είναι η έλλειψη τεχνικής γνώσης και κατάλληλης εκπαίδευσης. Πολλοί παραγωγοί δεν διαθέτουν την απαραίτητη πληροφόρηση για το πώς να σχεδιάσουν ένα αποτελεσματικό πλάνο αμειψισποράς, ποια είδη να επιλέξουν ή πώς να συνδυάσουν τις καλλιέργειες ανάλογα με τις ανάγκες του εδάφους και τις τοπικές συνθήκες.

Επιπλέον, η αγροτική πολιτική και τα συστήματα επιδότησης σε πολλές περιπτώσεις δεν ευνοούν την πολυκαλλιέργεια και την εναλλαγή καλλιεργειών, προωθώντας έμμεσα τη μονοκαλλιέργεια, που είναι πιο απλή και προβλέψιμη για την αγορά. Αυτό δημιουργεί ένα οικονομικό αντικίνητρο για την εφαρμογή της αμειψισποράς, ιδίως σε αγρότες μικρής κλίμακας.

Μια εξίσου σημαντική πρόκληση αποτελεί η έλλειψη μηχανημάτων ή εξοπλισμού για την καλλιέργεια ορισμένων ειδών, καθώς και η δυσκολία στη διάθεση προϊόντων που δεν έχουν σταθερή ζήτηση ή εμπορικό ενδιαφέρον στην τοπική αγορά.

Στον τομέα της επιστήμης, μια πρόκληση είναι η δυσκολία τυποποίησης και αξιολόγησης των πλάνων αμειψισποράς, καθώς κάθε περιοχή έχει διαφορετικό μικροκλίμα, τύπο εδάφους και καλλιεργητική παράδοση. Επίσης, οι μακροπρόθεσμες επιδράσεις της πρακτικής χρειάζονται χρόνια για να μετρηθούν με αξιοπιστία, γεγονός που επιβραδύνει τη δημιουργία εθνικών ή διεθνών προτύπων.

Τέλος, σημαντικό εμπόδιο είναι η απροθυμία αλλαγής από αγρότες που έχουν συνηθίσει συγκεκριμένες καλλιέργειες και πρακτικές. Η υιοθέτηση ενός πολυετούς πλάνου εναλλαγής καλλιεργειών προϋποθέτει μακροχρόνιο σχεδιασμό, προσαρμοστικότητα και επένδυση σε γνώσεις και υποδομές.

2.2 Τεχνητή Ζωή

2.2.1 Εισαγωγή στην τεχνητή ζωή (ALife)

Η Τεχνητή Ζωή (Artificial Life, ALife) εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1980 με κύριο εκφραστή τον Christopher Langton, ο οποίος οργάνωσε το πρώτο διεθνές συνέδριο ALife το 1987. Στόχος της επιστήμης αυτής είναι η κατανόηση των θεμελιωδών φαινομένων της ζωής μέσω της αναπαραγωγής τους σε υπολογιστικά, θεωρητικά και εργαστηριακά περιβάλλοντα. Δεν περιορίζεται ωστόσο μόνο στην κατανόηση της υπάρχουσας βιολογίας, αλλά εστιάζει και στη δημιουργία νέων μοντέλων και πειραματικών συστημάτων που παρουσιάζουν μορφές «ζωής» βασισμένες σε απλούς κανόνες ή διαδικασίες.

Η αφητηρία της ALife συνδέεται με τα πρώτα κυτταρικά αυτόματα που πρότεινε ο John von Neumann τη δεκαετία του 1950, τα οποία έθεσαν τα θεμέλια για την εξερεύνηση συστημάτων αυτό-αναπαραγωγής. Το Game of Life του John Conway τη δεκαετία του 1970 ανέδειξε τη δύναμη απλών κανόνων στην παραγωγή σύνθετων μοτίβων. Βασικό κίνητρο της έρευνας αποτελεί η διερεύνηση των μηχανισμών που υπάρχουν στη ζωή, όπως η εξέλιξη μέσω φυσικής επιλογής, η προσαρμοστικότητα σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα και η αναδυόμενη συμπεριφορά που προκύπτει από απλές αλληλεπιδράσεις.

2.2.2 Κατηγορίες ALife

Οι προσεγγίσεις της Τεχνητής Ζωής συνήθως διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, οι οποίες δεν είναι ανταγωνιστικές αλλά αλληλοσυμπληρούμενες: Soft ALife, Hard ALife και Wet ALife.

2.2.2.1 Soft ALife (Υπολογιστικά μοντέλα)

Το Soft ALife αναφέρεται στην υλοποίηση μοντέλων ζωής σε περιβάλλον λογισμικού και περιλαμβάνει μεθόδους όπως τα Κυτταρικά Αυτόματα (Cellular Automata – CA), τα μοντέλα βασισμένα σε πράκτορες (Agent-Based Models – ABM), οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι και οι «Τεχνητές Χημείες» (Artificial Chemistries). Χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος υλοποίησης, υψηλό βαθμό ελέγχου και παραμετροποίησης, δυνατότητα επανάληψης των πειραμάτων και εύκολη κλιμάκωση σε μεγαλύτερα ή πιο σύνθετα σενάρια. Ωστόσο, παρουσιάζει περιορισμούς όπως η απόσταση από τη φυσική πραγματικότητα, η ανάγκη για προσεκτική βαθμονόμηση και επικύρωση με εμπειρικά δεδομένα. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το Soft ALife αποτελεί την κύρια προσέγγιση που αξιοποιείται: το χωράφι μοντελοποιείται είτε ως πλέγμα κελιών (CA) είτε ως σύνολο πρακτόρων (π.χ. φυτά, ζιζάνια, μικροοργανισμοί), ενώ Εξελικτικός Αλγόριθμος εφαρμόζεται για τη βελτιστοποίηση του πλάνου αμειψισποράς [7].

2.2.2.2 Hard ALife (Ενσώματα/Ρομποτικά συστήματα)

Το Hard ALife αφορά την υλοποίηση φυσικών συστημάτων που επιδεικνύουν συμπεριφορές ανάλογες με αυτές της ζωής και περιλαμβάνει τεχνολογίες όπως τα ρομποτικά σμήνη, τα συστήματα μορφολογικού υπολογισμού και τις αυτόνομες πλατφόρμες εξερεύνησης. Το βασικό του πλεονέκτημα βρίσκεται στην αλληλεπίδραση με πραγματικά περιβάλλοντα, καθώς και στην ανάδυση συμπεριφορών που οφείλονται σε θόρυβο και τριβές του φυσικού κόσμου. Παράλληλα, παρουσιάζει περιορισμούς όπως το υψηλό κόστος, τις αυξημένες τεχνικές απαιτήσεις, την περιορισμένη δυνατότητα κλιμάκωσης και τη δυσκολία ακριβών ελέγχων. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το Hard ALife δεν χρησιμοποιείται άμεσα, ωστόσο μπορεί να αποτελέσει μελλοντική κατεύθυνση για εφαρμογές όπως η αυτοματοποιημένη δειγματοληψία εδάφους ή η χρήση ρομποτικών σμηνών για στοχευμένες παρεμβάσεις στο χωράφι [8].

2.2.2.3 Wet ALife (Χημικά/βιολογικά συστήματα)

Το Wet ALife περιλαμβάνει εργαστηριακές προσεγγίσεις όπου χημικά δίκτυα, πρωτοκύτταρα ή συνθετικά βιολογικά κυκλώματα αναπαράγουν ιδιότητες της ζωής, όπως η αυτόοργάνωση και η αναπαραγωγή. Προσφέρει υψηλή πιστότητα στην προσομοίωση φυσικών φαινομένων και τη

δυνατότητα μελέτης των μηχανισμών εμφάνισης της ζωής, ωστόσο απαιτεί εξειδικευμένα εργαστήρια, εγείρει ζητήματα βιοασφάλειας και παρουσιάζει περιορισμένη άμεση μεταφορά των αποτελεσμάτων σε ψηφιακά μοντέλα. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το Wet ALife δεν εφαρμόζεται άμεσα [9].

Τέλος, οι τρεις κατηγορίες της ALife αποτελούν διαφορετικές αλλά συμπληρωματικές οπτικές γωνίες για τη μελέτη και υλοποίηση φαινομένων ζωής. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, η έμφαση δίνεται στη Soft ALife, λόγω της δυνατότητάς της να προσομοιώνει πολύπλοκα αγρο-οικοσυστήματα με ελεγχόμενο και οικονομικό τρόπο. Οι Hard και Wet προσεγγίσεις, αν και δεν αξιοποιούνται πρακτικά σε αυτή τη φάση, λειτουργούν ως πηγή έμπνευσης και παρέχουν μελλοντικές κατευθύνσεις για επαύξηση της ρεαλιστικότητας και της εφαρμοσιμότητας των μοντέλων.

2.2.3 Κύρια υπολογιστικά μοντέλα

Στο τμήμα αυτό παρουσιάζονται τα βασικά υπολογιστικά παραδείγματα της ALife που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση πολύπλοκων, δυναμικών και χωρικά κατανομημένων φαινομένων.

2.2.3.1 Κυτταρικά Αυτόματα και Εφαρμογές

Τα Κυτταρικά Αυτόματα (Cellular Automata – CA) αποτελούν μαθηματικά μοντέλα ικανά να προσομοιώσουν και να αναλύσουν τη συμπεριφορά πολύπλοκων υπολογιστικών συστημάτων μέσω ενός συνόλου προκαθορισμένων κανόνων. Η βασική τους δομή αποτελείται από ένα πλέγμα κελιών, όπου κάθε κελί μπορεί να βρίσκεται σε μία από πεπερασμένο αριθμό καταστάσεων και να αλλάζει την κατάστασή του με βάση την τρέχουσα κατάσταση των γειτονικών του κελιών. Η έννοια εισήχθη τη δεκαετία του 1940 από τον John von Neumann και τον Stanislaw Ulam [10], ενώ αργότερα ο John Conway ανέπτυξε το διάσημο *Game of Life* [11] και ο Stephen Wolfram εισήγαγε τα *Elementary Cellular Automata*, αναλύοντας τη λειτουργία τους μέσα από 256 πιθανούς κανόνες για πλέγματα δύο καταστάσεων με γειτονιά τριών κελιών [12].

Η θεωρητική θεμελίωση των CA βασίζεται σε παραμέτρους όπως η διάσταση του πλέγματος, ο αριθμός πιθανών καταστάσεων κάθε κελιού, ο τύπος γειτονιάς που χρησιμοποιείται, οι συνθήκες ορίου, καθώς και στους κανόνες μετάβασης που καθορίζουν την εξέλιξη του συστήματος ανά γενιά [13]. Η απλή και τακτική δομή τους επιτρέπει παράλληλη επεξεργασία, κατανομημένη λειτουργία και υψηλή επεκτασιμότητα, καθιστώντας τα κατάλληλα για προσομοιώσεις φυσικών, βιολογικών και τεχνολογικών φαινομένων.

Οι εφαρμογές τους εκτείνονται σε ποικίλους τομείς: σχεδίαση και έλεγχος κυκλωμάτων VLSI, παραγωγή ψευδοτυχαίων αριθμών για προσομοιώσεις και κρυπτογραφία, αναγνώριση προτύπων, επεξεργασία και ανάλυση εικόνας [14], καθώς και συστήματα κρυπτογράφησης τύπου stream και block cipher μέσω Προγραμματιζόμενων Κυτταρικών Αυτομάτων (PCA) [15].

Συμπερασματικά, τα CA αποτελούν ισχυρό, ευέλικτο και επεκτάσιμο υπολογιστικό εργαλείο, κατάλληλο για εφαρμογές από την τεχνολογία έως τη φυσική και τη βιολογία.

2.2.3.2 Agent-Based Modelling (ABM)

Το ABM είναι μια υπολογιστική μέθοδος για τη μελέτη πολύπλοκων φαινομένων μέσω μοντέλων που αποτελούνται από αυτόνομους πράκτορες (agents) οι οποίοι αλληλοεπιδρούν σε ένα περιβάλλον [16]. Οι πράκτορες αντιπροσωπεύουν κοινωνικούς δρώντες ή άλλες οντότητες, διαθέτουν αντίληψη, μνήμη, σύνολο ενεργειών και κανόνες που καθορίζουν τη συμπεριφορά τους. Το περιβάλλον μπορεί να είναι ουδέτερο ή να επηρεάζει ενεργά τους πράκτορες.

Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιείται εκτενώς στη μελέτη οικοσυστημάτων, καθώς επιτρέπει την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφορετικών ειδών, των περιβαλλοντικών παραγόντων και της χωρικής κατανομής των πόρων. Στη γεωργία, το ABM μπορεί να μοντελοποιήσει τη συμπεριφορά καλλιεργειών, ζιζανίων, παρασίτων και ωφέλιμων οργανισμών, επιτρέποντας την αξιολόγηση στρατηγικών διαχείρισης, όπως η αμειψισπορά, σε ένα δυναμικό και ρεαλιστικό πλαίσιο [17].

2.2.3.3 Εξελικτικά Συστήματα

Τα Εξελικτικά Συστήματα είναι δυναμικά και προσαρμοστικά συστήματα που ακολουθούν αρχές παρόμοιες με τη φυσική εξέλιξη. Βασίζονται στη δημιουργία ποικιλότητας, την επιλογή και την αναπαραγωγή, ώστε να βελτιώνονται και να προσαρμόζονται σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα [18]. Στο πλαίσιο της Εξελικτικής Υπολογιστικής, περιλαμβάνουν μια σειρά από μεθόδους που αναφέρονται στη συνέχεια:

- **Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ):** Βελτιστοποίηση λύσεων μέσω πληθυσμών που εξελίσσονται με επιλογή, διασταύρωση και μετάλλαξη [19] [20].
- **Γενετικός Προγραμματισμός (ΓΠ):** Εξέλιξη προγραμμάτων ή μαθηματικών εκφράσεων αντί για σταθερές αναπαραστάσεις λύσεων [18].
- **Στρατηγικές Εξέλιξης (ΕΣ):** Συνεχής παραμετρική βελτιστοποίηση με έμφαση σε μεταλλάξεις και επιλογή [18].
- **Διαφορική Εξέλιξη (ΔΕ):** Δημιουργία νέων λύσεων από συνδυασμούς διαφορών μεταξύ υπαρχουσών, ιδανική για συνεχή προβλήματα [21].

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι η εξέλιξή τους συχνά οδηγεί σε φαινόμενα ανάδυσης, όπου προκύπτουν νέες μορφές οργάνωσης και συμπεριφοράς [19]. Εφαρμόζονται σε τομείς όπως η βιολογία, η οικονομία, η ρομποτική, η τεχνητή νοημοσύνη και η βελτιστοποίηση πολύπλοκων προβλημάτων [22].

2.2.3.4 Συστήματα αντίδρασης-διάχυσης

Τα Συστήματα Αντίδρασης-Διάχυσης περιγράφουν την εξέλιξη κατανομών ουσιών ή πληθυσμών στον χώρο και τον χρόνο, συνδυάζοντας την τοπική αντίδραση (χημικές, βιολογικές ή άλλες διεργασίες) με τη χωρική διάχυση (κίνηση από περιοχές υψηλής σε χαμηλή συγκέντρωση). Η μαθηματική τους περιγραφή γίνεται μέσω μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων, με τους όρους διάχυσης να σχετίζονται με τον τελεστή Laplace και τους όρους αντίδρασης να εκφράζουν τους ρυθμούς τοπικών μεταβολών [23]. Οι αλληλεπιδράσεις αυτών των μηχανισμών μπορούν να οδηγήσουν σε σταθερά ή δυναμικά πρότυπα, όπως τα πρότυπα Turing [24]. Οι εφαρμογές τους εκτείνονται στη χημεία (αυτοκαταλυτικές αντιδράσεις, χημικά κύματα), τη βιολογία (ανάπτυξη ιστών, κατανομή χρωστικών, διάδοση ασθενειών), την οικολογία (χωρική κατανομή ειδών) και την τεχνολογία (προσομοίωση και ανάλυση πολύπλοκων συστημάτων) [23].

2.2.4 Τεχνητή ζωή και αγρο-οικοσυστημική μοντελοποίηση

Η εφαρμογή της Τεχνητής Ζωής στην αγρο-οικοσυστημική μοντελοποίηση παρέχει τη δυνατότητα αναπαράστασης με υψηλό βαθμό ρεαλισμού των πολύπλοκων βιολογικών και χωρικών αλληλεπιδράσεων που δημιουργούνται μεταξύ καλλιεργειών, παρασίτων και περιβάλλοντος. Σύμφωνα με τη μελέτη των Li, Xiong και Ding (2007) [25], η αξιοποίηση μοντέλων βασισμένων σε πράκτορες επιτρέπει τη δυναμική προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός αγρο-οικοσυστήματος στο οποίο κάθε οντότητα (π.χ. έντομο ή φυτό) αντιμετωπίζεται ως αυτόνομος πράκτορας με δικά του χαρακτηριστικά, κανόνες κίνησης και μοτίβα αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον του.

Αναλυτικότερα, στο υπολογιστικό μοντέλο που ανέπτυξαν, ο αγρός προσομοιώνεται ως δισδιάστατο πλέγμα κελιών, όπου κάθε κελί αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη χωρική θέση (x, y) και μπορεί να περιέχει είτε καλλιέργεια είτε φυτό-παγίδα. Οι πληθυσμοί παρασίτων τοποθετούνται τυχαία στην αρχή της προσομοίωσης και κινούνται τοπικά, χωρίς να διαθέτουν συνολική εικόνα του αγρού. Η κίνηση τους βασίζεται σε απλούς αλλά οικολογικά ρεαλιστικούς κανόνες: επιλογή του κοντινότερου κελιού με διαθέσιμους πόρους ή παραμονή στο ίδιο κελί όταν η τροφή είναι επαρκής. Η συμπεριφορά κάθε πράκτορα καθορίζεται από παράγοντες όπως η κινητικότητα, η ακτίνα αντίληψης, το προσδόκιμο ζωής και ο ρυθμός αναπαραγωγής, στοιχεία που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τις χωρικές και πληθυσμιακές δυναμικές.

Η έρευνα επικεντρώθηκε ειδικά στο πώς το μέγεθος και το σχήμα των τμημάτων καλλιέργειας επηρεάζουν την κίνηση των παρασίτων προς τις φυτοπαγίδες. Μέσα από συγκριτικά πειράματα σε τρεις διαφορετικές διατάξεις αγρών (50×50 m, 100×25 m και 200×12,5 m), με την ίδια συνολική επιφάνεια

και ίση αναλογία φυτών-παγίδων, διαπιστώθηκε ότι τα είδη με υψηλή κινητικότητα εντοπίζουν και συγκεντρώνονται στις παγίδες πολύ πιο γρήγορα, μειώνοντας αποτελεσματικά την πίεση στην κύρια καλλιέργεια. Αντίθετα, για είδη χαμηλής κινητικότητας, η αύξηση του λόγου περιμέτρου προς επιφάνεια αποδείχθηκε καθοριστική: επιμήκη τμήματα καλλιέργειας παρείχαν περισσότερες «εισόδους» στις παγίδες, αυξάνοντας σημαντικά την αποτελεσματικότητά τους.

Τα αποτελέσματα αυτά υπογραμμίζουν τη χρησιμότητα της ALife και ειδικότερα των ABM ως εργαλείων υποστήριξης αποφάσεων για τη γεωργική διαχείριση. Μέσα από τέτοιες προσομοιώσεις, είναι δυνατή η αξιολόγηση και βελτίωση διαφορετικών στρατηγικών διαχείρισης και χωρικής οργάνωσης της παραγωγής, πριν από την εφαρμογή τους στο πραγματικό πεδίο, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για εκτεταμένες και δαπανηρές δοκιμές. Επιπλέον, η ενσωμάτωση αξιόπιστων οικολογικών και λειτουργικών δεδομένων σε μοντέλα αγροτικής σχεδίασης ενισχύει την ακρίβεια και τη χρησιμότητά τους, προσφέροντας ισχυρά εργαλεία για τον σχεδιασμό λύσεων που προάγουν τη βιωσιμότητα και τη βελτιστοποίηση της γεωργικής παραγωγής.

2.2.5 Περιορισμοί και προκλήσεις στη χρήση ALife στη γεωργία

Παρά την ευρεία δυναμική και τις δυνατότητες που προσφέρει η ALife και ειδικότερα τα μοντέλα βασισμένα σε ABM για την προσομοίωση και βελτιστοποίηση αγρο-οικοσυστημάτων, η πρακτική εφαρμογή τους στη γεωργία συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις. Πιο συγκεκριμένα, μία από τις βασικότερες είναι το υπολογιστικό κόστος και η επεκτασιμότητα. Οι χωρικές προσομοιώσεις μεγάλης κλίμακας απαιτούν υψηλή υπολογιστική ισχύ και σημαντικό χρόνο εκτέλεσης, ειδικά όταν περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό πρακτόρων και λεπτομερείς περιβαλλοντικές διεργασίες [26]. Ακόμη και με τη χρήση σύγχρονων τεχνολογιών παράλληλης επεξεργασίας, η υλοποίηση και συντήρηση τέτοιων μοντέλων παραμένει απαιτητική.

Ένα δεύτερο κρίσιμο ζήτημα αφορά τη μεθοδολογική πολυπλοκότητα. Όπως επισημαίνεται στο *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [27], η ανάπτυξη χωρικών ABM παραμένει δύσκολη για πολλούς ερευνητές και φορείς, καθώς απαιτεί εξειδικευμένες δεξιότητες τόσο στον προγραμματισμό όσο και στην οικολογική μοντελοποίηση. Η ενσωμάτωση χωρικών και χρονικών διαστάσεων, η διαχείριση πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων και η επιλογή κατάλληλων κλιμάκων αποτελούν προκλήσεις που επηρεάζουν την ακρίβεια και τη ρεαλιστικότητα των αποτελεσμάτων.

Στη συνέχεια, η παραμετροποίηση και επικύρωση των μοντέλων αποτελεί επίσης σημαντικό περιορισμό. Οι συμπεριφορικοί κανόνες των πρακτόρων συχνά βασίζονται σε απλουστευμένες ή ειδικά διαμορφωμένες για τη συγκεκριμένη εφαρμογή υποθέσεις, λόγω έλλειψης επαρκών εμπειρικών δεδομένων [28]. Αυτό μπορεί να μειώσει την αξιοπιστία των προβλέψεων και να δυσκολέψει τη γενίκευση των αποτελεσμάτων σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Επιπλέον, η επικύρωση με δεδομένα πεδίου είναι συχνά δύσκολη και χρονοβόρα, καθώς απαιτεί μακροχρόνια παρακολούθηση και συλλογή δεδομένων υπό ποικίλες συνθήκες.

Τέλος, η έλλειψη τυποποιημένων πλαισίων και διαμοιρασμού μοντέλων δυσχεραίνει την επαναληψιμότητα και τη σύγκριση μελετών. Η απουσία κοινού πρωτοκόλλου τεκμηρίωσης, όπως το ODD (Overview, Design concepts, Details) που προτείνεται για οικολογικά ABM, μπορεί να οδηγήσει σε ασάφειες και περιορισμένη αξιοποίηση των μοντέλων από την ερευνητική κοινότητα [29].

Συμπερασματικά, καταλήγουμε ότι η αξιοποίηση της ALife στη γεωργία απαιτεί συνδυασμό τεχνολογικών βελτιώσεων, μεθοδολογικής αυστηρότητας και διεπιστημονικής συνεργασίας. Η ενσωμάτωση πραγματικών δεδομένων, η υιοθέτηση τυποποιημένων πρωτοκόλλων και η ανάπτυξη πιο φιλικών προς τον χρήστη εργαλείων μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την αξιοπιστία και την πρακτική εφαρμογή αυτών των μοντέλων.

2.2.6 Μελλοντικές κατευθύνσεις της ALife για βιώσιμη γεωργία

Η μελλοντική αξιοποίηση της ALife στη βιώσιμη γεωργία αναμένεται να βασιστεί σε έναν συνδυασμό τεχνολογικών και μεθοδολογικών καινοτομιών. Σύμφωνα με τον Assimakopoulos (2024) [30], η ενσωμάτωση αισθητήρων IoT και AI σε υπολογιστικά μοντέλα βασισμένα σε ABM μπορεί να προσφέρει πραγματικό χρόνο παρακολούθησης και προσαρμογή στρατηγικών καλλιέργειας,

βελτιώνοντας τη χρήση πόρων, όπως το νερό και τα λιπάσματα και αυξάνοντας την ανθεκτικότητα σε κλιματικές διακυμάνσεις.

Η κατεύθυνση αυτή ενισχύεται και από τις προτάσεις των Ravaioli et al. (2023) [31], οι οποίοι υπογραμμίζουν τη σημασία του συνδυασμού ABM με Life Cycle Assessment για την αξιολόγηση όχι μόνο της παραγωγικότητας, αλλά και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των αγρο-οικοσυστημάτων. Μέσω αυτής της σύζευξης, οι μελλοντικές εφαρμογές ALife θα μπορούν να παρέχουν πιο ισορροπημένες λύσεις, λαμβάνοντας υπόψη οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια ταυτόχρονα.

Παράλληλα, οι Alonso-Adame et al. (2024) [32] επισημαίνουν ότι τα μοντέλα βασισμένα σε ABM μπορούν να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στη μετάβαση προς πιο βιώσιμα αγρο-τροφικά συστήματα, καθώς έχουν τη δυνατότητα να ενσωματώνουν πολύπλοκες διαδικασίες μοντελοποίησης και αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφορετικών παραγόντων. Μέσα από τη χρήση τέτοιων εργαλείων, μπορούν να αναπαρασταθούν όχι μόνο οι γεωργικές πρακτικές, αλλά και οι κοινωνικοοικονομικές δυναμικές που επηρεάζουν τις αποφάσεις των παραγωγών. Ιδιαίτερα σημαντική θεωρείται η ενεργή εμπλοκή των ενδιαφερόμενων μερών (αγροτών, ερευνητών, φορέων χάραξης πολιτικής) στη διαδικασία σχεδιασμού και αξιολόγησης των σεναρίων καλλιέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, οι στρατηγικές που προκύπτουν έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να γίνουν αποδεκτές και να εφαρμοστούν αποτελεσματικά στην πράξη, καθώς αντανακλούν τις πραγματικές ανάγκες και δυνατότητες των συμμετεχόντων.

Τέλος, όπως αναδεικνύει η πρόσφατη ανάλυση του *Financial Times Tech for Growth Forum* (2025) [33] οι σύγχρονες εξελίξεις στην ΑΙ ανοίγουν νέους δρόμους για τη γεωργία. Η αξιοποίηση εξελιγμένων αλγορίθμων ΑΙ για την πρόγνωση αποδόσεων, την έγκαιρη διάγνωση ασθενειών ή ελλείψεων θρεπτικών, καθώς και για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της καλλιεργητικής διαδικασίας, μπορεί να συνδυαστεί με τα προσαρμοστικά χαρακτηριστικά της ALife. Μέσα από αυτόν τον συνδυασμό, δημιουργείται η προοπτική ανάπτυξης «έξυπνων» αγρο-οικοσυστημάτων, τα οποία θα έχουν τη δυνατότητα να αντιδρούν άμεσα και αποτελεσματικά σε απρόβλεπτες κλιματικές ή βιολογικές μεταβολές. Ένα τέτοιο πλαίσιο δεν ενισχύει μόνο την ανθεκτικότητα των καλλιεργειών, αλλά και τη βιωσιμότητα της γεωργικής παραγωγής, παρέχοντας στους αγρότες εργαλεία υψηλής ακρίβειας και έγκαιρης λήψης αποφάσεων.

Οι παραπάνω προσεγγίσεις καταδεικνύουν ότι η μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα της ALife για τη γεωργία θα κινηθεί προς τη δημιουργία ολοκληρωμένων και διαλειτουργικών πλατφορμών. Ειδικότερα, οι πλατφόρμες αυτές θα συνδυάζουν χωρική προσομοίωση για την αναπαράσταση αγροτικών τοπίων και οικοσυστημάτων, ανάλυση LCA για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών και ενεργειακών επιπτώσεων των καλλιεργητικών πρακτικών, καθώς και προηγμένες τεχνολογίες ΑΙ για την πρόβλεψη, τη βελτιστοποίηση και την προσαρμογή σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Ο στόχος είναι η ανάπτυξη πιο ανθεκτικών και βιώσιμων συστημάτων παραγωγής τροφίμων, τα οποία θα μπορούν να ανταποκρίνονται δυναμικά στις προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής, της μείωσης των φυσικών πόρων και της ανάγκης για αυξημένη διατροφική ασφάλεια.

2.3 Εξελικτικοί αλγόριθμοι και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

2.3.1 Εισαγωγή στους εξελικτικούς αλγορίθμους

Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms – EA) αποτελούν μια κατηγορία μεθόδων βελτιστοποίησης που εμπνέονται από τις αρχές της φυσικής επιλογής και της βιολογικής εξέλιξης [34]. Χρησιμοποιούν μηχανισμούς όπως η επιλογή, η αναπαραγωγή, η μετάλλαξη και ο ανασυνδυασμός, προκειμένου να αναζητήσουν λύσεις σε πολύπλοκα προβλήματα.

Η βασική ιδέα είναι ότι ένας πληθυσμός υποψήφιων λύσεων εξελίσσεται σε διαδοχικές «γενιές». Σε κάθε γενιά, οι καλύτερες λύσεις, σύμφωνα με κάποιο κριτήριο απόδοσης, έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγούν και να δημιουργήσουν απογόνους. Με αυτό τον τρόπο, το σύνολο των λύσεων βελτιώνεται σταδιακά μέχρι να επιτευχθεί ένας αποδεκτός βαθμός ποιότητας ή να ικανοποιηθεί κάποιο προκαθορισμένο κριτήριο τερματισμού [35].

Σε αντίθεση με τις κλασικές μεθόδους βελτιστοποίησης, οι ΕΑ δεν απαιτούν γνώση παραγώγων ή συνεχή μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης, κάτι που τους καθιστά κατάλληλους για προβλήματα με μη γραμμικές, ασυνεχείς ή στοχαστικές συναρτήσεις [36]. Επιπλέον, εξερευνούν ταυτόχρονα πολλές περιοχές του χώρου αναζήτησης, μειώνοντας την πιθανότητα να «κολλήσουν» σε τοπικά βέλτιστα [37].

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι χάρη στην ευελιξία τους, οι ΕΑ βρίσκουν εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα τομέων, από τη μηχανική και τη πληροφορική έως και τη γεωργία, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βελτιστοποίηση στρατηγικών άρδευσης, επιλογή καλλιεργειών ή σχεδιασμό συστημάτων διαχείρισης παρασίτων [38].

2.3.2 Κατηγορίες εξελικτικών αλγορίθμων

Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο αναπαράστασης των λύσεων, τους τελεστές εξέλιξης και την προσέγγιση βελτιστοποίησης που ακολουθούν. Οι βασικότερες κατηγορίες είναι οι εξής:

2.3.2.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ)

Οι ΓΑ αποτελούν την πιο γνωστή και ευρέως χρησιμοποιούμενη μορφή ΕΑ. Βασίζονται στην αναπαράσταση των λύσεων ως «χρωμοσώματα» (συνήθως ακολουθίες δυαδικών ή πραγματικών τιμών) και χρησιμοποιούν τελεστές επιλογής, ανασυνδυασμού και μετάλλαξης. Είναι κατάλληλοι για ποικιλία προβλημάτων βελτιστοποίησης, από μαθηματικές συναρτήσεις έως πολύπλοκα συστήματα σχεδιασμού [39].

2.3.2.2 Γενετικός Προγραμματισμός (ΓΠ)

Στον ΓΠ, οι λύσεις δεν αναπαρίστανται ως ακολουθίες δεδομένων αλλά ως δομές προγραμμάτων ή δέντρων εκτέλεσης. Στόχος είναι η αυτόματη δημιουργία αλγορίθμων ή μαθηματικών εκφράσεων που ικανοποιούν συγκεκριμένα κριτήρια. Ο ΓΠ χρησιμοποιείται συχνά σε αυτόματη ανακάλυψη μοντέλων, ανάλυση δεδομένων και βελτιστοποίηση στρατηγικών. [40]

2.3.2.3 Εξελικτική Στρατηγική (ΕΣ)

Η ΕΣ εστιάζει κυρίως στη βελτιστοποίηση συνεχών παραμέτρων και δίνει έμφαση στη διαδικασία μετάλλαξης, η οποία ρυθμίζεται αυτόματα κατά την εξέλιξη. Χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές και τεχνικά προβλήματα όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια [41].

2.3.2.4 Εξελικτικός Προγραμματισμός (ΕΠ)

Ο ΕΠ μοιάζει με την ΕΣ αλλά επικεντρώνεται περισσότερο στην προσομοίωση της εξελικτικής συμπεριφοράς παρά στη δομή των λύσεων. Συνήθως εφαρμόζεται σε προβλήματα πρόβλεψης, ταξινόμησης και ελέγχου, όπου η προσαρμοστικότητα παίζει κρίσιμο ρόλο [42].

Παρόλο που οι παραπάνω κατηγορίες διαφέρουν σε προσέγγιση, μοιράζονται τον ίδιο πυρήνα φιλοσοφίας: τη χρήση ενός πληθυσμού λύσεων που εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου, με στόχο τη σταδιακή βελτίωση και την προσέγγιση του βέλτιστου.

2.3.3 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση (ΜΟΟ)

Η Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση (Multi-Objective Optimization – ΜΟΟ) αποτελεί ειδικό κλάδο της βελτιστοποίησης όπου πολλαπλοί, συνήθως αντικρουόμενοι, στόχοι προσπαθούν να επιτευχθούν ταυτόχρονα. Στη γεωργία, τέτοιοι στόχοι μπορεί να περιλαμβάνουν την απόδοση της παραγωγής, το οικονομικό κέρδος και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

Η χρήση της ΜΟΟ στην γεωργία επιτρέπει την αναγνώριση ενός συνόλου Pareto λύσεων, δηλαδή εναλλακτικών στρατηγικών όπου δεν υπάρχει μονοσήμαντα «καλύτερη» επιλογή. Αντίθετα, κάθε λύση αντιπροσωπεύει διαφορετικό συμβιβασμό μεταξύ των στόχων. Στη συνέχεια θα αναφέρουμε κάποια παραδείγματα:

- Στο μοντέλο FarmDESIGN για μικτά αγροτο-κτηνοτροφικά συστήματα, βρέθηκαν βέλτιστες διαμορφώσεις αγρών που μεγιστοποιούν το λειτουργικό κέρδος και τη διατήρηση οργανικής ουσίας ενώ παράλληλα ελαχιστοποιούν την εργασία και τις απώλειες αζώτου, καθιστώντας σαφείς τους συμβιβασμούς μεταξύ οικονομίας, εργασίας και περιβαλλοντικής απόδοσης [43].
- Παρόμοια, σε πρόσφατη μελέτη στην Κίνα, μια πολυκριτηριακή προσέγγιση ισορροπεί την απόδοση, τα οικονομικά οφέλη και τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, επιτυγχάνοντας βελτιστοποιημένες στρατηγικές λίπανσης με αναλογία κοπριάς έναντι συνθετικών λιπασμάτων. [44]

Με βάση αυτές τις εφαρμογές αναδεικνύονται οι κύριες προκλήσεις της ΜΟΟ στη γεωργία:

1. Η ταυτόχρονη βελτίωση διαφορετικών στόχων, όπως απόδοσης, κόστους και περιβαλλοντικών επιπτώσεων, απαιτεί εξισορρόπηση ανταγωνιστικών προτεραιοτήτων καθώς η βελτίωση ενός στόχου συχνά συνεπάγεται μείωση της επίδοσης σε κάποιον άλλο.
2. Οι γεωργικές διαδικασίες είναι πολύπλοκες και δυναμικές, με πολλούς παράγοντες (στοιχεία εδάφους, καιρικές συνθήκες, ανθρώπινη παρέμβαση) που επηρεάζουν τα αποτελέσματα και δυσχεραίνουν την ανάλυση.
3. Ο υπολογιστικός φόρτος είναι συχνά μεγάλος, καθώς τα ΜΟΟ μοντέλα έχουν πολυπληθείς στόχους και μεγάλο χώρο αναζήτησης, απαιτώντας αποδοτική σχεδίαση αλγορίθμων και πιθανές προσεγγίσεις όπως surrogate models ή συμμετοχικά εργαλεία.

Γενικότερα, η ΜΟΟ στη γεωργία ανοίγει δρόμους για προσαρμοσμένες, βιώσιμες λύσεις που ισορροπούν οικονομικούς, παραγωγικούς και περιβαλλοντικούς στόχους, προσφέροντας ψήγματα στρατηγικών που μπορούν να συμφωνήσουν με την προτεραιότητα τις τεχνικές που θα ακολουθηθούν και τις δυνατότητες των παραγωγών.

2.3.4 Σύνδεση εξελικτικών αλγορίθμων με πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

Η εφαρμογή ΕΑ στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση βασίζεται στη φυσική ικανότητά τους να διαχειρίζονται πληθυσμούς λύσεων και να εξερευνούν πολλαπλές περιοχές του χώρου αναζήτησης ταυτόχρονα. Αυτό τους καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλους για προβλήματα όπου απαιτείται η προσέγγιση ενός μετώπου Pareto και η ταυτόχρονη ανάλυση εναλλακτικών λύσεων.

Σε αντίθεση με τις κλασικές μεθόδους βελτιστοποίησης, οι οποίες συχνά απαιτούν μετατροπή των πολλαπλών στόχων σε έναν ενιαίο μέσω στάθμισης, οι ΕΑ μπορούν να λειτουργήσουν απευθείας σε πολυκριτηριακό περιβάλλον. Μέσω διαδικασιών επιλογής, αναπαραγωγής και μετάλλαξης, παράγουν ένα ευρύ φάσμα λύσεων που καλύπτουν διαφορετικά σενάρια συμβιβασμών.

Στη γεωργία, αυτή η δυνατότητα έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη. Για παράδειγμα, μελέτη σε αρδευόμενα αγρο-οικοσυστήματα χρησιμοποίησε έναν ΕΑ πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης για να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση νερού και να μεγιστοποιήσει την παραγωγή, παρέχοντας στους αγρότες ένα σύνολο εναλλακτικών στρατηγικών άρδευσης ανάλογα με τις διαθέσιμες πηγές και τις κλιματικές συνθήκες [45].

Η ευελιξία των ΕΑ να χειρίζονται πολύπλοκα, μη γραμμικά και συχνά αβέβαια δεδομένα, σε συνδυασμό με την ικανότητά τους να παράγουν πολλαπλές βέλτιστες λύσεις, τους καθιστά αναντικατάστατο εργαλείο για την πολυκριτηριακή ανάλυση και λήψη αποφάσεων στη γεωργία. Με αυτόν τον τρόπο, γεφυρώνουν το χάσμα ανάμεσα στη θεωρία της ΜΟΟ και στις πρακτικές ανάγκες του γεωργικού τομέα.

2.3.5 Μελλοντικές τάσεις και προκλήσεις

Η εξέλιξη των ΕΑ και της ΜΟΟ ακολουθεί τη ραγδαία πρόοδο στην υπολογιστική ισχύ, την ΑΙ και τη διαχείριση μεγάλων δεδομένων. Στον αγροτικό τομέα, οι ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώνονται όλο και περισσότερο σε συστήματα που ενσωματώνουν δεδομένα πραγματικού

χρόνου, βελτιώνουν την υπολογιστική τους απόδοση και προσφέρουν διαδραστικές δυνατότητες στους χρήστες.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως μία από τις κυριότερες τάσεις είναι η ενσωμάτωση μεθόδων μηχανικής μάθησης και ΑΙ σε αλγορίθμους βελτιστοποίησης. Όπως υπογραμμίζουν οι Wu et al. (2022), τα λεγόμενα “learnable MOEAs” συνδυάζουν τις προβλεπτικές δυνατότητες της μηχανικής μάθησης με την εξελικτική αναζήτηση, οδηγώντας σε πιο ακριβείς και προσαρμοστικές λύσεις. Παράλληλα, η αξιοποίηση δεδομένων από αισθητήρες, δορυφόρους και αγροτικά μηχανήματα ενισχύει την ικανότητα των μοντέλων να ανταποκρίνονται σε μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, στοιχείο που θεωρείται θεμέλιο της γεωργίας ακριβείας [46] [47].

Επίσης η πρόοδος στις τεχνολογίες υπολογιστικού νέφους και υψηλής απόδοσης υπολογιστών επιτρέπει πλέον την ταχύτερη επεξεργασία σύνθετων πολυκριτηριακών προβλημάτων, μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο εύρεσης βέλτιστων λύσεων. Την ίδια στιγμή, αναπτύσσονται διαδραστικά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων που παρουσιάζουν με σαφή τρόπο τους συμβιβασμούς μεταξύ διαφορετικών στόχων (π.χ. κόστους, απόδοσης, περιβαλλοντικής βιωσιμότητας), επιτρέποντας στους παραγωγούς να συμμετέχουν ενεργά στη διαδικασία επιλογής [46].

Από την άλλη πλευρά, οι προοπτικές αυτές συνοδεύονται και από σημαντικές προκλήσεις. Η διαχείριση της αβεβαιότητας που προκαλείται από τις κλιματικές αλλαγές καθιστά δύσκολη τη διατήρηση σταθερής απόδοσης στα μοντέλα. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα των πολυκριτηριακών προβλημάτων, ειδικά όταν περιλαμβάνουν πολλές μεταβλητές και περιορισμούς, αυξάνει τις απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Τέλος, η μεταφορά των ερευνητικών εργαλείων σε πραγματικές γεωργικές εφαρμογές απαιτεί απλοποίηση, αλλά και εκπαίδευση των τελικών χρηστών ώστε να υιοθετήσουν αποτελεσματικά τις νέες τεχνολογίες.

Η κατανόηση και η αντιμετώπιση αυτών των τάσεων και προκλήσεων είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη συστημάτων που συνδυάζουν εξελικτικούς αλγορίθμους και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, προσφέροντας λύσεις που ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες ανάγκες της σύγχρονης γεωργίας.

2.4 Παρόμοιες εφαρμογές μοντέλων βελτιστοποίησης και προσομοίωσης στη γεωργία

Η αξιοποίηση υπολογιστικών μοντέλων βελτιστοποίησης και προσομοίωσης στη γεωργία έχει γνωρίσει σημαντική ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς οι ερευνητές επιδιώκουν να κατανοήσουν καλύτερα τα αγρο-οικοσυστήματα και να αναπτύξουν βιώσιμες στρατηγικές διαχείρισης. Μέσα από τέτοιες προσεγγίσεις, είναι δυνατή η μελέτη πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ καλλιεργειών, εδάφους, θρεπτικών στοιχείων και παρασίτων, αλλά και η αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης πριν αυτά εφαρμοστούν στην πράξη.

Η εργασία του Vereijken (1997) [48] αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατεύθυνσης, προτείνοντας μια συστηματική μεθοδολογία για τον πρωτοτυπικό σχεδιασμό ολοκληρωμένων και οικολογικών γεωργικών συστημάτων (Integrated and Ecological Arable Farming Systems – I/EAFS) σε συνεργασία με πειραματικές φάρμες. Η προσέγγιση αυτή στηρίχθηκε στη στενή αλληλεπίδραση μεταξύ ερευνητών και παραγωγών, με στόχο την από κοινού ανάπτυξη και αξιολόγηση σεναρίων διαχείρισης που να ανταποκρίνονται σε κριτήρια παραγωγικότητας, οικολογικής ισορροπίας και μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας. Η μεθοδολογία του Vereijken ανέδειξε τη σημασία του συνδυασμού επιστημονικής γνώσης και πρακτικής εμπειρίας, προκειμένου να παραχθούν εφαρμόσιμες και αποδεκτές λύσεις.

Σε πιο εξειδικευμένο επίπεδο εργαλείων, οι Dogliotti et al. (2003) [49] ανέπτυξαν το ROTAT, ένα υπολογιστικό εργαλείο για τη συστηματική δημιουργία και αξιολόγηση εναλλακτικών πλάνων αμειψισποράς. Το ROTAT επιτρέπει τον καθορισμό περιορισμών και στόχων, όπως η διαχείριση των θρεπτικών στοιχείων, η διαφοροποίηση των καλλιεργειών και ο περιορισμός των ασθενειών, παράγοντας σύνολα εφικτών ακολουθιών καλλιεργειών που μπορούν να εφαρμοστούν υπό συγκεκριμένες τοπικές συνθήκες. Με τον τρόπο αυτό, υποστηρίζει την πολυκριτηριακή ανάλυση, καθώς οι προτεινόμενες λύσεις μπορούν να αξιολογηθούν ταυτόχρονα ως προς την παραγωγικότητα, τη βιωσιμότητα και τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις.

Η παρούσα εργασία ακολουθεί την ίδια φιλοσοφία δημιουργίας και αξιολόγησης πλάνων αμειψισποράς, διαφοροποιούμενη όμως στην τεχνολογική της υλοποίηση. Ειδικότερα, αξιοποιεί έναν εξελικτικό αλγόριθμο σε συνδυασμό με τεχνικές ALife, ώστε κάθε προτεινόμενο πλάνο να προσομοιώνεται σε ένα εικονικό περιβάλλον με πράκτορες που αναπαριστούν τόσο παρασιτικούς όσο και ωφέλιμους οργανισμούς. Με αυτόν τον τρόπο, η παραγωγικότητα και η βιωσιμότητα δεν εκτιμώνται αποκλειστικά μέσω στατικών κανόνων ή κλασικών προσομοιώσεων, αλλά προκύπτουν δυναμικά από τις αλληλεπιδράσεις καλλιέργειών και περιβάλλοντος. Έπομένως, παρέχονται στον παραγωγό προτάσεις προσαρμοσμένες στα δεδομένα του αγρού του, ενισχύοντας την ακρίβεια και τη χρησιμότητα των αποτελεσμάτων στη λήψη αποφάσεων.

Κεφάλαιο 3ο: Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

Η ποιότητα και η πληρότητα των δεδομένων αποτελούν θεμέλιο λίθο για την ακρίβεια και αξιοπιστία οποιουδήποτε υπολογιστικού μοντέλου. Στην παρούσα εργασία, η ανάπτυξη ενός μοντέλου Εξελικτικού Αλγορίθμου για την επιλογή βέλτιστου πλάνου αμειψισποράς απαιτεί την ενσωμάτωση ενός εκτεταμένου συνόλου πληροφοριών που περιγράφουν τόσο τις καλλιέργειες όσο και το περιβάλλον στο οποίο αυτές αναπτύσσονται. Τα δεδομένα αυτά καλύπτουν κλιματικούς, εδαφικούς, αγρονομικούς και οικονομικούς παράγοντες, καθώς και στοιχεία που σχετίζονται με τη διαχείριση των καλλιεργειών και τις επιπτώσεις τους στο οικοσύστημα.

Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε από συνδυασμό πηγών, συμπεριλαμβανομένων επιστημονικών δημοσιεύσεων, εξειδικευμένων βάσεων δεδομένων, γεωργικών στατιστικών και τεχνικών εγχειριδίων. Στη συνέχεια, τα δεδομένα οργανώθηκαν, ενοποιήθηκαν και προεπεξεργάστηκαν, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά στο μοντέλο. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι τύποι των δεδομένων που συλλέχθηκαν και οι πηγές τους, καθώς και η διαδικασία προεπεξεργασίας που ακολουθήθηκε.

3.1 Δεδομένα καλλιεργειών

Το σύνολο δεδομένων που συγκεντρώθηκε για την ανάπτυξη του μοντέλου περιλαμβάνει 70 διαφορετικές καλλιέργειες, για τις οποίες καταγράφηκαν διαφορα χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πέντε βασικές ομάδες:

1. Γενικά στοιχεία καλλιεργειών:

- Όνομα καλλιέργειας στα Ελληνικά (*crop_name*).
- Βοτανική οικογένεια (*family*) και ευρύτερη ταξινομική τάξη (*order*), χρήσιμες για την εκτίμηση καλών ή κακών ακολουθιών στην αμειψισπορά.
- Ένδειξη αν πρόκειται για ψυχανθή (*ls_legume*), καθώς τα ψυχανθή δεσμεύουν άζωτο και συμβάλλουν στον εμπλουτισμό του εδάφους.
- Το όνομα από το κύριο παράσιτο που επηρεάζει την καλλιέργεια

2. Κλιματικές απαιτήσεις

- Ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία ανάπτυξης (*t_min*, *t_max*).
- Ιδανικό θερμοκρασιακό εύρος για μέγιστη ανάπτυξη (*t_opt_min*, *t_opt_max*).
- Ελάχιστη και μέγιστη βροχόπτωση (*rain_min*, *rain_max*).
- Μήνες σποράς και συγκομιδής στο Μεσογειακό κλίμα (*sowing*, *harvesting*).

3. Εδαφικές και θρεπτικές απαιτήσεις

- Ελάχιστο και μέγιστο pH εδάφους (*ph_min*, *ph_max*).
- Ποσότητες θρεπτικών στοιχείων που αφαιρούνται από το έδαφος λόγω της καλλιέργειας: Άζωτο (*N*), Φώσφορος (*P*), Κάλιο (*K*).
- Μέγιστο βάθος ριζικού συστήματος (*root_depth*).
- Συνολική κατανάλωση νερού κατά τη διάρκεια του κύκλου (*etc_mm*).

4. Παραγωγικά και οικονομικά στοιχεία

- Τιμή πώλησης ανά τόνο στην Ελλάδα (*tonne_price_sell*).
- Κόστος αγοράς σπόρων ανά κιλό ή φυτών (*unit_price*).

- Ποσότητα σπόρων ή φυτών ανά στρέμμα (*units_per_acre*).
- Μέγιστη αναμενόμενη απόδοση ανά στρέμμα (*max_kg_yield_per_acre*).
- Ο απαραίτητος μηχανολογικός εξοπλισμός (*required_machinery*).

5. Δεδομένα υπολειμμάτων και εμπλουτισμού εδάφους

- Ποσοστό φυτικής μάζας που επιστρέφει στο έδαφος μετά τη συγκομιδή (*residue_fraction*).
- Δέσμευση αζώτου μέσω βιολογικής αζωτοδέσμευσης (*N_fix*).
- Επιστροφή θρεπτικών στοιχείων μέσω φυτικών υπολειμμάτων: Άζωτο (*N_ret*), Φώσφορος (*P_ret*), Κάλιο (*K_ret*).

Η καταγραφή όλων αυτών των χαρακτηριστικών επιτρέπει στο μοντέλο να λαμβάνει υπόψη τόσο τις άμεσες παραγωγικές παραμέτρους όσο και τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στο έδαφος και στο οικοσύστημα, στοιχείο κρίσιμο για τη δημιουργία βιώσιμων πλάνων αμειψισποράς.

3.2 Πηγές δεδομένων

Η συλλογή των δεδομένων για τις 70 καλλιέργειες πραγματοποιήθηκε από συνδυασμό πηγών, με στόχο τη διασφάλιση της πληρότητας και της αξιοπιστίας τους. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην αξιοποίηση πληροφοριών που αφορούν τις εδαφοκλιματικές συνθήκες και τις καλλιεργητικές πρακτικές της Ελλάδας, ώστε τα αποτελέσματα του μοντέλου να είναι άμεσα εφαρμόσιμα στην ελληνική γεωργία. Οι βασικές κατηγορίες πηγών περιλαμβάνουν:

- Επιστημονικές Μελέτες και Δημοσιεύσεις: Χρήση άρθρων από διεθνή και ελληνικά επιστημονικά περιοδικά που περιγράφουν αγρονομικά χαρακτηριστικά καλλιεργειών, κλιματικές και εδαφικές απαιτήσεις.
- FAOSTAT: Αξιοποίηση της βάσης δεδομένων του Οργανισμού Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO) για στατιστικά παραγωγής, εμπορικές τιμές και καταναλώσεις πόρων, με φίλτράρισμα των αποτελεσμάτων για την Ελλάδα.
- Διαδικτυακές Πηγές: Συλλογή δεδομένων από ελληνικούς γεωργικούς οργανισμούς, τεχνικά εγχειρίδια και οδηγούς καλλιέργειας του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, καθώς και εμπορικές ιστοσελίδες για στοιχεία κόστους, τιμών και απαιτήσεων εξοπλισμού που αφορούν την ελληνική αγορά.

Ο συνδυασμός αυτών των πηγών επέτρεψε τη δημιουργία ενός εκτενούς και πολυδιάστατου συνόλου δεδομένων, ειδικά προσαρμοσμένου στις ανάγκες και τις ιδιαιτερότητες της ελληνικής γεωργίας, κατάλληλου για χρήση στο μοντέλο Γενετικού Αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στην παρούσα μελέτη.

3.3 Συλλογή και ενοποίηση

Η προεπεξεργασία των δεδομένων ξεκίνησε με τη συγκέντρωση όλων των απαραίτητων πληροφοριών για τις 70 καλλιέργειες από τις πηγές που περιγράφηκαν στην ενότητα 3.2. Δεδομένου ότι οι πληροφορίες προέρχονταν από διαφορετικές πηγές και συχνά βρίσκονταν σε διαφορετικές μορφές (π.χ. αρχεία υπολογιστικών φύλλων, πίνακες σε επιστημονικά άρθρα, διαδικτυακές βάσεις δεδομένων), ήταν απαραίτητη η ενοποίησή τους σε ένα ενιαίο σύνολο.

Η διαδικασία περιλάμβανε τα εξής βήματα:

1. **Συγκέντρωση στοιχείων ανά καλλιέργεια:**
Για κάθε καλλιέργεια συγκεντρώθηκαν όλα τα διαθέσιμα χαρακτηριστικά, όπως κλιματικές απαιτήσεις, εδαφικές και θρεπτικές ανάγκες, οικονομικά δεδομένα και πληροφορίες διαχείρισης.
2. **Εναρμόνιση μορφής δεδομένων:**
Οι τιμές μετατράπηκαν σε κοινές μονάδες μέτρησης όπου αυτό ήταν απαραίτητο (π.χ. °C για

θερμοκρασία, mm για βροχόπτωση, kg/στρ. για θρεπτικά στοιχεία). Αυτό επέτρεψε την άμεση σύγκριση και επεξεργασία όλων των εγγραφών από το μοντέλο.

3. Συμπλήρωση ελλিপών πεδίων:

Όπου ήταν δυνατό, τα ελλιπή δεδομένα συμπληρώθηκαν από εναλλακτικές αξιόπιστες πηγές, ώστε κάθε καλλιέργεια να διαθέτει πλήρες σετ τιμών για όλα τα βασικά χαρακτηριστικά.

4. Ομαδοποίηση σε θεματικές κατηγορίες:

Τα δεδομένα οργανώθηκαν σε λογικές κατηγορίες (γενικά στοιχεία, κλιματικές απαιτήσεις, εδαφικές και θρεπτικές ανάγκες, οικονομικά δεδομένα, υπολείμματα και εμπλουτισμός εδάφους), γεγονός που διευκολύνει τόσο την κατανόηση όσο και την υλοποίηση στο σύστημα βάσης δεδομένων.

Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας ήταν ένα αυτοτελές και αδιαίρετο σύνολο δεδομένων, έτοιμο να μεταφερθεί στη βάση δεδομένων που θα χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση και την ανάκτηση του από τον εξελικτικό αλγόριθμο και τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος.

3.4 Εμπειρία του αγρότη

Ένα από τα πιο κρίσιμα στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη στον σχεδιασμό ενός πλάνου αμειψισποράς είναι η εμπειρία και οι γνώσεις του ίδιου του αγρότη. Η γεωργία αποτελεί έναν τομέα όπου οι μεταβλητοί παράγοντες είναι πολλοί και συχνά απρόβλεπτοι. Μια καλλιέργεια μπορεί να αποδίδει εξαιρετικά σε μία περιοχή, ενώ λίγα χιλιόμετρα πιο μακριά να δίνει πολύ χαμηλότερες αποδόσεις, λόγω διαφορών σε μικροκλίμα, εδαφικών ιδιαιοτητων ή άλλες τοπικών συνθηκών. Επομένως, γι' αυτό το λόγο οι παρατηρήσεις και η εμπειρία του αγρότη είναι ανεκτίμητες στη δημιουργία ενός αποδοτικού πλάνου.

Μέσα από την ιστοσελίδα, όπου ο αγρότης καταχωρεί τα δεδομένα του χωραφιού του για τον σχεδιασμό του πλάνου (αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4), του δίνεται η δυνατότητα να δηλώσει συνδυασμούς καλλιεργειών που έχει παρατηρήσει ότι αποδίδουν, άλλων που δεν αποδίδουν, αλλά και τον βαθμό της απόδοσής τους. Με αυτόν τον τρόπο, η γνώση που προέρχεται από την προσωπική του εμπειρία ενσωματώνεται απευθείας στη διαδικασία.

Τα δεδομένα αυτά είναι εξίσου σημαντικά, αν όχι σημαντικότερα, από τους συνδυασμούς καλλιεργειών που αναφέρονται στις βιβλιογραφικές πηγές, καθώς προέρχονται από πραγματικές δοκιμές στο ίδιο το χωράφι όπου θα εφαρμοστεί το προτεινόμενο πλάνο. Έτσι, το σχέδιο αμειψισποράς δεν παραμένει μόνο θεωρητικά τεκμηριωμένο, αλλά προσαρμόζεται στις πραγματικές ανάγκες και δυνατότητες της εκμετάλλευσης του παραγωγού.

Κεφάλαιο 4ο: Ανάπτυξη του μοντέλου και της εφαρμογής

4.1 Αρχιτεκτονική συστήματος

Η αρχιτεκτονική του συστήματος σχεδιάστηκε με τρόπο ώστε να επιτρέπει την ομαλή ροή δεδομένων από τον χρήστη μέχρι την παραγωγή του βέλτιστου πλάνου αμειψισποράς, αξιοποιώντας τις δυνατότητες των EA και της προσομοίωσης με ALife. Το σύστημα ακολουθεί μια τυπική προσέγγιση client-server και αποτελείται από τέσσερα κύρια υποσυστήματα:

1. **Frontend:** Η διαδραστική διεπαφή χρήστη, υλοποιημένη σε React, μέσω της οποίας ο αγρότης εισάγει τα δεδομένα του χωραφιού και λαμβάνει τις προτάσεις.
2. **Backend:** Ο διακομιστής επεξεργασίας, υπεύθυνος για την εκτέλεση του EA, τη λήψη δεδομένων από εξωτερικές πηγές και την επικοινωνία με τη βάση.
3. **Βάση Δεδομένων:** Η Supabase/PostgreSQL, όπου αποθηκεύονται τα χαρακτηριστικά των καλλιεργειών, των παρασίτων, τα προτεινόμενα πλάνα αμειψισπορών και τα πλάνα των χρηστών.
4. **Εξωτερικά APIs:** Συστήματα όπως το NASA API, που παρέχουν ιστορικά κλιματικά δεδομένα για την περιοχή του χωραφιού.

Η ροή λειτουργίας ξεκινά με την είσοδο δεδομένων από τον χρήστη, τα οποία επεξεργάζονται και εμπλουτίζονται με εξωτερικές πληροφορίες. Στη συνέχεια, το backend αξιοποιεί τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης για να δημιουργήσει πλάνα αμειψισποράς, τα οποία αποθηκεύονται στη βάση και παρουσιάζονται στον χρήστη μέσω του frontend.

4.1.1 Frontend

Το frontend της εφαρμογής αναπτύχθηκε με τη βιβλιοθήκη React. Η συγκεκριμένη τεχνολογία επιλέχθηκε λόγω της ευελιξίας της στην ανάπτυξη διαδραστικών περιβαλλόντων και της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης στοιχείων διεπαφής. Η διεπαφή έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι εύχρηστη, απλή και κατανοητή για τον αγρότη, παρέχοντας σαφή καθοδήγηση σε κάθε στάδιο εισαγωγής των δεδομένων.

Η διαδικτυακή εφαρμογή περιλαμβάνει τις εξής κύριες ενότητες:

- **Αρχική Σελίδα:** Παρουσιάζει τον σκοπό της εφαρμογής και δίνει μια συνοπτική περιγραφή των δυνατοτήτων της.
- **Προφίλ:** Παρέχει βασικές πληροφορίες για τον δημιουργό του συστήματος.
- **Επισκόπηση:** Αναλύει με περισσότερες λεπτομέρειες το έργο, τη μεθοδολογία και τους στόχους του.
- **Πλάνο:** Η κεντρική ενότητα, όπου ο χρήστης εισάγει και προσαρμόζει τα στοιχεία του χωραφιού του:
 1. **Σχεδίαση χωραφιού:** Ο αγρότης σκιαγραφεί τα όρια του χωραφιού σε διαδραστικό χάρτη, από τα οποία υπολογίζεται η συνολική του έκταση.
 2. **Προκαταρκτική πρόταση καλλιεργειών:** Με βάση τα κλιματικά δεδομένα, υπολογίζονται οι πιο κατάλληλες καλλιέργειες για την περιοχή και προτείνονται στον χρήστη.
 3. **Επιλογή καλλιεργειών:** Από τις 70 διαθέσιμες καλλιέργειες, ο αγρότης επιλέγει ποιες θα συμπεριληφθούν στο πλάνο, ορίζει τη διάρκεια (3–10 έτη) και δηλώνει τις δυο προηγούμενες καλλιέργειες που έσπειρε στο χωράφι του (εάν δεν καλλιεργούσε τίποτα πιο πριν αφήνει κενό το πεδίο).
 4. **Δήλωση συνδυασμών:** Ο αγρότης δηλώνει συνδυασμούς καλλιεργειών που έχει παρατηρήσει ότι αποδίδουν ή όχι.

5. Βαθμολόγηση συνδυασμών: Οι συνδυασμοί αξιολογούνται από τον αγρότη μέσω κλίμακας τριών επιπέδων, καταγράφοντας τον βαθμό αποδοτικότητάς τους.

- **Login / Διαχείριση Λογαριασμού:** Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει λογαριασμό, να αποθηκεύει τα πλάνα του και να επανεξετάζει προηγούμενα αποτελέσματα.

Η επικοινωνία με το backend γίνεται μέσω REST API, εξασφαλίζοντας αμφίδρομη μεταφορά δεδομένων και δυναμική ενημέρωση του περιβάλλοντος χρήστη σε πραγματικό χρόνο.

4.1.2 Backend

Το backend της εφαρμογής αναπτύχθηκε σε Python. Ο ρόλος του backend είναι να διαχειρίζεται την αμφίδρομη επικοινωνία με το frontend, να αντλεί εξωτερικά δεδομένα, να επεξεργάζεται τις εισόδους του χρήστη και να εκτελεί τον ΕΑ για τη δημιουργία βέλτιστων πλάνων αμειψισποράς. Για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ frontend και backend χρησιμοποιήθηκε το framework FastAPI το οποίο προσφέρει υψηλές επιδόσεις και ευκολία στην υλοποίηση RESTful υπηρεσιών.

Η βασική λειτουργικότητα του backend περιλαμβάνει:

4.1.2.1 Λήψη δεδομένων χρήστη:

Καθώς ο αγρότης συμπληρώνει τη φόρμα στο frontend και σκιαγραφεί το χωράφι του στον χάρτη, τα δεδομένα αυτά αποστέλλονται στο backend.

4.1.2.2 Κλήση στο NASA API:

Με τη λήψη των συντεταγμένων του χωραφιού, το backend εκτελεί αυτόματα αίτημα στο NASA API για να αντλήσει κλιματικά δεδομένα των τελευταίων δέκα ετών για την περιοχή. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν:

- Μέση ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία ανά μήνα.
- Μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm).
- Μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή (evap).
- Μέση σχετική υγρασία (rh).

4.1.2.3 Μετατροπή μονάδων θρεπτικών στοιχείων:

Οι τιμές του αζώτου (N), του φωσφόρου (P) και του καλίου (K) ζητούνται από τον αγρότη στις ίδιες μονάδες που χρησιμοποιούνται συνήθως στις εργαστηριακές αναλύσεις εδάφους, δηλαδή σε g/kg για το άζωτο και σε mg/kg για τον φώσφορο και το κάλιο. Η επιλογή αυτή έγινε επειδή δεν υπάρχει κάποια αξιόπιστη πηγή, βάση δεδομένων ή διαθέσιμο API που να παρέχει την περιεκτικότητα του εδάφους σε θρεπτικά στοιχεία για μια συγκεκριμένη περιοχή. Ακόμη και αν υπήρχε, θα ήταν προτιμότερο τα δεδομένα να εισάγονται από τον ίδιο τον αγρότη έπειτα από εργαστηριακή ανάλυση του χωραφιού του, ώστε το πλάνο καλλιέργειας να στηρίζεται σε πιο ρεαλιστικά και ακριβή δεδομένα. Το backend του συστήματος αναλαμβάνει την τυποποίηση αυτών των τιμών, μετατρέποντάς τες σε κιλά ανά στρέμμα (kg/στρ.), ώστε να είναι συμβατές με τα δεδομένα της βάσης και να ανταποκρίνονται στις ανάγκες του μοντέλου βελτιστοποίησης.

4.1.2.4 Ανάκτηση δεδομένων καλλιεργειών από Supabase:

Το backend δεν αποθηκεύει τα στοιχεία χωραφιού, αντλεί μόνο τα απαραίτητα χαρακτηριστικά των επιλεγμένων καλλιεργειών (κλιματικές/εδαφικές απαιτήσεις, οικονομικά, μηχανήματα, παράσιτα κλπ) από τη Supabase.

4.1.2.5 Εκτέλεση του Γενετικού Αλγορίθμου:

Όλα αυτά τα δεδομένα που αναφέρθηκαν τροφοδοτούν τον ΕΑ, ο οποίος παράγει το καταλλήτερο πλάνο αμειψισποράς σύμφωνα με τα κριτήρια βελτιστοποίησης του συστήματος.

4.1.2.6 Επιστροφή αποτελεσμάτων στο Frontend:

Το backend επιστρέφει στο frontend τα αποτελέσματα σε δομημένη μορφή (JSON), τα οποία εμφανίζονται στον χρήστη στο profil του. Στο profil κάθε χρήστη υπάρχει ένας πίνακας που αναγράφονται ιστορικά όλα τα πλανά αμειψισποράς του χρήστη, την διάρκεια τους σε χρόνια και την ημερομηνία δημιουργίας τους.

4.1.3 Βάση Δεδομένων

Για την αποθήκευση και διαχείριση των δεδομένων που συλλέχθηκαν, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μια σχεσιακή βάση δεδομένων στο Supabase, βασισμένη στο σύστημα PostgreSQL. Η βάση είναι πλήρως κανονικοποιημένη, ώστε να αποφεύγεται η επανάληψη πληροφορίας και να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα των δεδομένων. Ο κεντρικός πίνακας είναι ο crops, με το crop_id να χρησιμοποιείται ως πρωτεύον κλειδί για τη σύνδεση με όλους τους υπόλοιπους πίνακες.

Οι βασικοί πίνακες και οι λειτουργίες τους είναι οι εξής:

- **crops:** περιέχει το όνομα κάθε καλλιέργειας, την οικογένεια, την πληροφορία αν είναι ψυχανθής ή όχι, το μέγιστο βάθος ριζών (cm), τις ανάγκες σε νερό (mm) και τους μήνες σποράς και συγκομιδής.
- **crop_climate:** καταγράφει κλιματικές παραμέτρους όπως όρια θερμοκρασίας, βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης, ελάχιστη και μέγιστη βροχόπτωση, pH εδάφους.
- **crop_economics:** περιλαμβάνει οικονομικά δεδομένα όπως τιμή πώλησης (€/τόνο), κόστος σπόρου/φυτού, ποσότητα σποράς ανά στρέμμα και μέγιστη απόδοση (kg/στρέμμα).
- **crop_nutrients:** αποτυπώνει τις ποσότητες N, P και K που αφαιρούνται από το έδαφος κατά τον κύκλο καλλιέργειας.
- **residue_returns:** περιέχει τα ποσοστά θρεπτικών στοιχείων που επιστρέφονται στο έδαφος μετά τη συγκομιδή.
- **pests** και **crop_pests:** καταγράφουν τα παράσιτα και την αντιστοίχισή τους με τις καλλιέργειες.
- **soils** και **crop_soils:** περιέχουν τους εδαφικούς τύπους και τις αντιστοιχίσεις τους με τις καλλιέργειες.
- **required_machinery** και **crop_machinery:** περιλαμβάνουν τα απαραίτητα μηχανήματα για κάθε καλλιέργεια και τις αντίστοιχες συσχετίσεις τους.
- **beneficial_rotations:** αποθηκεύει συνδυασμούς καλλιεργειών που θεωρούνται αποδοτικοί σύμφωνα με επιστημονικές πηγές (έως 5 διαδοχικές καλλιέργειες).
- **crop_plans:** καταγράφει τα πλάνα αμειψισποράς που δημιουργούν οι χρήστες, συνδεδεμένα με το user_id, τη λίστα καλλιεργειών, τη διάρκεια σε έτη και την ημερομηνία δημιουργίας.

Η συγκεκριμένη δομή επιτρέπει ευέλικτη και επεκτάσιμη διαχείριση δεδομένων, διευκολύνοντας τόσο την τροφοδότηση του ΕΑ με τις απαραίτητες πληροφορίες όσο και τη μελλοντική ενσωμάτωση νέων καλλιεργειών, παρασίτων ή εδαφικών τύπων.

4.1.4 Κανονικοποίηση και Τυποποίηση

Κατά τη δημιουργία της βάσης δεδομένων εφαρμόστηκαν αρχές κανονικοποίησης με σκοπό την αποφυγή επαναλαμβανόμενων εγγραφών και την εξασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων. Κάθε σύνολο πληροφορίας αποθηκεύεται μόνο μία φορά σε εξειδικευμένο πίνακα και συνδέεται με τις υπόλοιπες οντότητες μέσω ξένων κλειδίων. Για παράδειγμα, τα παράσιτα αποθηκεύονται στον πίνακα pests, ενώ η συσχέτισή τους με τις καλλιέργειες γίνεται μέσω του πίνακα crop_pests, αποφεύγοντας έτσι την επανάληψη ονομάτων ή περιγραφών σε πολλαπλά σημεία.

Παράλληλα, εφαρμόστηκε τυποποίηση των δεδομένων ώστε να διασφαλίζεται η συνέπεια και η εύκολη επεξεργασία τους από τον ΕΑ. Όλες οι μετρήσεις εκφράζονται σε κοινές και διεθνώς

αποδεκτές μονάδες (°C για θερμοκρασία, mm για βροχόπτωση, kg/στρέμμα για θρεπτικά στοιχεία και αποδόσεις). Επίσης οι τύποι δεδομένων στη βάση έχουν οριστεί σύμφωνα με τη φύση της πληροφορίας (π.χ. αριθμητικά πεδία για ποσότητες, λογικές τιμές για χαρακτηριστικά τύπου «ναί/όχι» όπως το αν μια καλλιέργεια είναι ψυχανθής).

Η κανονικοποιημένη δομή και η τυποποίηση των τιμών εξασφαλίζουν:

- Εύκολη επέκταση της βάσης με νέες καλλιέργειες, παράσιτα ή τύπους εδαφών.
- Ελαχιστοποίηση λαθών κατά την εισαγωγή και επεξεργασία δεδομένων.
- Αποτελεσματική και ταχύτατη αναζήτηση πληροφοριών.

Με αυτόν τον τρόπο, η βάση δεδομένων αποτελεί ένα αξιόπιστο και ευέλικτο θεμέλιο για την τροφοδότηση του μοντέλου βελτιστοποίησης και την παραγωγή ακριβών πλάνων αμειψισποράς.

4.2 Περιγραφή Εξελικτικού Αλγορίθμου

Ο ΕΑ υλοποιήθηκε σε Python με χρήση της βιβλιοθήκης DEAP και εκτελείται κάθε φορά με βάση τα δεδομένα που εισάγει ο χρήστης μέσω του frontend.

4.2.1 Αναπαράσταση λύσης

Κάθε πιθανό πλάνο αμειψισποράς αναπαρίσταται ως χρωμόσωμα (άτομο του πληθυσμού) με μήκος ίσο με διπλάσιο των ετών που επιλέγει ο χρήστης για το πλάνο. Ο διπλασιασμός οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε έτος περιλαμβάνει δύο καλλιέργειες: μία χειμερινή και μία θερινή. Κάθε γονίδιο του χρωμοσώματος αποθηκεύει το ID μιας καλλιέργειας, ώστε οι υπολογισμοί να είναι ταχύτεροι.

4.2.2 Δημιουργία αρχικού πληθυσμού

Ο αρχικός πληθυσμός δημιουργείται τυχαία, αντλώντας καλλιέργειες μόνο από το σύνολο αυτών που έχει επιλέξει ο αγρότης.

4.2.3 Συνάρτηση αξιολόγησης (Fitness Function)

Η αξιολόγηση κάθε πλάνου αμειψισποράς πραγματοποιείται μέσα από μια πολυκριτηριακή διαδικασία βαθμολόγησης, η οποία βασίζεται στην προσομοίωση της ανάπτυξης των καλλιεργειών σε ένα εικονικό χωράφι. Η προσομοίωση αναπαριστά ρεαλιστικά όλα τα στάδια της καλλιεργητικής διαδικασίας: από τη σπορά και τη συγκομιδή στους αντίστοιχους μήνες, έως την παρακολούθηση παρασίτων, τη διαχείριση της θρεπτικής κατάστασης και της υγρασίας του εδάφους, καθώς και τον υπολογισμό κρίσιμων δεικτών απόδοσης.

Κάθε πλάνο αξιολογείται με βάση ένα σύνολο κριτηρίων που αντικατοπτρίζουν τόσο την παραγωγικότητα όσο και τη βιωσιμότητα της αμειψισποράς. Τα κριτήρια αυτά είναι:

- **Κερδοφορία:** το καθαρό οικονομικό όφελος για τον παραγωγό.
- **Γνώση αγρότη:** η πρακτική ευκολία εφαρμογής του πλάνου, σε συνάρτηση με τις γνώσεις και την εμπειρία που απαιτούνται.
- **Ωφέλιμες αμειψισπορές:** η συμβολή του πλάνου στην ενίσχυση της γονιμότητας του εδάφους και στη μείωση παρασίτων ή ασθενειών.
- **Κλιματική καταλληλότητα:** η προσαρμοστικότητα των καλλιεργειών στις κλιματικές συνθήκες της περιοχής.
- **Υγεία αμειψισποράς:** η ποικιλία και η ισορροπία των καλλιεργειών ώστε να αποφεύγεται η εξάντληση συγκεκριμένων πόρων.
- **Διαθεσιμότητα μηχανημάτων:** η συμβατότητα του πλάνου με τον διαθέσιμο εξοπλισμό του παραγωγού.

Η ανάλυση αυτών των κριτηρίων και η ακριβής διαμόρφωση της συνάρτησης αξιολόγησης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.3.4.

4.2.4 Έξοδος

Η διαδικασία βελτιστοποίησης μπορεί να τερματιστεί με τρία διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο, ο αλγόριθμος ολοκληρώνει όλες τις προκαθορισμένες γενιές, ανεξάρτητα από την πρόοδο που έχει επιτευχθεί. Στο δεύτερο, η εκτέλεση σταματά όταν δεν παρατηρείται βελτίωση στο fitness του καλύτερου ατόμου για έναν ορισμένο αριθμό διαδοχικών γενεών, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αναζήτηση έχει φτάσει σε σημείο στασιμότητας. Το τρίτο σενάριο αφορά την περίπτωση όπου η τυπική απόκλιση του πληθυσμού παραμένει αρκετά χαμηλή για συγκεκριμένο αριθμό γενεών, ένδειξη ότι δεν υπάρχει επαρκής ποικιλία στα άτομα και ότι ο αλγόριθμος έχει ουσιαστικά συγκλίνει σε μια λύση.

4.3 Προσομοίωση με τεχνητή ζωή

Η ενσωμάτωση της Alife στο μοντέλο προσφέρει τη δυνατότητα μιας πιο ολοκληρωμένης και ρεαλιστικής αναπαράστασης της ανάπτυξης της καλλιέργειας, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους πιθανούς παράγοντες που την επηρεάζουν. Παράγοντες όπως οι κλιματικές συνθήκες, η εφαρμογή λίπανσης, οι ψεκασμοί, η άρδευση και η παρουσία παρασίτων δεν αντιμετωπίζονται πλέον ως στατικές μεταβλητές, αλλά αποτυπώνονται δυναμικά μέσα από διαδικασίες που προσομοιώνουν την πραγματική τους εξέλιξη στο χρόνο. Με τον τρόπο αυτό, η καλλιέργεια παρακολουθείται ως ζωντανό και αλληλεπιδραστικό σύστημα, στο οποίο κάθε αλλαγή έχει αλυσιδωτές επιδράσεις.

Η χρήση απλών, στατικών δεδομένων δεν θα μπορούσε να καταγράψει με ακρίβεια τη συνεχή μεταβολή της κατάστασης του αγρού, ούτε να ενσωματώσει την τυχαιότητα που χαρακτηρίζει φαινόμενα όπως η διάδοση εντόμων. Αντίθετα, η προσομοίωση μέσω Alife επιτρέπει την εισαγωγή στοιχείων απροσδιοριστίας και στοχαστικής συμπεριφοράς, καθιστώντας την αναπαράσταση πιο πιστή στην πραγματικότητα.

Η διαδικασία υλοποιείται σε ένα εικονικό περιβάλλον, όπου το χωράφι του αγρότη αναπαρίσταται ως διδιάστατο πλέγμα κελιών (grid). Σε αυτό, κάθε κελί αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη χωρική μονάδα, ενώ οι πληθυσμοί παρασίτων προσομοιώνονται ως αυτόνομοι πράκτορες (agents) με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως κινητικότητα, ικανότητα αναπαραγωγής και ακτίνα αντίληψης.

4.3.1 Αναπαράσταση του εικονικού χωραφιού

Το χωράφι αναπαρίσταται ως πλέγμα (grid), στο οποίο κάθε κελί αντιστοιχεί σε ένα στρέμμα γης.

Κάθε κελί διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- **Έκταση** (σε στρέμματα) που αναπαριστά.
- **Θρεπτικά στοιχεία:** ποσότητες N, P, K που υπάρχουν στο έδαφος.
- **pH** του εδάφους.
- **Είδος εδάφους.**
- **Τιμή υγρασίας.**
- **Κατάσταση άρδευσης.**
- **Κατάσταση λίπανσης.**
- **Κατάσταση ψεκασμού.**
- **Ενεργή καλλιέργεια** (αν υπάρχει).
- **Σοδειά** που φιλοξενεί.
- **Ενεργά παράσιτα** που υπάρχουν στο κελί.

- **Pest pressure:** ποσοτική εκτίμηση της πίεσης που ασκούν τα παράσιτα στην καλλιέργεια.
- **Ιστορικό προηγούμενων καλλιεργειών** που έχουν φυτευτεί στο κελί.

Σε περίπτωση που το χωράφι έχει μη ακέραιο αριθμό στρεμμάτων (π.χ. 12,4 στρ.), το τελευταίο κελί αναπαριστά μόνο την έκταση που απομένει (δηλαδή 0,4 στρ).

4.3.2 Παράσιτα ως agents

Τα παράσιτα μοντελοποιούνται ως agents με ιδιότητες που καθορίζουν τη συμπεριφορά τους:

- **Όνομα** παρασίτου.
- **Affected crops:** λίστα καλλιεργειών που μπορεί να προσβάλει.
- **Affected families:** λίστα οικογενειών καλλιεργειών που μπορεί να επηρεάσει.
- **Affected orders:** λίστα τάξεων (orders) καλλιεργειών που μπορεί να επηρεάσει.
- **Lifespan:** ποσοστό ζωής του παρασίτου.
- **Lifespan increase:** ποσοστό αύξησης ζωής ανά χρονική περίοδο όταν υπάρχουν ευνοϊκές συνθήκες.
- **Lifespan decrease:** ποσοστό μείωσης ζωής όταν δεν υπάρχουν ευνοϊκές συνθήκες ή υπάρχει ψεκασμός.
- **Spread rate (ανά crop/order/family):** ρυθμός αύξησης του pest pressure όταν υπάρχουν ευνοϊκές συνθήκες.
- **Decay rate:** ποσοστό μείωσης του pest pressure όταν απουσιάζουν ευνοϊκές συνθήκες.
- **Spread chance:** πιθανότητα τυχαίας εξάπλωσης σε γειτονικά κελιά.
- **Συντεταγμένες** (row, col) του κελιού στο οποίο βρίσκεται.

4.3.3 Κύκλος προσομοίωσης

Η προσομοίωση εκτελείται για το πλήθος των ετών που έχει δηλώσει ο αγρότης και προχωρά σε μηνιαία βήματα. Ο κύκλος λειτουργίας περιλαμβάνει:

4.3.3.1 Αρχικοποίηση παρασίτων προηγούμενων καλλιεργειών

Στην αρχή της προσομοίωσης, τα παράσιτα που σχετίζονται με τις δύο τελευταίες καλλιέργειες που είχε ο αγρότης στο χωράφι του εισάγονται τυχαία στο 10% των κελιών. Η διαδικασία αυτή επιλέχθηκε επειδή τόσο η αμέσως προηγούμενη καλλιέργεια όσο και η προ-προηγούμενη επηρεάζουν άμεσα την παρουσία και την ένταση των παρασίτων στις πρώτες φάσεις του νέου πλάνου αμειψισποράς. Με αυτόν τον τρόπο, η προσομοίωση αποτυπώνει πιο ρεαλιστικά τις αρχικές συνθήκες που συναντά η καλλιέργεια.

4.3.3.2 Σπορά καλλιέργειας

Καθώς εξελίσσονται οι μήνες της προσομοίωσης, όταν φτάνει ο χρόνος σποράς της πρώτης καλλιέργειας, αυτή «σπέρνεται» σε όλα τα κελιά του χωραφιού. Παράλληλα, εισάγεται το παράσιτο που σχετίζεται με την καλλιέργεια, το οποίο κατανέμεται τυχαία στο 20% των κελιών, ώστε να αποτυπώνεται με ρεαλιστικό τρόπο η πιθανή αρχική παρουσία του στο αγροτικό περιβάλλον.

4.3.3.3 Διαχείριση παρασίτων

Κάθε δύο μήνες γίνεται ενημέρωση της κατάστασης των παρασίτων. Το διάστημα αυτό επιλέχθηκε γιατί τα παράσιτα δεν δραστηριοποιούνται σε όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας, αλλά σε συγκεκριμένες περιόδους. Παράλληλα, η δίμηνη ενημέρωση εξασφαλίζει ισορροπία ανάμεσα στον ρεαλισμό και στην αποδοτικότητα του αλγορίθμου, ώστε η προσομοίωση να παραμένει ακριβής χωρίς

να απαιτεί υπερβολικούς υπολογιστικούς πόρους. Οι ενέργειες που συμβαίνουν στα παράσιτα είναι οι εξής:

- Εξάπλωση σε νέα κελιά με βάση το spread rate και το spread chance.
- Αύξηση ή μείωση του lifespan ανάλογα με ευνοϊκές ή δυσμενείς συνθήκες.
- Ενημέρωση του pest pressure σε κάθε κελί.
- Απομάκρυνση παρασίτων των οποίων το lifespan πέφτει κάτω από το μηδέν.

4.3.3.4 Συγκομιδή καλλιέργειας

Καθώς προχωρούν οι μήνες και πλησιάζει η περίοδος συγκομιδής, η ποσότητα της σοδειάς σε κάθε κελί υπολογίζεται με βάση το σύνολο των παραγόντων που την επηρεάζουν, όπως η πίεση από τα παράσιτα, οι κλιματικές συνθήκες, τα διαθέσιμα θρεπτικά στοιχεία και η άρδευση. Μετά τον υπολογισμό, η καλλιέργεια αφαιρείται από το χωράφι και το ιστορικό καλλιεργειών κάθε κελιού ενημερώνεται αναλόγως. Παράλληλα, ανανεώνονται κρίσιμες μεταβλητές του αγρού, όπως το ποσοστό υγρασίας και η διαθέσιμη ποσότητα θρεπτικών στοιχείων, ώστε να αποτυπώνεται η επίδραση της καλλιέργειας στο έδαφος και να προετοιμάζεται το πεδίο για την επόμενη φάση του πλάνου.

4.3.3.5 Επανάληψη για όλες τις καλλιέργειες του πλάνου

Τα βήματα 2–4 επαναλαμβάνονται για κάθε καλλιέργεια που περιλαμβάνεται στο πλάνο αμειψισποράς. Σε περίπτωση που ο μήνας συγκομιδής της τελευταίας καλλιέργειας εκτείνεται πέρα από τη διάρκεια των δηλωμένων ετών, η συγκομιδή πραγματοποιείται κανονικά, με την προσθήκη ενός εικονικού επιπλέον έτους στον υπολογισμό.

4.3.4 Αλληλεπίδραση με τον εξελικτικό αλγόριθμο

Η προσομοίωση εκτελείται εντός της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness function) του Γενετικού Αλγορίθμου, ώστε κάθε υποψήφιο σχέδιο αμειψισποράς να αξιολογείται με δυναμικό τρόπο. Με αυτόν τον τρόπο, η επιλογή του βέλτιστου πλάνου από τον ΕΑ βασίζεται όχι μόνο σε στατικά δεδομένα, αλλά και σε δυναμικές και τυχαίες αλληλεπιδράσεις που αντανακλούν πιο ρεαλιστικά τις πραγματικές συνθήκες. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει την ακρίβεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, παρέχοντας στον αγρότη προτάσεις πιο κοντά στην πολυπλοκότητα του πραγματικού αγρο-οικοσυστήματος.

Κεφάλαιο 5ο: Σχεδίαση και εφαρμογή αλγορίθμου βελτιστοποίησης

5.1 Εισαγωγή στον επιλεγμένο αλγόριθμο

5.1.1 Γενική παρουσίαση του εξελικτικού αλγορίθμου

Ο ΕΑ είναι μια μέθοδος βελτιστοποίησης που ανήκει στην κατηγορία των Εξελικτικών Αλγορίθμων και αντλεί έμπνευση από τη θεωρία της βιολογικής εξέλιξης και τη διαδικασία της φυσικής επιλογής. Στον ΕΑ, κάθε πιθανή λύση του προβλήματος αναπαρίσταται ως «άτομο», το οποίο περιέχει ένα σύνολο «γονιδίων» που αντιστοιχούν στις παραμέτρους της λύσης. Ο αλγόριθμος ξεκινά με έναν πληθυσμό τέτοιων ατόμων, τα οποία υπόκεινται σε διαδικασίες επιλογής, ανασυνδυασμού (crossover) και μετάλλαξης (mutation), με στόχο τη δημιουργία νέων, βελτιωμένων λύσεων.

Η βασική λειτουργία του ΕΑ συνίσταται σε έναν κύκλο γενεών, όπου κάθε γενιά αξιολογείται με βάση μία ή περισσότερες συναρτήσεις καταλληλότητας (fitness functions). Τα καλύτερα άτομα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να αναπαραχθούν, ενώ η τυχαιότητα που εισάγεται μέσω μετάλλαξης εξασφαλίζει την εξερεύνηση νέων περιοχών του χώρου λύσεων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού, όπως ο μέγιστος αριθμός γενεών ή η σύγκλιση της απόδοσης.

5.1.2 Λόγοι επιλογής για το πρόβλημα της αμειψισποράς

Η βελτιστοποίηση στρατηγικών αμειψισποράς αποτελεί ένα ιδιαίτερα σύνθετο πρόβλημα, καθώς εμπεριέχει πολλαπλές διαστάσεις πολυπλοκότητας:

- **Μεγάλος και διακριτός χώρος αναζήτησης:** Ο αριθμός πιθανών συνδυασμών καλλιεργειών σε έναν πολυετή χρονικό ορίζοντα είναι εξαιρετικά μεγάλος, γεγονός που καθιστά δύσκολη την εύρεση βέλτιστων λύσεων.
- **Πολυκριτηριακή φύση του προβλήματος:** Απαιτείται ταυτόχρονη βελτιστοποίηση διαφορετικών και συχνά αντικρουόμενων στόχων, όπως η παραγωγικότητα, η υγεία του εδάφους, η πίεση από παράσιτα και η οικονομική απόδοση. Ένας αλγόριθμος πρέπει να ισορροπεί ανάμεσα σε αυτούς τους στόχους, παράγοντας εναλλακτικές λύσεις με διαφορετικούς συμβιβασμούς.
- **Πολυπλοκότητα σχέσεων:** Η απόδοση ενός πλάνου δεν εξαρτάται από έναν μόνο παράγοντα, αλλά από τον τρόπο που συνδυάζονται πολλοί μαζί, όπως οι κλιματικές συνθήκες, η διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων και οι προηγούμενες καλλιέργειες. Αυτές οι σχέσεις είναι συχνά δύσκολο να περιγραφούν με απλές μεθόδους.

Ο Εξελικτικός Αλγόριθμος είναι ιδιαίτερα κατάλληλος για τέτοιου είδους προβλήματα επειδή:

- Μπορεί να χειριστεί ετερογενή δεδομένα, συνδυάζοντας κατηγορικές και αριθμητικές μεταβλητές.
- Υποστηρίζει την ενσωμάτωση βαθμολογικών κριτηρίων που αντικατοπτρίζουν πρακτικές, εμπειρία αγροτών και επιστημονικές γνώσεις.
- Αναζητά λύσεις μέσα σε περιβάλλοντα με σύνθετες αλληλεπιδράσεις, χωρίς να απαιτείται πλήρης μαθηματική μοντελοποίηση όλων των παραγόντων.
- Λόγω της στοχαστικής του φύσης, μπορεί να αποφύγει εύκολα την παγίδευση σε τοπικά καλές αλλά όχι βέλτιστες λύσεις και να παράγει εναλλακτικές στρατηγικές που προσφέρουν στον αγρότη περισσότερες επιλογές.

5.1.3 Χρήση της βιβλιοθήκης DEAP

Η υλοποίηση του ΕΑ στην παρούσα εργασία βασίζεται στη βιβλιοθήκη DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python), η οποία παρέχει ένα ευέλικτο και επεκτάσιμο πλαίσιο για την ανάπτυξη ΕΑ. Μέσω της DEAP γίνεται δυνατός ο ορισμός χρωμοσωμάτων και γονιδίων που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των στρατηγικών αμειψισποράς, καθώς και η εύκολη υλοποίηση και παραμετροποίηση των τελεστών επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης. Επιπλέον, η βιβλιοθήκη επιτρέπει την ενσωμάτωση πολυκριτηριακής αξιολόγησης.

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα είναι η ευέλικτη διαχείριση περιορισμών και κανόνων εγκυρότητας, η οποία υλοποιείται μέσω προσαρμοσμένων συναρτήσεων αξιολόγησης, εξασφαλίζοντας ότι τα παραγόμενα πλάνα ακολουθούν τις βασικές αρχές της αμειψισποράς. Η επιλογή της DEAP κρίθηκε ιδανική, καθώς συνδυάζει υψηλό βαθμό προσαρμοστικότητας με ευχρηστία και πλαισιώνεται από εκτενή τεκμηρίωση και μια ενεργή κοινότητα χρηστών. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν δυνατή την ταχεία ανάπτυξη, τον εύκολο πειραματισμό με διαφορετικές παραμέτρους και διαμορφώσεις, καθώς και την παραγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων σε σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης όπως το παρόν.

5.2 Αναπαράσταση στρατηγικών αμειψισποράς

Η αναπαράσταση των στρατηγικών αμειψισποράς στον Εξελικτικό Αλγόριθμο αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την ορθή λειτουργία της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Στην παρούσα εργασία, κάθε υποψήφια στρατηγική (άτομο) αναπαρίσταται ως μία ακολουθία γονιδίων, όπου κάθε γονίδιο αντιστοιχεί σε μία καλλιέργεια που θα σπαρθεί στον αγρό κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης καλλιεργητικής περιόδου.

Ο χρονικός ορίζοντας της αμειψισποράς δεν είναι σταθερός, αλλά επιλέγεται δυναμικά από τον αγρότη. Η διάρκεια μπορεί να κυμαίνεται από τουλάχιστον τρία (3) έτη έως και δέκα (10) έτη, επιτρέποντας την προσαρμογή του πλάνου στις ιδιαίτερες ανάγκες, περιορισμούς και στόχους του παραγωγού.

Δεδομένου ότι το μοντέλο αφορά έναν ενιαίο αγρό, αλλά κάθε έτος μπορεί να φιλοξενήσει δύο διαφορετικές καλλιέργειες (μία χειμερινή και μία καλοκαιρινή), ο συνολικός αριθμός γονιδίων ανά άτομο ισούται με διπλάσιο του αριθμού ετών που ορίζει ο χρήστης. Για παράδειγμα, σε πενταετές πλάνο αμειψισποράς, το χρωμόσωμα θα περιλαμβάνει δέκα γονίδια: πέντε που αντιστοιχούν στις χειμερινές καλλιέργειες και πέντε στις καλοκαιρινές.

Υπάρχουν 70 καλλιέργειες οι οποίες μπορούν να επιλεγθούν από τον αγρότη για να χρησιμοποιηθούν στο πλάνο αμειψισποράς. Στο σύνολο αυτό των καλλιεργειών εμπεριέχονται τόσο καλοκαιρινά είδη όσο και χειμερινά είδη. Κάθε καλλιέργεια έχει ένα μοναδικό ID που την χαρακτηρίζει. Αυτή η κωδικοποίηση επιτρέπει τη χρήση ακέραιων τιμών στα γονίδια, κάτι που είναι συμβατό με τους τελεστές της βιβλιοθήκης DEAP, επιτρέπει την εύκολη εφαρμογή τεχνικών όπως η τυχαία επιλογή (random sampling) ή η διασταύρωση (crossover) με βάση ακέραιες θέσεις και μειώνει την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου κάνοντας τον ταχύτερο.

Δεν υφίστανται σκληροί περιορισμοί εγκυρότητας που να αποκλείουν άμεσα υποψήφιες λύσεις κατά τη διάρκεια της εξέλιξης. Αντίθετα, η διαχείριση της εγκυρότητας των σχεδίων γίνεται μέσω ποινών στη συνάρτηση καταλληλότητας. Για παράδειγμα, η συνεχόμενη καλλιέργεια του ίδιου είδους ή η μη ένταξη ωφέλιμων καλλιεργειών (π.χ. ψυχανθή) σε συγκεκριμένα διαστήματα μπορεί να επιφέρει μείωση της συνολικής βαθμολογίας ενός ατόμου. Αυτή η προσέγγιση διατηρεί τον πληθυσμό λύσεων πλούσιο και ποικίλο, ενώ ταυτόχρονα κατευθύνει την αναζήτηση προς πιο βιώσιμες και παραγωγικές στρατηγικές.

Με αυτή τη δομή, ο ΕΑ μπορεί να εξετάζει αποτελεσματικά ένα τεράστιο πλήθος πιθανών στρατηγικών, επιτρέποντας τη σταδιακή βελτίωση των πλάνων αμειψισποράς μέσα από τους εξελικτικούς τελεστές που περιγράφονται στις επόμενες ενότητες.

5.3 Διαδικασία βελτιστοποίησης

Η διαδικασία βελτιστοποίησης αναπτύχθηκε και ελέγχθηκαν όλες οι παράμετροι μέσα από εκτεταμένες δοκιμές (βλ. Κεφ. 6). Οι δοκιμές αυτές επέτρεψαν να εντοπιστούν οι πιο αποδοτικές στρατηγικές, οι οποίες συνδυάζουν την ικανότητα εξερεύνησης του χώρου λύσεων με την ταχεία και σταθερή σύγκλιση σε βέλτιστες λύσεις. Στο τέλος της διαδικασίας προέκυψαν οι τελικές τιμές των παραμέτρων που υιοθετούνται για όλα τα πειραματικά σενάρια της παρούσας εργασίας.

5.3.1 Αρχικοποίηση πληθυσμού

Η διαδικασία ξεκινά με τη δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού στρατηγικών αμειψισποράς, όπου κάθε στρατηγική αναπαρίσταται ως χρωμόσωμα με γονίδια τις καλλιέργειες (βλ. Ενότητα 5.2). Ο αριθμός των ατόμων στον πληθυσμό είναι κρίσιμη παράμετρος, καθώς καθορίζει την ποικιλία των λύσεων και τον χρόνο εκτέλεσης. Έπειτα από συγκριτικά πειράματα, καθορίστηκε ότι η χρήση 160 ατόμων αποτελεί την καλύτερη ισορροπία μεταξύ ποικιλίας και αποδοτικότητας, παρέχοντας πλούσια εξερεύνηση χωρίς υπερβολική αύξηση του υπολογιστικού κόστους.

5.3.2 Επιλογή γονέων

Η επιλογή των γονέων καθορίζει ποια άτομα θα συμβάλουν στη δημιουργία της επόμενης γενιάς. Δοκιμάστηκαν μέθοδοι όπως το tournament selection και η roulette wheel selection. Τελικά, υιοθετήθηκε η μέθοδος Stochastic Universal Sampling (SUS), καθώς απέδωσε μεγαλύτερη σταθερότητα, καλύτερη διατήρηση ποικιλίας και συνολικά υψηλότερες τιμές fitness.

5.3.3 Ανασυνδυασμός (Crossover)

Ο ανασυνδυασμός επιτρέπει την ανταλλαγή γενετικού υλικού και συμβάλλει στη δημιουργία νέων λύσεων. Εξετάστηκαν διάφορες πιθανότητες εφαρμογής. Η τελική τιμή ορίστηκε στο 0,91, καθώς παρείχε καλή ισορροπία μεταξύ δημιουργίας νέων στρατηγικών και διατήρησης των καλύτερων υπαρχουσών.

5.3.4 Μετάλλαξη (Mutation)

Η μετάλλαξη εισάγει τυχαίοτητα και αποτρέπει την πρόωρη σύγκλιση. Η στρατηγική που εφαρμόστηκε ήταν αντικατάσταση γονιδίων με τυχαίες καλλιέργειες από το σύνολο των διαθέσιμων. Με βάση πειραματικά αποτελέσματα, ο ρυθμός μετάλλαξης ορίστηκε στο 0,25, τιμή που διατηρεί υψηλή ποικιλία χωρίς να αποσταθεροποιεί τις λύσεις.

5.3.5 Κριτήρια τερματισμού

Ο αλγόριθμος διαθέτει τρία κριτήρια τερματισμού:

1. **Ολοκλήρωση γενεών:** τερματισμός μετά από 1500 γενιές.
2. **Στασιμότητα βελτίωσης:** τερματισμός εάν δεν υπάρξει βελτίωση στο καλύτερο fitness για 340 γενιές.
3. **Σύγκλιση πληθυσμού:** τερματισμός όταν η τυπική απόκλιση (std) των ατόμων παραμένει κάτω από 0,008 για τουλάχιστον 220 γενιές, γεγονός που δείχνει ότι η ποικιλία έχει εξαντληθεί και ο πληθυσμός έχει συγκλίνει.

5.3.6 Επαναληπτικές δοκιμές και επιλογή βέλτιστων παραμέτρων

Η τελική παραμετροποίηση δεν επιλέχθηκε αυθαίρετα, αλλά προέκυψε μέσα από εκτεταμένες συγκριτικές δοκιμές, (βλ. Κεφ. 6) όπου αξιολογήθηκαν πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί. Τα κριτήρια επιλογής περιλάμβαναν: υψηλές τιμές fitness, σταθερότητα αποτελεσμάτων σε πολλαπλές εκτελέσεις, αποφυγή πρόωρης σύγκλισης και διατήρηση ποικιλίας. Μέσα από αυτή τη συστηματική διαδικασία

αναδείχθηκε το σύνολο παραμέτρων που παρουσιάστηκε παραπάνω, το οποίο χρησιμοποιείται πλέον ως η βασική διαμόρφωση του αλγορίθμου.

5.4 Συνάρτηση Καταλληλότητας (Fitness Function)

Η συνάρτηση καταλληλότητας είναι ο πυρήνας της διαδικασίας βελτιστοποίησης: μεταφράζει ένα υποψήφιο πλάνο αμειψισποράς σε έναν αριθμητικό δείκτη ποιότητας, ώστε ο ΕΑ να μπορεί να συγκρίνει, να επιλέγει και να βελτιώνει λύσεις. Στην παρούσα εργασία η αξιολόγηση είναι πολυκριτηριακή, δηλαδή κάθε πλάνο κρίνεται ταυτόχρονα ως προς παραγωγικότητα, βιωσιμότητα και πρακτική εφαρμόσιμότητα. Η υλοποίηση ενσωματώνεται στη DEAP και λειτουργεί μέσα στον εξελικτικό κύκλο δηλαδή σε κάθε γενιά καλείται αυτόματα για όλα τα άτομα, επιστρέφοντας την τιμή fitness που καθοδηγεί επιλογή, ελιτισμό και γενετικούς τελεστές.

5.4.1 Σκοπός και ρόλος της fitness function

Στόχος της συγκεκριμένης διαδικασίας δεν είναι απλώς να βρεθεί το μέγιστο μιας μεμονωμένης ποσότητας (π.χ. απόδοσης), αλλά να ισορροπηθούν πολλαπλές απαιτήσεις που συχνά τραβούν προς διαφορετικές κατευθύνσεις. Έτσι, η fitness function:

- επιβραβεύει πλάνα που αποδίδουν καλά στην παραγωγή και την οικονομία, χωρίς να υπονομεύουν την υγεία του εδάφους ή να αυξάνουν τον κίνδυνο παρασίτων,
- τιμωρεί συμπεριφορές που είναι γνωστό ότι οδηγούν σε υποβάθμιση (π.χ. μονοκαλλιέργεια),
- προσαρμόζεται τα βάρη της εάν ο αγρότης δεν έχει δηλώσει συνδυασμούς καλλιεργειών έτσι ώστε να έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα οι υπόλοιποι παράγοντες αξιολόγησης.

Η σωστή διαμόρφωση της fitness function λειτουργεί σαν «πυξίδα» του ΕΑ: καθορίζει προς ποιες περιοχές του χώρου λύσεων θα κινηθεί η αναζήτηση, επηρεάζοντας άμεσα τόσο την ταχύτητα σύγκλισης όσο και την ποιότητα των τελικών λύσεων.

5.4.2 Κριτήρια αξιολόγησης και κανονικοποίηση

Η αξιολόγηση κάθε πλάνου πραγματοποιείται με βάση έξι επιμέρους κριτήρια, τα οποία καλύπτουν βασικές διαστάσεις της αμειψισποράς. Κάθε κριτήριο βαθμολογείται σε κλίμακα 0–1, ώστε οι επιμέρους συνεισφορές να είναι συγκρίσιμες και η τελική τιμή fitness να κυμαίνεται επίσης μεταξύ 0 και 1. Παράλληλα, ο υπολογισμός τους δεν είναι γραμμικός ή απλός, αλλά συνιστά μια σύνθετη διαδικασία που λαμβάνει υπόψη πολλαπλούς παράγοντες και τιμωρεί τα πλάνα που δεν ανταποκρίνονται σε ρεαλιστικούς περιορισμούς.

1. **Κερδοφορία (profit) – βάρος 0.40:** Υπολογίζεται με βάση την αναμενόμενη απόδοση κάθε καλλιέργειας, τις τιμές πώλησης και το κόστος παραγωγής.
2. **Γνώση/εμπειρία αγρότη (farmer knowledge) – βάρος 0.19:** Αντικατοπτρίζει το αν οι καλλιέργειες που προτείνονται συνάδουν με όσα δηλώνει ο αγρότης ότι αποδίδουν ή δεν αποδίδουν. Εάν ο αγρότης δεν έχει δηλώσει κανέναν συνδυασμό το βάρος του κριτηρίου ισομοιράζεται στα άλλα κριτήρια.
3. **Ωφέλιμες αμειψισπορές (beneficial rotations) – βάρος 0.12:** Εξετάζεται ο βαθμός στον οποίο το προτεινόμενο πλάνο ευθυγραμμίζεται με γνωστές και καταγεγραμμένες επιτυχημένες πρακτικές αμειψισποράς. Η σύγκριση γίνεται με βάση τη βιβλιογραφία και τα δεδομένα της βάσης, αποδίδοντας υψηλότερες τιμές σε σχήματα που έχουν αποδεδειγμένα οφέλη.
4. **Κλιματική καταλληλότητα (climate) – βάρος 0.11:** Περιλαμβάνει δείκτες όπως το στρες από την θερμοκρασία και την βροχόπτωση οι οποίοι όσο μεγαλύτεροι είναι τόσο περισσότερο μειώνουν το κλιματικό κριτήριο.
5. **Υγεία αμειψισποράς (crop rotation health) – βάρος 0.10:** Ελέγχεται η σωστή εναλλαγή καλλιεργειών, τόσο ως προς την παρουσία ψυχανθών που βελτιώνουν το έδαφος, όσο και ως

προς τη διαφοροποίηση σε βάθος ριζικού συστήματος (διαφορά τουλάχιστον 30 cm). Επαναλαμβανόμενες ή ακατάλληλες εναλλαγές μειώνουν επίσης τη βαθμολογία.

6. **Διαθεσιμότητα μηχανημάτων – βάρος 0.08:** Αξιολογείται αν οι απαιτήσεις της κάθε καλλιέργειας ταιριάζουν με τα μηχανήματα που διαθέτει ή έχει πρόσβαση ο αγρότης. Αν απαιτούνται εξειδικευμένα μηχανήματα που δεν είναι διαθέσιμα, η βαθμολογία μειώνεται.

Με αυτόν τον τρόπο, η τελική τιμή fitness δεν προκύπτει απλώς από στατικές τιμές, αλλά από μια πολυπαραγοντική αξιολόγηση που ενσωματώνει οικονομικές, τεχνικές και οικολογικές διαστάσεις. Η διαδικασία αυτή διασφαλίζει ότι κάθε πλάνο που κατατάσσεται υψηλά δεν είναι μόνο θεωρητικά σωστό, αλλά και πρακτικά εφαρμόσιμο σε πραγματικές συνθήκες.

5.4.3 Στάθμιση και σύνθεση της συνολικής καταλληλότητας

Ο υπολογισμός της τελικής τιμής fitness ακολουθεί μια διαδικασία σταθμισμένης συνάθροισης. Αρχικά, κάθε επιμέρους κριτήριο αξιολόγησης πολλαπλασιάζεται με το βάρος που του έχει αποδοθεί, βάσει της σημασίας του στο συνολικό πλαίσιο. Στη συνέχεια, όλα τα σταθμισμένα αποτελέσματα αθροίζονται, σχηματίζοντας έναν ενιαίο δείκτη απόδοσης.

$$\text{Fitness Score} = \sum_i (w_i \times s_i)$$

Το τελικό αποτέλεσμα εκφράζεται σε κλίμακα από το 0 έως το 1, όπου οι τιμές κοντά στο 1 υποδηλώνουν ότι το πλάνο ανταποκρίνεται αποτελεσματικά στις απαιτήσεις των κριτηρίων και αποτελεί αποδοτική και βιώσιμη στρατηγική. Αντίθετα, τιμές χαμηλότερες υποδεικνύουν πλάνα με αδυναμίες ή ασυμβατότητες, τα οποία είτε δεν πληρούν τους στόχους είτε χρειάζονται βελτίωση. Με αυτόν τον τρόπο, η τιμή fitness λειτουργεί ως μια ολοκληρωμένη βαθμολογία ποιότητας, συνοψίζοντας πολλαπλές διαστάσεις σε έναν απλό και συγκρίσιμο δείκτη.

5.4.4 Εσωτερική ροή υπολογισμού

Για κάθε άτομο, δηλαδή για κάθε υποψήφιο πλάνο αμειψισποράς, ακολουθείται μια σαφώς καθορισμένη ροή αξιολόγησης που προσομοιώνει βήμα προς βήμα τη λειτουργία του σε ένα εικονικό χωράφι. Αρχικά, εξάγονται τα χαρακτηριστικά του πλάνου, δηλαδή η ακολουθία καλλιεργειών που έχουν τοποθετηθεί σε κάθε καλλιεργητική περίοδο. Αυτό το γενετικό προφίλ μεταφέρεται στο μοντέλο προσομοίωσης, το οποίο υλοποιείται με τεχνικές βασισμένες σε ABM και CA.

Αρχικά, στο στάδιο της προσομοίωσης, κάθε καλλιέργεια περνά από τον κύκλο της: σπορά, ανάπτυξη, συγκομιδή. Κατά τη διάρκεια αυτού του κύκλου, παρακολουθούνται κρίσιμοι παράγοντες που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους: οι ροές θρεπτικών συστατικών στο έδαφος, οι ανάγκες και η διαθεσιμότητα νερού, η εξέλιξη πληθυσμών παρασίτων, καθώς και οι επιδράσεις από το κλίμα (θερμοκρασία, στρες λόγω ξηρασίας ή ακραίων καιρικών φαινομένων). Έτσι, η κάθε καλλιέργεια δεν αξιολογείται απομονωμένα, αλλά ως μέρος ενός ολοκληρωμένου αγρο-οικοσυστήματος.

Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, υπολογίζονται οι δείκτες που αντιστοιχούν στα έξι κριτήρια αξιολόγησης του πλάνου (κερδοφορία, γνώση αγρότη, ωφέλιμες αμειψισπορές, κλιματική καταλληλότητα, υγεία αμειψισποράς, διαθεσιμότητα μηχανημάτων). Οι αρχικές τιμές μετασχηματίζονται σε κανονικοποιημένη κλίμακα 0–1, ώστε να είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους.

Ακολουθεί η εφαρμογή ποινών για μη επιθυμητές καταστάσεις (π.χ. υπερβολικά επαναλαμβανόμενες καλλιέργειες, έλλειψη ψυχανθών, υψηλό κόστος παραγωγής). Οι ποινές μειώνουν τη βαθμολογία ενός κριτηρίου, ενώ αν η τελική τιμή πέσει κάτω από το μηδέν, αυτή «κόβεται» στο 0 ώστε να αποτρέπονται αρνητικές συνεισφορές. Στη συνέχεια, όλες οι τιμές κανονικοποιούνται ξανά στο εύρος 0–1 και σταθμίζονται με τα προκαθορισμένα βάρη, για να παραχθεί η τελική τιμή καταλληλότητας (fitness) του πλάνου. Όσο πιο κοντά στο 1 βρίσκεται η τιμή αυτή, τόσο πιο αποδοτικό και βιώσιμο θεωρείται το πλάνο.

Η τελική τιμή fitness επιστρέφεται στη βιβλιοθήκη DEAP και χρησιμοποιείται άμεσα για να κατευθύνει την εξέλιξη. Συγκεκριμένα, επηρεάζει:

- **Την επιλογή γονέων** μέσω της μεθόδου SUS, όπου τα πλάνα με υψηλότερη τιμή fitness έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να αναπαραχθούν.
- **Τον ελιτισμό**, επιτρέποντας στα καλύτερα άτομα να περνούν ανέπαφα στην επόμενη γενιά, ώστε να διατηρείται η ποιότητα του πληθυσμού.
- **Την κατεύθυνση της εξέλιξης συνολικά**, καθορίζοντας σε ποια χαρακτηριστικά πρέπει να ασκηθεί μεγαλύτερη επιλογική πίεση, ώστε ο αλγόριθμος να συγκλίνει προς στρατηγικές που συνδυάζουν παραγωγικότητα, βιωσιμότητα και οικονομική αποδοτικότητα.

Με αυτόν τον τρόπο, η αξιολόγηση δεν είναι μια στατική διαδικασία αλλά μια δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ του μοντέλου και του Γενετικού Αλγορίθμου, που καθορίζει άμεσα τη βελτίωση των λύσεων από γενιά σε γενιά.

5.4.5 Παράδειγμα λειτουργίας στην πράξη

Ένα πλάνο 5 ετών (10 περίοδοι) με δύο ψυχανθή, σωστή εναλλαγή οικογενειών, καλή κλιματική ταύτιση και μέτριο κόστος θα συγκεντρώσει υψηλές βαθμολογίες σε crop rotation health, climate και profit, ενώ πιθανόν να επιβραβευτεί και στο beneficial rotations αν πετύχει γνωστά ευνοϊκά ζεύγη. Αν όμως περιλαμβάνει δύο επαναλήψεις του ίδιου είδους στη σειρά, θα δεχθεί ποινή στο αντίστοιχο κριτήριο. Η τελική τιμή θα εκφράζει ακριβώς αυτόν τον ισοζυγισμένο απολογισμό, επιτρέποντας στον ΕΑ να προτιμήσει παρόμοιες, αλλά βελτιωμένες, παραλλαγές στις επόμενες γενιές.

Κεφάλαιο 6ο: Πειραματική διαδικασία και σενάρια προσομοίωσης

Η πειραματική διαδικασία αποτελεί κομβικό στάδιο της παρούσας εργασίας, καθώς διασφαλίζει ότι οι επιλογές παραμέτρων και οι στρατηγικές που εφαρμόζονται στον ΕΑ δεν είναι αυθαίρετες, αλλά βασίζονται σε εμπειρική αξιολόγηση. Μέσα από πολλαπλές δοκιμές διερευνήθηκε πώς οι διαφορετικές ρυθμίσεις του αλγορίθμου επηρεάζουν την απόδοση, τη σταθερότητα και τον χρόνο εκτέλεσης, ώστε να καθοριστούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.

Η διαδικασία οργανώθηκε σε τρεις φάσεις: στην πρώτη, αξιολογήθηκαν διαφορετικές στρατηγικές εξερεύνησης, εκμετάλλευσης και χρήσης ελιτισμού, στη δεύτερη, δοκιμάστηκαν παραλλαγές του καλύτερου σετ παραμέτρων, και στην τρίτη, ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε στο σύνολο των καλλιιεργειών, με αυξημένες γενιές και προσαρμοσμένα κριτήρια τερματισμού. Οι φάσεις αυτές κατέληξαν στο τελικό σετ παραμέτρων που χρησιμοποιείται σε όλα τα επόμενα πειράματα.

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε μια σειρά σεναρίων προσομοίωσης, τα οποία αναπαριστούν διαφορετικές γεωργικές συνθήκες, όπως έδαφος χαμηλής περιεκτικότητας θρεπτικών συστατικών αλλά και η απουσία άρδευσης. Σκοπός αυτής της φάσης ήταν να αξιολογηθεί όχι μόνο η απόδοση του αλγορίθμου σε ιδανικές συνθήκες, αλλά και η ικανότητά του να προσαρμόζεται σε πιο απαιτητικά ή ρεαλιστικά περιβάλλοντα.

Με αυτόν τον τρόπο, το κεφάλαιο αυτό συνδέει τη θεωρητική ανάπτυξη του μοντέλου με την πρακτική του αξιοπιστία, παρουσιάζοντας τόσο τη διαδικασία εύρεσης των παραμέτρων όσο και την εφαρμογή τους σε σενάρια που αντικατοπτρίζουν πραγματικές προκλήσεις της γεωργικής παραγωγής.

6.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας για την εύρεση κατάλληλων παραμέτρων

6.1.1 Πρώτη φάση δοκίμων

Η πρώτη φάση των δοκιμών είχε ως στόχο να διερευνηθεί ποια κατηγορία στρατηγικής μπορεί να αποδειχθεί πιο αποδοτική στο υπό εξέταση πρόβλημα. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε εάν η έμφαση θα πρέπει να δίνεται κυρίως στην ενίσχυση της εξερεύνησης (high exploration), στην ταχεία εκμετάλλευση υποσχόμενων λύσεων (high exploitation), σε έναν συνδυασμό των δύο προσεγγίσεων, καθώς και ποιος είναι ο ρόλος του ελιτισμού στη συνολική απόδοση του αλγορίθμου.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε ελεγχόμενο περιβάλλον με σταθερά δεδομένα. Χρησιμοποιήθηκε ένα υποσύνολο 30 καλλιιεργειών, ενώ όλα τα υπόλοιπα δεδομένα (κλιματικές συνθήκες, θρεπτικά στοιχεία εδάφους, διάρκεια πλάνου) διατηρήθηκαν σταθερά. Οι συνθήκες αυτές είχαν σχεδιαστεί ώστε να είναι αρκετά ευνοϊκές για το συγκεκριμένο σύνολο καλλιιεργειών, χωρίς όμως να είναι πλήρως βέλτιστες. Έτσι, αναμένονταν καλά αποτελέσματα αλλά όχι τέλεια, κάτι που επιβεβαιώθηκε και στην πράξη. Η επιλογή αυτή βοήθησε να αναδειχθούν καθαρά οι διαφορές ανάμεσα στις στρατηγικές παραμετροποίησης του αλγορίθμου, χωρίς τα αποτελέσματα να επηρεαστούν υπερβολικά από εξωτερικούς παράγοντες.

Για τον σκοπό αυτό σχεδιάστηκαν και εκτελέστηκαν έντεκα διαφορετικά σετ παραμέτρων, τα οποία διαφοροποιούνταν ως προς το μέγεθος του πληθυσμού, τον αριθμό γενεών, τη μέθοδο επιλογής (tournament, roulette ή stochastic universal sampling – SUS), την εφαρμογή ή μη ελιτισμού, τον ρυθμό μετάλλαξης, την πιθανότητα διασταύρωσης και τα κριτήρια τερματισμού, όπως ο μέγιστος αριθμός γενεών χωρίς βελτίωση, το κατώφλι τυπικής απόκλισης και η παράμετρος patience.

Κάθε σετ παραμέτρων εκτελέστηκε 50 φορές, ώστε να ληφθεί υπόψη ο τυχαίος χαρακτήρας του αλγορίθμου και να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Για την συγκριση των αποδόσεων τους καταγράφηκαν μετρικές όπως ο μέσος όρος (mean) του fitness του καλύτερου ατόμου, η διάμεσος (median), η τυπική απόκλιση (std) των τιμών fitness, το εύρος min–max καθώς και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης κάθε επανάληψης σε δευτερόλεπτα.

Set No	Pop	Gens	Selection	Eitism	Mututa-tion Rate	Cross-over Rate	Max no improvement Gens	Std Thres-hold	Patie-nce Std	Category
1	128	400	Tournament	No	0.15	0.9	80	0.005	70	Baseline
2	128	400	Tournament	Yes	0.15	0.9	80	0.005	70	Baseline
3	64	600	SUS	No	0.25	0.85	120	0.01	100	High Exploration
4	128	300	Tournament	Yes	0.10	0.9	200	0.004	50	High Exploitation
5	256	300	Tournament	Yes	0.05	0.9	60	0.004	50	High Exploitation
6	128	400	Tournament	No	0.15	0.9	120	0.01	100	High Exploitation
7	160	500	SUS	Yes	0.18	0.92	140	0.008	90	Balanced
8	128	450	SUS	Yes	0.15	0.92	120	0.006	80	Balanced
9	128	480	Tournament	Yes	0.16	0.95	130	0.007	90	Balanced
10	160	450	Roulette	Yes	0.13	0.92	140	0.006	90	Balanced
11	192	420	Tournament	Yes	0.15	0.9	140	0.007	100	Balanced

Πίνακας 6.1: Σετ παραμέτρων που δοκιμάστηκαν για την παραμετροποίηση του εξελικτικού αλγορίθμου

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.1, τα έντεκα σετ παραμέτρων σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να καλύπτουν διαφορετικές στρατηγικές. Τα σετ 1 και 2 λειτούργησαν ως Baseline, παρέχοντας ένα σημείο αναφοράς χωρίς συγκεκριμένη στόχευση. Το σετ 3 υιοθέτησε υψηλό ρυθμό μετάλλαξης, μικρότερο μέγεθος πληθυσμού και απουσία ελιτισμού, με σκοπό να ενισχυθεί η διερεύνηση του χώρου λύσεων (High Exploration). Αντίθετα, τα σετ 4, 5 και 6 έδωσαν έμφαση στη χαμηλή μετάλλαξη και στη χρήση ελιτισμού, αντιπροσωπεύοντας στρατηγικές έντονης εκμετάλλευσης (High Exploitation). Τέλος, τα σετ 7–11 επιδίωξαν μια ισορροπημένη προσέγγιση, συνδυάζοντας μέτριες τιμές μετάλλαξης και διασταύρωσης με διαφορετικές μεθόδους επιλογής (tournament και SUS) και την παρουσία ελιτισμού, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη ισορροπία ανάμεσα στην εξερεύνηση και την εκμετάλλευση.

Set No	Mean score	Median	Mean seconds	Std	Min	Max	Range min-max
1	0,8407	0.8416	1591,89	0.0109	0.7908	0.8619	0.0711
2	0,8381	0,8389	2631,95	0.0108	0.8080	0.8623	0.0543
3	0,7945	0.7943	8967,93	0.0176	0.7577	0.8201	0.0623
4	0,8284	0,8376	247,85	0.0249	0.7308	0.8492	0.1185
5	0,8351	0,8380	1709,28	0.0105	0.7865	0.8499	0.0634
6	0,8425	0.8427	2479,40	0.0118	0.7936	0.8662	0.0726
7	0,8407	0,8420	637,66	0.0067	0.8257	0.8540	0.0283
8	0,8380	0,8370	296,54	0.0127	0.7839	0.8656	0.0817

9	0,8377	0,8364	355,17	0.0101	0.8154	0.8658	0.0504
10	0,8412	0,8415	1637,67	0.0096	0.8090	0.8669	0.0578
11	0,8402	0,8402	3114,94	0.0066	0.8266	0.8575	0.0309

Πίνακας 6.2: αποτελέσματα κάθε σετ παραμέτρων

Από τα αποτελέσματα των εκτελέσεων φάνηκε ότι:

- Τα Baseline σετ παρείχαν μέτρια αποτελέσματα με χαμηλή διακύμανση, αλλά ο μεγάλος χρόνος εκτέλεσης τα καθιστούσε μη αποδοτικά.
- Το σετ High Exploration (3) παρήγαγε μεγάλη ποικιλία λύσεων, αλλά ο χαμηλός mean fitness και ο ιδιαίτερα μεγάλος χρόνος εκτέλεσης έδειξαν ότι η στρατηγική αυτή δεν ήταν αποδοτική στις δοκιμές.
- Στα High Exploitation σετ, το σετ 6 έδωσε την υψηλότερη τιμή fitness, αλλά με πολύ μεγάλο χρόνο εκτέλεσης.
- Τα Balanced σετ παρείχαν την καλύτερη ισορροπία, με το σετ 7 να ξεχωρίζει καθώς συνδυάζει υψηλή απόδοση, χαμηλή τυπική απόκλιση και σημαντικά μικρότερο χρόνο εκτέλεσης από τα υπόλοιπα.

Η κατηγοριοποίηση αυτή επέτρεψε να αξιολογηθεί όχι μόνο ποια στρατηγική έδινε την καλύτερη μέση απόδοση, αλλά και ποια διατηρούσε τη σταθερότητα και την ταχύτητα εκτέλεσης. Έτσι, η φάση αυτή έδειξε ότι η ισορροπία ανάμεσα σε exploration και exploitation, σε συνδυασμό με την παρουσία ελιτισμού, αποτελεί την πιο αποδοτική στρατηγική.

Συνολικά, η ανάλυση της πρώτης φάσης έδειξε ότι ανάμεσα στα σετ, το σετ 7 ξεχώρισε ως το πιο κατάλληλο για περαιτέρω δοκιμές, καθώς συνδυάζει υψηλή απόδοση, χαμηλή διακύμανση και σχετικά σύντομο χρόνο εκτέλεσης. Το εύρημα αυτό έθεσε τη βάση για τη δεύτερη φάση δοκιμών, όπου διερευνήθηκαν παραλλαγές του με στόχο την περαιτέρω βελτιστοποίηση.

6.1.2 Δεύτερη φάση δοκιμών

Στη δεύτερη φάση των δοκιμών σχεδιάστηκαν παραλλαγές του σετ 7, με στόχο να διερευνηθεί η επίδραση της αύξησης των γενεών και του μεγέθους του ελιτισμού, καθώς και μικρές διαφοροποιήσεις στους ρυθμούς μετάλλαξης και διασταύρωσης. Οι δοκιμές και σε αυτήν τη φάση βασιστήκαν στα ίδια δεδομένα και συνθήκες της πρώτης, αναμένοντας παρόμοια αποτελέσματα. Σε αυτήν την φάση κάθε σετ παραμέτρων εκτελέστηκε 40 φορές.

Συγκεκριμένα, δοκιμάστηκαν τρεις εκδοχές, όπου ο αριθμός των ατόμων που περνούσαν με ελιτισμό αυξήθηκε προοδευτικά από 1 σε 2 και 3. Παράλληλα, όσο αυξάνονταν ο αριθμός των ελιτ ατόμων αυξάνονταν και ο αριθμός γενεών ώστε να υπάρχει περισσότερος χρόνος εξερεύνησης του χώρου λύσεων αλλά και οι παράμετροι mutation και crossover με στόχο να αποφευχθεί η πρόωρη σύγκλιση. Οι λεπτομέρειες φαίνονται στον Πίνακα 6.3.

Set No	Pop	Gens	Selection	Eitism Size	Mutation Rate	Crossover Rate	Max no improvement Gens	Std Threshold	Patience Std
7α	160	700	SUS	1	0.18	0.88	140	0.008	150
7β	160	600	SUS	2	0.20	0.88	140	0.008	120
7γ	160	500	SUS	3	0.22	0.91	140	0.008	110

Πίνακας 6.3 – Παραλλαγές του σετ 7 στη δεύτερη φάση δοκιμών

Οι τρεις παραλλαγές εκτελέστηκαν επανειλημμένα και τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4.

Set No	Mean score	Median	Mean Gens	Std	Min	Max	Range min-max
7α	0,8481	0.8479	372.05	0.0079	0.8375	0.8668	0.0297
7β	0,8488	0,8491	428.17	0.008	0.8374	0.8709	0.0334
7γ	0,8514	0.8523	402.8	0.008	0.8373	0.8709	0.0335

Πίνακας 6.4 – Αποτελέσματα 20 εκτελέσεων ανά παραλλαγή

Από τις τρεις παραλλαγές, το σετ 7c (elite size = 3) ξεχώρισε σαφώς ως το πιο αποδοτικό. Παρουσίασε το υψηλότερο mean fitness (0.8514) και median (0.8523), με χαμηλή τυπική απόκλιση (0.008) και περιορισμένο εύρος (0.0335), γεγονός που αποδεικνύει ότι παρήγαγε σταθερά αποτελέσματα χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις. Επιπλέον, ο μέσος αριθμός γενεών (402) ήταν σε ενδιάμεσο επίπεδο, δείχνοντας ότι ο αλγόριθμος κατάφερε να φτάσει σε καλύτερες λύσεις χωρίς να απαιτήσει υπερβολικά μεγάλη διάρκεια εκτέλεσης.

Η αύξηση του αριθμού των ελίτ ατόμων σε τρία όχι μόνο δεν οδήγησε σε πρόωρη σύγκλιση, όπως θα μπορούσε να αναμένεται, αλλά αντίθετα εξασφάλισε καλύτερη ισορροπία ανάμεσα στην εκμετάλλευση των καλών λύσεων και στη διατήρηση της ποικιλίας. Αυτό αποδίδεται στις προσαρμογές που έγιναν στις παραμέτρους mutation και crossover, οι οποίες λειτούργησαν αντισταθμιστικά.

Για τον λόγο αυτό, το σετ 7c θεωρήθηκε το πιο αξιόπιστο και επιλέχθηκε ως βάση για την επόμενη φάση δοκιμών, όπου ο ΕΑ θα εφαρμοστεί στο πλήρες σύνολο καλλιιεργειών και σε διαφορετικά σεναρια προσομοίωσης, τα οποία θα παρουσιαστούν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6.3.

6.1.3 Τρίτη φάση δοκιμών

Η τρίτη φάση των δοκιμών είχε ως στόχο την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου όταν εφαρμόζεται πλέον σε όλο το σύνολο των καλλιιεργειών. Σε αυτή την φάση τόσο οι καλλιιεργίες όσο και τα υπόλοιπα δεδομένα (δεδομένα κλιματος κλπ.) επιλέγονταν τυχαία. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες φάσεις, όπου οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε ένα σταθερό υποσύνολο τριάντα καλλιιεργειών με σχετικά ευνοϊκές συνθήκες, η παρούσα φάση κλήθηκε να διαχειριστεί ένα πιο ετερογενές και απαιτητικό περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαία η προσαρμογή των παραμέτρων, ώστε ο αλγόριθμος να έχει μεγαλύτερη διάρκεια εκτέλεσης, περισσότερη ανεκτικότητα σε στασιμότητα και αυξημένη ποικιλότητα στον πληθυσμό.

Οι τελικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν βασίστηκαν στο αποδοτικό σετ 7γ της δεύτερης φάσης, αλλά προσαρμόστηκαν ύστερα από προσεκτικές παρατηρήσεις των αποτελεσμάτων των προηγούμενων δοκιμών. Η κύρια διαφοροποίηση ήταν η αύξηση του αριθμού γενεών και η ενίσχυση του ρυθμού μετάλλαξης, ώστε να διατηρηθεί η ποικιλότητα και να αποφευχθεί η πρόωρη σύγκλιση. Επιπλέον, οι παράμετροι max_no_improvement και patience_std αυξήθηκαν, προκειμένου να παρατείνεται η διαδικασία αναζήτησης πριν από τον τερματισμό λόγω στασιμότητας, αξιοποιώντας έτσι τον μεγαλύτερο αριθμό γενεών.

Pop	Gens	Selection	Eitism Size	Mututa-tion Rate	Cross-over Rate	Max no improvement Gens	Std Threshold	Patience Std
160	1500	SUS	3	0.25	0.91	340	0.008	200

Πίνακας 6.5: Τελικό σετ παραμέτρων

Με αυτόν τον τρόπο, ο αλγόριθμος διατηρεί τη σταθερότητα και την αξιοπιστία που έδειξε στις προηγούμενες φάσεις, ενώ προσαρμόζεται στις αυξημένες απαιτήσεις της τρίτης φάσης.

6.2 Διαδικασία δοκιμών σεναρίων

Αφού καθορίστηκαν οι τελικές παράμετροι του ΕΑ, η επόμενη φάση της πειραματικής διαδικασίας επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση της απόδοσής του σε διαφορετικά σεναρία καλλιεργητικών συνθηκών. Στόχος ήταν να διερευνηθεί η ικανότητα του μοντέλου να προσαρμόζεται σε πιο απαιτητικά και λιγότερο ευνοϊκά περιβάλλοντα, προτείνοντας στρατηγικές αμειψισποράς που να ανταποκρίνονται στις εκάστοτε προκλήσεις

6.2.1 Σενάριο 1 – Έδαφος χαμηλής περιεκτικότητας σε θρεπτικά στοιχεία

Στο πρώτο σενάριο εξετάστηκε η περίπτωση εδάφους με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θρεπτικά στοιχεία. Οι αρχικές τιμές του αζώτου (N), του φωσφόρου (P) και του καλίου (K) μειώθηκαν στο επίπεδο του 1 κιλού ανά στρέμμα. Η τιμή αυτή θεωρείται εξαιρετικά χαμηλή, ειδικά για το άζωτο, καθώς σχεδόν όλες οι καλλιέργειες απαιτούν πάνω από 10 κιλά ανά στρέμμα για ικανοποιητική ανάπτυξη, με εξαίρεση τα ψυχανθή. Ο αλγόριθμος κλήθηκε επομένως να εντοπίσει πλάνα αμειψισποράς που να βασίζονται σε αυξημένη χρήση ψυχανθών, αλλά και σε καλλιέργειες που επιστρέφουν σημαντικές ποσότητες θρεπτικών συστατικών μετά τη συγκομιδή.

Κάθε πείραμα εκτελέστηκε 20 φορές και καταγράφηκαν μετρικές όπως ο μέσος όρος (mean) και η διάμεσος (median) του fitness, η τυπική απόκλιση (std), το εύρος min–max και ο μέσος αριθμός γενεών μέχρι τη σύγκλιση. Παράλληλα, αποθηκεύτηκαν τα προτεινόμενα πλάνα αμειψισποράς ώστε να αξιολογηθεί κατά πόσο ενσωμάτωναν καλλιέργειες που αναμένεται να ευδοκιμήσουν σε φτωχά έδαφη.

6.2.2 Σενάριο 2 – Απουσία άρδευσης

Το δεύτερο σενάριο επικεντρώθηκε στην απουσία άρδευσης, θέτοντας τον αντίστοιχο παράγοντα στο μηδέν. Με τον τρόπο αυτό προσομοιώθηκαν συνθήκες καλλιέργειας σε χωράφι όπου δεν παρέχεται καθόλου νερό εκτός της φυσικής βροχόπτωσης.

Σε αυτήν την περίπτωση, ο αλγόριθμος έπρεπε να προτείνει στρατηγικές αμειψισποράς που να δίνουν προτεραιότητα σε καλλιέργειες με χαμηλές ανάγκες σε νερό, ώστε να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα και η παραγωγικότητα σε ξηρικά περιβάλλοντα.

Όπως και στο πρώτο σενάριο, πραγματοποιήθηκαν 20 εκτελέσεις για την εξαγωγή στατιστικά αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Καταγράφηκαν τα ίδια μέτρα απόδοσης (mean, median, std, range, μέσος αριθμός γενεών) και αποθηκεύτηκαν τα τελικά πλάνα ώστε να εξεταστεί εάν πράγματι αντανακλούσαν την προσαρμογή σε συνθήκες απουσίας άρδευσης.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα και η ανάλυσή τους παρουσιάζονται και αξιολογούνται στο Κεφάλαιο 7.

Κεφάλαιο 7ο: Αποτελέσματα και ανάλυση

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του ΕΑ στις δοκιμές που περιγράφηκαν προηγουμένως. Αφού στο Κεφάλαιο 6 έγινε η αναζήτηση και επιλογή των παραμέτρων που αποδίδουν καλύτερα, εδώ επιχειρείται η αξιολόγηση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου στα διαφορετικά σενάρια που προσομοιώνουν μερικές ακραίες συνθήκες στο χωράφι.

Η ανάλυση δεν περιορίζεται μόνο σε αριθμητικά αποτελέσματα αλλά γίνεται προσπάθεια να κατανοηθεί τι σημαίνουν στην πράξη οι λύσεις που προτείνονται, δηλαδή πόσο σταθερά και βιώσιμα είναι τα πλάνα αμεινισποράς που παράγει ο αλγόριθμος. Για τον λόγο αυτό παρουσιάζονται στατιστικά μεγέθη, όπως ο μέσος όρος και η διάμεσος του fitness, η τυπική απόκλιση, το εύρος τιμών και ο μέσος αριθμός γενεών που απαιτήθηκαν μέχρι τη σύγκλιση. Παράλληλα, εξετάζονται και συγκεκριμένα παραδείγματα πλάνων, ώστε να φανεί αν οι λύσεις που προκύπτουν ανταποκρίνονται στους περιορισμούς κάθε σεναρίου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με τυχαία επιλογή καλλιεργειών από το διαθέσιμο σύνολο, χωρίς εκ των προτέρων επιβολή περιορισμών (π.χ. υποχρεωτική παρουσία ψυχανθών). Η επιλογή αυτή κρίθηκε σημαντική, καθώς δίνει τη δυνατότητα στον αλγόριθμο να εντοπίζει μόνος του τις βέλτιστες στρατηγικές και μιμείται τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν οι αγρότες στην πράξη. Κάθε παραγωγός επιλέγει τις καλλιεργείες που προτιμά ή γνωρίζει καλύτερα, λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα εξοπλισμού και τους περιορισμούς του αγρού του. Επομένως, η χρήση τυχαίων καλλιεργειών καθιστά τα αποτελέσματα πιο αντιπροσωπευτικά και ρεαλιστικά.

Με τον τρόπο αυτό επιχειρείται να απαντηθούν δύο βασικά ερωτήματα: πρώτον, αν ο αλγόριθμος μπορεί να προσαρμόζεται αποτελεσματικά σε διαφορετικές προκλήσεις (π.χ. έλλειψη θρεπτικών ή νερού) και δεύτερον, αν οι λύσεις που προτείνονται είναι σταθερές και αξιόπιστες σε επαναλαμβανόμενες εκτελέσεις.

7.1 Σενάριο 1: Έλλειψη θρεπτικών συστατικών

Στο πρώτο σενάριο δοκιμών προσομοιώθηκε μια ακραία κατάσταση εδάφους με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά (N, P, K = 1 κίλό/στρέμμα). Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6, η έλλειψη βασικών θρεπτικών συστατικών αποτελεί έναν από τους πιο καθοριστικούς περιοριστικούς παράγοντες για την ανάπτυξη της σοδειάς, καθώς οι περισσότερες καλλιέργειες αδυνατούν να αναπτυχθούν ικανοποιητικά χωρίς επαρκές άζωτο. Εξαιρέση αποτελούν τα ψυχανθή, τα οποία μπορούν να δεσμεύουν άζωτο από την ατμόσφαιρα και να το προσθέσουν στο έδαφος. Ο στόχος του αλγορίθμου στο σενάριο αυτό ήταν να προτείνει πλάνα αμεινισποράς που να αξιοποιούν όσο το δυνατόν περισσότερο τα ψυχανθή και τις καλλιέργειες με υψηλή επιστροφή θρεπτικών μέσω της βιομάζας τους μετά την συγκομιδή τους, ώστε να μετριαστούν οι αρνητικές επιπτώσεις της χαμηλής γονιμότητας.

Τα αποτελέσματα των 20 εκτελέσεων έδειξαν ότι η απόδοση του αλγορίθμου ήταν μεν ικανοποιητική, αλλά όχι εξαιρετική, κάτι που ήταν αναμενόμενο δεδομένων των συνθηκών. Ο μέσος όρος του fitness διαμορφώθηκε στο 0.7301, ενώ η διάμεσος ήταν 0.7522, γεγονός που δείχνει μια σχετικά σταθερή συμπεριφορά στις περισσότερες εκτελέσεις. Παράλληλα, η τυπική απόκλιση (0.1038) και το εύρος τιμών (0.3606) αναδεικνύουν ότι υπήρξε σημαντική διακύμανση ανάμεσα στις διαφορετικές λύσεις, με το καλύτερο πλάνο να φτάνει το 0.9207 και το χειρότερο να πέφτει στο 0.56. Ο μέσος αριθμός γενεών που χρειάστηκαν μέχρι τη σύγκλιση ήταν 1133.55, στοιχείο που δείχνει ότι ο αλγόριθμος χρειαζόταν περισσότερα βήματα για να εντοπίσει σταθερές λύσεις σε σχέση με σενάρια με πιο ευνοϊκά δεδομένα. Συνεπώς, τα αποτελέσματα ήταν καλά, όπως αναμενόταν, αλλά όχι τέλεια, κάτι που επιβεβαιώνει τη τεράστια σημασία των θρεπτικών συστατικών στην ανάπτυξη βιώσιμων καλλιεργητικών συστημάτων.

Τα δύο καλύτερα παραδείγματα πλάνων που προτάθηκαν από τον αλγόριθμο είναι τα εξής:

- [Άνηθος, Μοσχοσίταρο, Άνηθος, Σόγια, Κύμινο, Σουσάμι]
- [Άνηθος, Λιναρόσπορος, Κόλιανδρος, Ηλιοτρόπιο, Ραπανάκι, Μοσχοσίταρο]

Στα παραπάνω πλάνα ξεχωρίζει η παρουσία ψυχανθών, όπως το Μοσχοσίταρο και η Σόγια, που έχουν τη δυνατότητα να εμπλουτίζουν το έδαφος με άζωτο. Ωστόσο, ο αλγόριθμος δεν περιορίστηκε αποκλειστικά σε αυτά, καθώς το έδαφος στο συγκεκριμένο σενάριο δεν στερούνταν μόνο άζωτο αλλά και φωσφόρο και κάλιο. Επομένως, η επιλογή καλλιεργειών με υψηλό ποσοστό επιστροφής συνολικά θρεπτικών συστατικών ήταν πιο αποδοτική στρατηγική. Πράγματι, σχεδόν όλες οι υπόλοιπες καλλιέργειες που εμφανίζονται στα πλάνα (εκτός από το Ραπανάκι) ανήκουν στην κατηγορία με τα υψηλότερα ποσοστά επιστροφής, επαναφέροντας στο έδαφος το 30–40% των ποσοτήτων N, P και K που δεσμεύουν κατά τον κύκλο ανάπτυξης. Πρόκειται για από τα υψηλότερα ποσοστά που υπάρχουν στη βάση δεδομένων της εφαρμογής, γεγονός που δείχνει ότι ο αλγόριθμος προσαρμόστηκε σωστά στις συνθήκες και επέλεξε καλλιέργειες που δεν καλύπτουν μόνο την έλλειψη αζώτου αλλά ενισχύουν συνολικά τη μακροπρόθεσμη γονιμότητα του εδάφους.

Συνολικά, τα ευρήματα καταδεικνύουν ότι σε περιβάλλον με εξαιρετικά περιορισμένους πόρους, ο αλγόριθμος κατόρθωσε να δώσει βιώσιμες λύσεις. Η συμπεριφορά αυτή θεωρείται ενθαρρυντική, καθώς αναδεικνύει την ικανότητα του μοντέλου να προσαρμόζεται ακόμη και σε δυσμενή σενάρια. Η κατανομή των αποτελεσμάτων και η μεταβλητότητα τους αποτυπώνονται πιο καθαρά στα διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω, τα οποία δίνουν μια ολοκληρωμένη εικόνα της επίδοσης του αλγορίθμου.



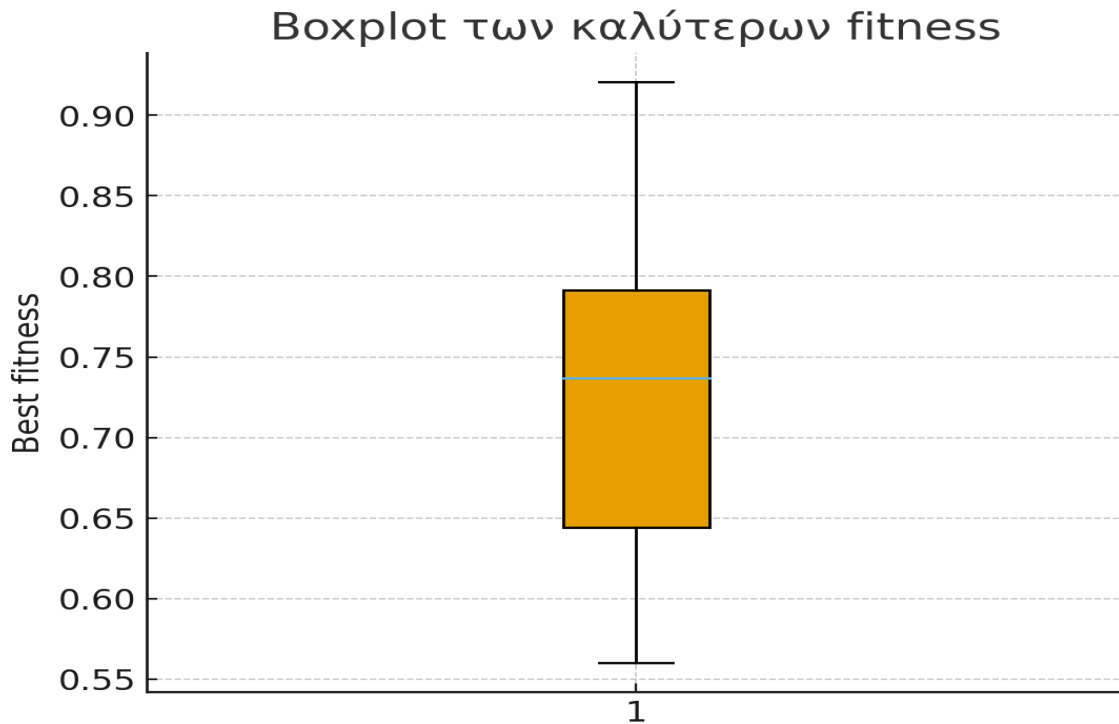
Σχήμα 7.1 – Κατανομή καλύτερων fitness σεναρίου 1

Το Σχήμα 7.1 παρουσιάζει την κατανομή των καλύτερων τιμών fitness που επιτεύχθηκαν σε κάθε ένα από τα 20 runs του αλγορίθμου. Είναι εμφανές ότι υπάρχει σημαντική διακύμανση ανάμεσα στις εκτελέσεις, με τις τιμές να κυμαίνονται από 0.56 έως 0.92. Η μεγάλη αυτή απόσταση μεταξύ της χειρότερης και της καλύτερης τιμής υπογραμμίζει τη δυσκολία του σεναρίου με το φτωχό έδαφος σε θρεπτικά συστατικά, καθώς ο αλγόριθμος δεν κατέληγε πάντα στο ίδιο επίπεδο απόδοσης. Παρόλα αυτά, παρατηρείται ότι οι περισσότερες εκτελέσεις συγκεντρώνονται στην περιοχή 0.75–0.85, γεγονός που δείχνει μια τάση του αλγορίθμου να βρίσκει αρκετά ικανοποιητικές λύσεις σε επαναλαμβανόμενες εκτελέσεις, ακόμη κι αν το περιβάλλον είναι εξαιρετικά περιοριστικό.

Οι εκτελέσεις που κατέληξαν σε πολύ χαμηλές τιμές fitness αντανακλούν περιπτώσεις όπου ο αλγόριθμος δεν κατάφερε να εκμεταλλευτεί σωστά τα ψυχανθή ή τις καλλιέργειες με υψηλή επιστροφή θρεπτικών συστατικών, με αποτέλεσμα το πλάνο αμειψισποράς να μην μπορεί να διατηρήσει τη γονιμότητα του εδάφους. Σ' αυτό συμβάλλει και ο παράγοντας της τύχης, καθώς σε κάθε εκτέλεση η τυχαία επιλογή των καλλιεργειών μπορεί να οδηγήσει σε συνδυασμούς όπου κυριαρχούν είδη που δεν είναι ψυχανθή και δεν επιστρέφουν υψηλά ποσοστά θρεπτικών στο έδαφος.

Αντίθετα, οι εκτελέσεις με fitness κοντά στο 0.90 ή και υψηλότερα αποτελούν ενδείξεις ότι σε ορισμένες περιπτώσεις ο αλγόριθμος πέτυχε τον βέλτιστο συνδυασμό καλλιιεργειών, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα παραγωγικότητα και βιωσιμότητα.

Συνολικά, το διάγραμμα αποτυπώνει τον συμβιβασμό που αναμενόταν: τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά αλλά όχι τέλεια, καθώς η έλλειψη θρεπτικών στοιχείων αποτελεί πολύ σημαντικό περιορισμό. Παρά τις δυσκολίες, ο αλγόριθμος έδειξε ότι μπορεί να εντοπίζει σταθερά καλές λύσεις, ενώ τα ακραία αποτελέσματα (πολύ χαμηλά ή πολύ υψηλά fitness) αποκαλύπτουν τον βαθμό πρόκλησης που δημιουργεί το συγκεκριμένο σενάριο και τη σημασία της επαναληψιμότητας στις εκτελέσεις.

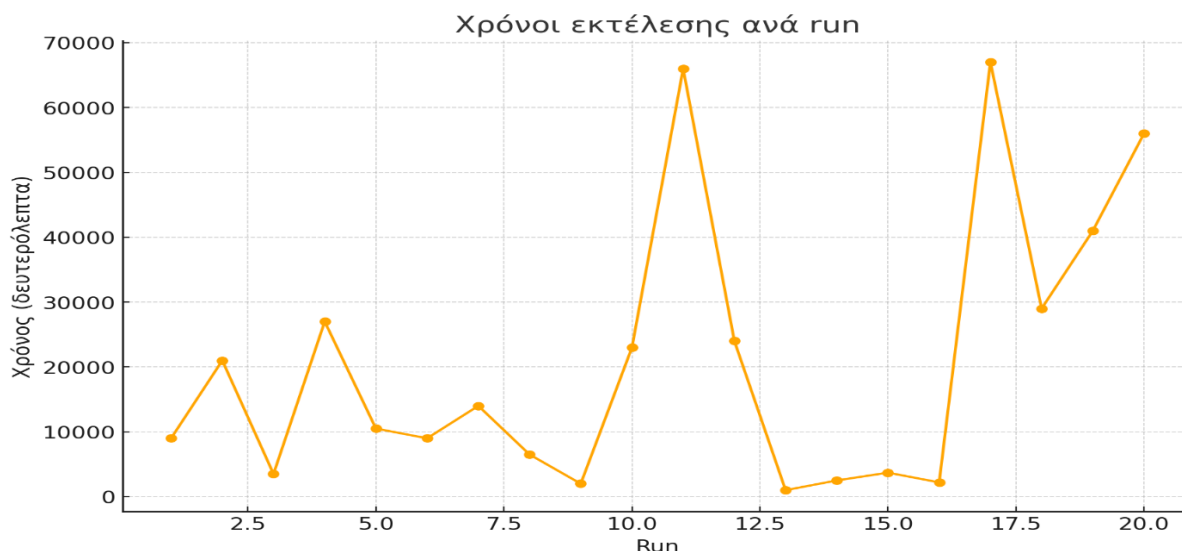


Σχήμα 7.2 – Boxplot καλύτερων fitness σενάριου 1

Το Σχήμα 7.2 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τη διασπορά των καλύτερων τιμών fitness για τα 20 runs. Η διάμεσος βρίσκεται κοντά στο 0.75, κάτι που δείχνει ότι οι μισές εκτελέσεις πέτυχαν καλύτερες λύσεις από αυτό το σημείο και οι υπόλοιπες χειρότερες. Το κεντρικό τμήμα του διαγράμματος, που εκτείνεται περίπου από 0.65 έως 0.79, φανερώνει ότι η πλειονότητα των εκτελέσεων συγκεντρώνεται σε αυτό το εύρος τιμών, γεγονός που αποδεικνύει τη σταθερότητα του αλγορίθμου στις περισσότερες περιπτώσεις.

Τα άκρα του διαγράμματος φτάνουν περίπου από 0.56 έως 0.92, καταδεικνύοντας το πλήρες φάσμα των αποτελεσμάτων. Αυτό σημαίνει ότι σε ορισμένες εκτελέσεις ο αλγόριθμος δεν κατόρθωσε να εντοπίσει αποδοτικά πλάνα (χαμηλά fitness), ενώ σε άλλες βρήκε εξαιρετικά επιτυχημένους συνδυασμούς καλλιιεργειών που μεγιστοποίησαν τη βιωσιμότητα (υψηλά fitness).

Συνολικά, το boxplot δείχνει ότι ο αλγόριθμος παρήγαγε σταθερά και ικανοποιητικά αποτελέσματα στο μεγαλύτερο ποσοστό των εκτελέσεων, με λίγες μόνο ακραίες περιπτώσεις. Αυτό επιβεβαιώνει ότι, παρά τη δυσκολία του σεναρίου, το μοντέλο είναι σε θέση να προσφέρει αξιόπιστες λύσεις, ενώ η ύπαρξη κάποιων αποκλίσεων αντικατοπτρίζει τη ρεαλιστικότητα του προβλήματος και την πολυπλοκότητα της γεωργικής πρακτικής.

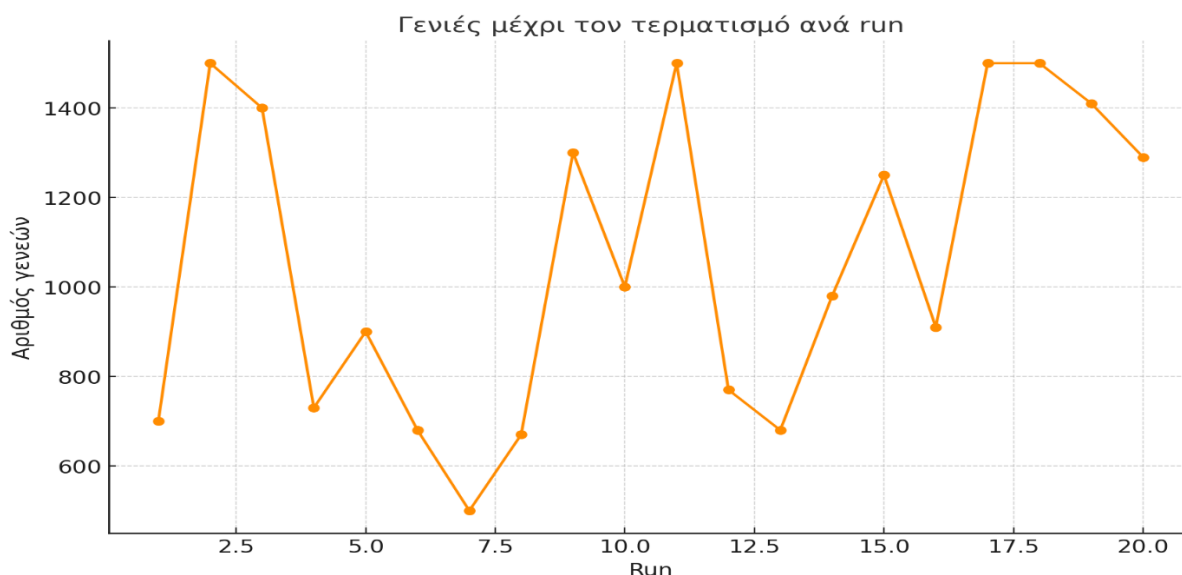


Σχήμα 7.3 – Χρόνοι εκτέλεσης σενάριου 1

Το Σχήμα 7.3 παρουσιάζει τον μέσο χρόνο εκτέλεσης του ΕΑ σε κάθε ένα από τα 20 runs. Παρατηρείται ότι οι χρόνοι κυμαίνονται σε σχετικά μεγάλο εύρος, γεγονός που αντανακλά τη διαφοροποίηση στον αριθμό των γενεών που χρειάστηκαν για να επιτευχθεί σύγκλιση σε κάθε εκτέλεση. Σε κάποιες περιπτώσεις, ο αλγόριθμος εντόπισε ικανοποιητικές λύσεις ταχύτερα, ολοκληρώνοντας νωρίτερα την αναζήτηση, ενώ σε άλλες περιπτώσεις χρειάστηκε να εκτελεστεί για περισσότερες γενιές, με αποτέλεσμα μεγαλύτερους χρόνους.

Η διακύμανση αυτή εξηγείται από τη φύση του προβλήματος: όταν τυχαία επιλεγούν καλλιέργειες που ευνοούν τη δημιουργία σταθερών πλάνων (π.χ. ψυχανθή και είδη με υψηλή επιστροφή θρεπτικών), ο αλγόριθμος συγκλίνει γρήγορα. Αντίθετα, όταν η αρχική σύνθεση είναι λιγότερο ευνοϊκή, απαιτούνται περισσότερες επαναλήψεις, ώστε να βρεθεί μια βιώσιμη λύση.

Συνολικά, το διάγραμμα καταδεικνύει ότι, παρά τις διαφορές, ο χρόνος εκτέλεσης παραμένει σε διαχειρίσιμα επίπεδα, επιτρέποντας την πρακτική εφαρμογή του αλγορίθμου. Η παρουσία αυτής της μεταβλητότητας είναι αναμενόμενη σε σενάρια υψηλής δυσκολίας και δεν επηρεάζει αρνητικά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, καθώς ο αλγόριθμος καταφέρνει σε κάθε περίπτωση να παράγει λειτουργικά πλάνα αμειψισποράς.



Σχήμα 7.4 – Γενιές μέχρι τερματισμό σενάριου 1

Το Σχήμα 7.4 απεικονίζει τον αριθμό γενεών που χρειάστηκαν τα 20 runs του αλγορίθμου μέχρι τον τερματισμό. Παρατηρείται ότι τα περισσότερα runs ολοκληρώνονται περίπου στις 1100–1200 γενιές, με αρκετές όμως εκτελέσεις να αγγίζουν ή και να ξεπερνούν τις 1400–1500 γενιές. Υπάρχουν επίσης λίγες εκτελέσεις που τερμάτισαν πιο νωρίς (π.χ. κοντά στις 600–800 γενιές), γεγονός που δείχνει ότι σε αυτές τις περιπτώσεις ο αλγόριθμος βρήκε γρήγορα ικανοποιητικές λύσεις.

Ο αλγόριθμος χρειάζεται σημαντικό αριθμό γενεών για να εξερευνήσει τον χώρο λύσεων και να προσαρμοστεί στα περιορισμένα δεδομένα. Παρ' όλα αυτά, η μεγάλη διάρκεια δεν είναι απαραίτητα αρνητική: δείχνει ότι ο αλγόριθμος δεν παγιδεύεται εύκολα σε πρόωρη σύγκλιση, αλλά συνεχίζει να βελτιώνει προοδευτικά τις λύσεις του μέχρι να φτάσει σε ένα σταθερό σημείο.

Συνολικά, το διάγραμμα καταδεικνύει την ισορροπία ανάμεσα στη δυσκολία του προβλήματος και στη σταθερότητα της διαδικασίας. Οι περισσότερες εκτελέσεις συγκεντρώνονται γύρω από έναν μέσο αριθμό γενεών, ενώ οι λίγες αποκλίσεις προς τις πολύ υψηλές τιμές αποτελούν ένδειξη ότι σε ορισμένες περιπτώσεις η αναζήτηση ήταν πιο επίμονη και απαιτητική για να βρεθεί βιώσιμη λύση.

Συνοψίζοντας, το σενάριο εδάφους με χαμηλή περιεκτικότητα σε θρεπτικά στοιχεία ανέδειξε τόσο τις δυνατότητες όσο και τους περιορισμούς του αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα: ικανοποιητικά, αλλά όχι τέλεια, καθώς η απουσία βασικών θρεπτικών συστατικών αποτελεί καθοριστικό εμπόδιο για την ανάπτυξη των καλλιιεργειών. Παρά τη δυσκολία του περιβάλλοντος, ο αλγόριθμος επέδειξε ικανότητα προσαρμογής, εντοπίζοντας καλλιέργειες με υψηλά ποσοστά επιστροφής θρεπτικών και ψυχανθή που εμπλουτίζουν το έδαφος με άζωτο. Αν και η απόδοση παρουσίασε διακυμάνσεις, η γενική τάση ήταν θετική, με αρκετά runs να παράγουν σταθερά και αποδοτικά πλάνα αμειψισποράς. Έτσι, το συγκεκριμένο σενάριο λειτουργεί ως απόδειξη ότι ο αλγόριθμος μπορεί να προσφέρει χρήσιμες και βιώσιμες λύσεις ακόμα και σε συνθήκες που απέχουν πολύ από το ιδανικό, διατηρώντας την πρακτική του αξία για εφαρμογή σε πραγματικά αγροτικά περιβάλλοντα.

7.2 Σενάριο 2: Μηδενική Άρδευση

Στο δεύτερο σενάριο εξετάστηκε η περίπτωση όπου δεν παρέχεται καθόλου άρδευση στο χωράφι, κάτι που αντιπροσωπεύει ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες καλλιέργειας. Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα των 20 εκτελέσεων, η συνολική απόδοση του αλγορίθμου ήταν καλή, αν και χαμηλότερη σε σχέση με πιο ευνοϊκές συνθήκες. Συγκεκριμένα, ο μέσος όρος fitness διαμορφώθηκε στο 0.7842, η διάμεσος στο 0.7780, ενώ η τυπική απόκλιση ήταν 0.0504, ένδειξη ότι οι λύσεις κυμάνθηκαν σε σχετικά συνεπή επίπεδα. Το εύρος min–max (0.6888–0.8840) δείχνει ότι ο αλγόριθμος μπορούσε σε ορισμένες περιπτώσεις να φτάσει αρκετά υψηλές επιδόσεις, με τον μέσο αριθμό γενεών μέχρι τον τερματισμό να βρίσκεται στις 1106.9.

Τα δύο καλύτερα πλάνα αμειψισποράς που παρήχθησαν ήταν:

- [Κόλιανδρος, Βρώμη, Βίκος, Κόλιανδρος, Μαυρομάτικο φασόλι, Πατάτα, Κούκι, Σπανάκι]
- [Άνηθος, Κνήκος, Ρεβίθι, Ηλιοτρόπιο, Κτηνοτροφικό μπιζέλι, Αραβόσιτος]

Και στις δύο περιπτώσεις, οι καλλιέργειες που εμφανίζονται έχουν από τις πιο χαμηλές απαιτήσεις σε νερό σε σχέση με τον μέσο όρο της βάσης δεδομένων. Οι περισσότερες χρειάζονται από 350 έως 600 mm νερού κατά τον κύκλο ανάπτυξης, με εξαίρεση το ηλιοτρόπιο και την πατάτα που απαιτούν υψηλότερες ποσότητες. Αυτό δείχνει ότι ο αλγόριθμος προσαρμόστηκε σωστά στους περιορισμούς του σεναρίου, επιλέγοντας κυρίως ανθεκτικά είδη με χαμηλή υδατική απαίτηση.

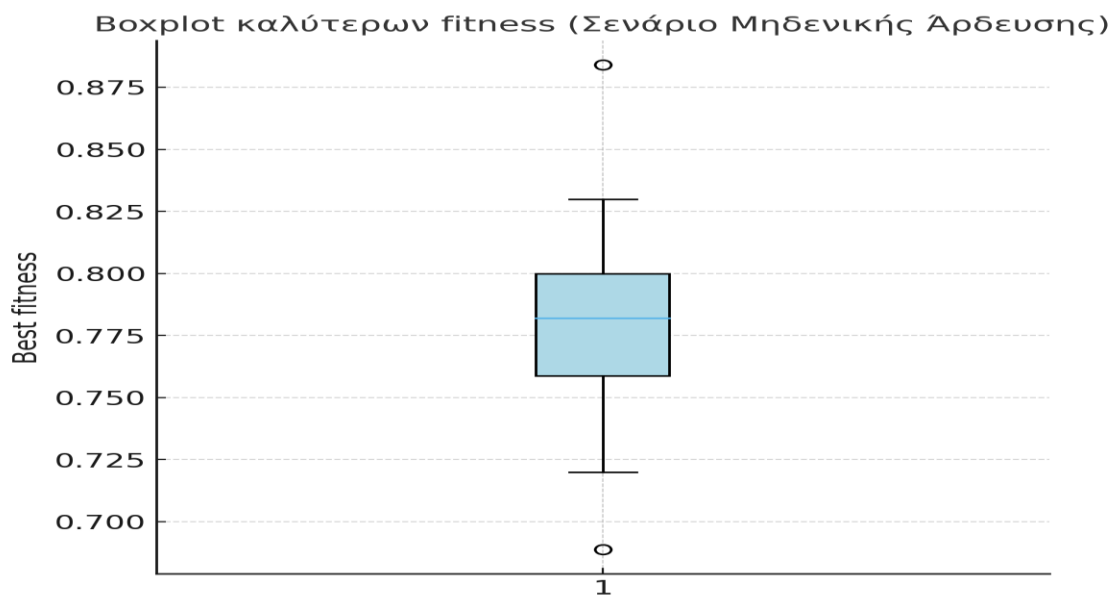
Η συνολική εικόνα που προκύπτει από τα αριθμητικά μεγέθη συμπληρώνεται και από την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Μέσα από τα διαγράμματα που ακολουθούν, αποτυπώνεται πιο καθαρά η κατανομή των καλύτερων τιμών fitness, η συνολική διασπορά των αποτελεσμάτων, οι χρόνοι εκτέλεσης και ο αριθμός γενεών που απαιτήθηκαν μέχρι τον τερματισμό. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατή μια πιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση του αλγορίθμου, όχι μόνο ως προς την τελική απόδοση, αλλά και σε σχέση με τη σταθερότητα, την αποδοτικότητα και τη συνέπεια των λύσεων που παρήγαγε.



Σχήμα 7.5 – Κατανομή καλύτερων fitness σενάριου 2

Το Σχήμα 7.5 παρουσιάζει την κατανομή των καλύτερων τιμών fitness για τα 20 runs του αλγορίθμου στο σενάριο μηδενικής άρδευσης. Οι περισσότερες εκτελέσεις συγκεντρώνονται στην περιοχή 0.77–0.80, γεγονός που αποκαλύπτει μια τάση του αλγορίθμου να καταλήγει σε σταθερές αλλά όχι εξαιρετικά υψηλές λύσεις. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ωστόσο, ο αλγόριθμος κατάφερε να εντοπίσει ιδιαίτερα αποδοτικά plána, με τις καλύτερες τιμές να φτάνουν μέχρι και το 0.88. Αντίθετα, σε μεμονωμένα runs οι επιδόσεις ήταν χαμηλότερες, γύρω στο 0.69–0.72, κάτι που μπορεί και να οφείλεται στην τυχαία επιλογή καλλιεργειών που δεν είχαν χαμηλές ανάγκες σε νερό και επομένως δεν μπορούσαν να αποδώσουν καλά σε αυτό το περιβάλλον.

Η εικόνα αυτή καταδεικνύει τη δυσκολία του προβλήματος πως χωρίς καθόλου άρδευση, οι επιλογές είναι περιορισμένες και ο αλγόριθμος πρέπει να στηριχθεί σε είδη που μπορούν να αντεπεξέλθουν με φυσική βροχόπτωση.

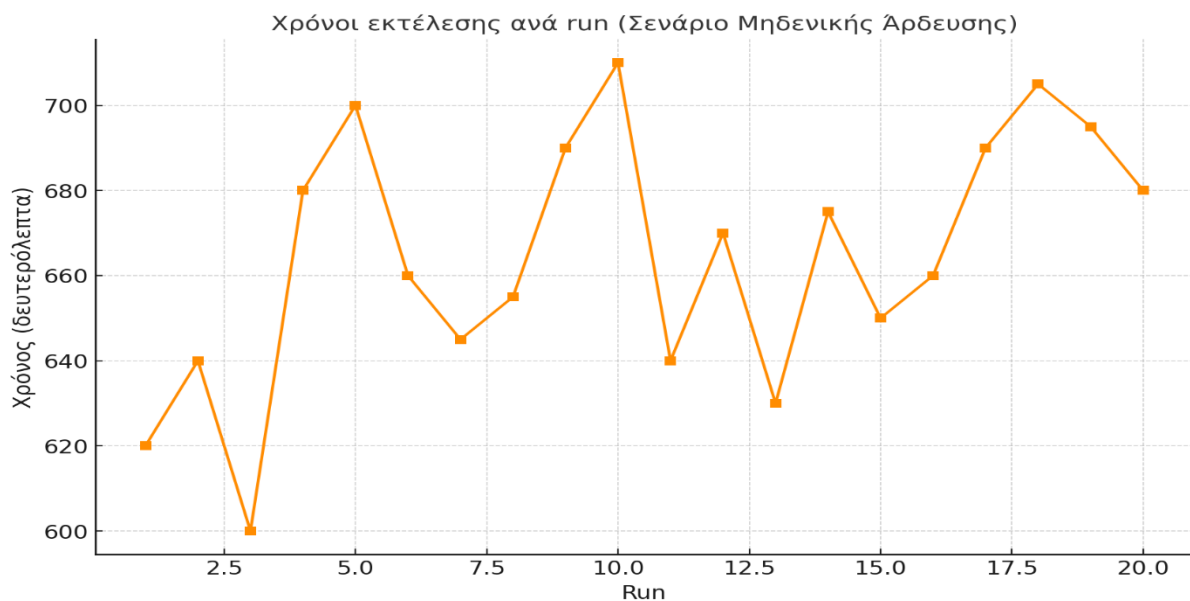


Σχήμα 7.6 – Boxplot καλύτερων fitness σενάριου 2

Το Σχήμα 7.6 παρουσιάζει συγκεντρωτικά την κατανομή των καλύτερων fitness για το σενάριο μηδενικής άρδευσης. Η διάμεσος εντοπίζεται γύρω στο 0.78, γεγονός που συμφωνεί με την παρατήρηση ότι οι περισσότερες εκτελέσεις συγκλίνουν σε ένα σταθερό «μεσαίο» επίπεδο απόδοσης. Το εύρος των τιμών, από περίπου 0.72 έως 0.82, δείχνει ότι ο αλγόριθμος λειτουργεί με σχετική σταθερότητα και σπάνια παράγει λύσεις που αποκλίνουν σημαντικά από τον μέσο όρο.

Αξιοσημείωτο είναι ότι στο διάγραμμα εμφανίζονται μεμονωμένα ακραία σημεία τόσο χαμηλότερα (≈ 0.69) όσο και υψηλότερα (≈ 0.88) από το κύριο σώμα των τιμών. Αυτά τα runs αντιπροσωπεύουν περιπτώσεις όπου ο αλγόριθμος είτε παγιδεύτηκε σε λιγότερο αποδοτικούς συνδυασμούς είτε, αντίθετα, πέτυχε εξαιρετικά ευνοϊκά πλάνα με είδη χαμηλών αναγκών σε νερό. Παρότι υπάρχουν, δεν αλλοιώνουν τη συνολική εικόνα, καθώς η μεγάλη πλειονότητα των εκτελέσεων παραμένει συγκεντρωμένη γύρω από τη διάμεσο.

Συνολικά, το boxplot ενισχύει την άποψη ότι ο αλγόριθμος παρουσιάζει συνέπεια και αξιοπιστία στο συγκεκριμένο σενάριο, ενώ τα λίγα ακραία αποτελέσματα αναδεικνύουν τον ρόλο που μπορεί να παίζει η τυχαιότητα στη διαμόρφωση των τελικών πλάνων.



Σχήμα 7.7 – Χρόνοι εκτέλεσης σενάριου 2

Το Σχήμα 7.7 απεικονίζει τους χρόνους εκτέλεσης για κάθε ένα από τα 20 runs του σεναρίου μηδενικής άρδευσης. Οι τιμές κυμαίνονται σε ένα σχετικά στενό εύρος, από περίπου 600 έως 710 δευτερόλεπτα, με τη μεγάλη πλειονότητα των εκτελέσεων να συγκεντρώνεται γύρω στα 650–690 δευτερόλεπτα. Η εικόνα αυτή δείχνει ότι, παρόλο που το σενάριο είναι απαιτητικό, το υπολογιστικό κόστος δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο. Ο αλγόριθμος διατηρεί σταθερή την αποδοτικότητά του, καταφέρνοντας να ολοκληρώνει την αναζήτηση μέσα σε λογικούς χρόνους. Αυτό είναι ιδιαίτερα θετικό, καθώς δείχνει ότι η πολυπλοκότητα του σεναρίου δεν επιβαρύνει τον χρόνο εκτέλεσης.



Σχήμα 7.8 – Γενιές μέχρι τερματισμό σενάριου 2

Το Σχήμα 7.8 παρουσιάζει τον αριθμό των γενεών που απαιτήθηκαν μέχρι τον τερματισμό σε κάθε run του σεναρίου μηδενικής άρδευσης. Παρατηρείται ότι σχεδόν όλες οι εκτελέσεις ολοκληρώθηκαν μέσα σε ένα στενό εύρος, από περίπου 1080 έως 1150 γενιές, με τον μέσο όρο να συγκεντρώνεται γύρω στις 1100. Αυτή η εικόνα υποδηλώνει ότι, παρά τις δυσκολίες που θέτει η πλήρης έλλειψη άρδευσης, ο αλγόριθμος διατήρησε μια σταθερή και επαναλαμβανόμενη συμπεριφορά ως προς τον ρυθμό σύγκλισης.

Το γεγονός ότι οι γενιές παραμένουν κοντά σε έναν κοινό αριθμό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος χρειάζεται έναν συγκεκριμένο «χρόνο μάθησης» για να προσαρμοστεί στις νέες συνθήκες και να βρει πλάνα που αξιοποιούν καλλιέργειες με χαμηλές ανάγκες σε νερό. Σε αντίθεση με το σενάριο φτωχού εδάφους, όπου οι αποκλίσεις ήταν μεγαλύτερες, εδώ η σταθερότητα είναι εντονότερη, στοιχείο που αυξάνει την αξιοπιστία των λύσεων.

Συνοψίζοντας, στο σενάριο της μηδενικής άρδευσης ο αλγόριθμος επέδειξε την ικανότητά του να προσαρμόζεται στις ακραίες συνθήκες, προτείνοντας καλλιέργειες που εμφανίζουν χαμηλές υδατικές απαιτήσεις. Παρότι τα αποτελέσματα σε απόδοση (fitness) ήταν αναμενόμενα χαμηλότερα, η σταθερότητα των runs και η συνέπεια στις γενιές και τους χρόνους εκτέλεσης δείχνουν ότι το μοντέλο παραμένει αξιόπιστο ακόμη και σε περιβάλλοντα με σοβαρούς περιορισμούς.

7.3 Συμπεράσματα από τα Αποτελέσματα και την Ανάλυση

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών ανέδειξε με σαφήνεια τόσο τις δυνατότητες όσο και τους περιορισμούς του προτεινόμενου μοντέλου. Στο σενάριο της έλλειψης θρεπτικών στοιχείων, ο αλγόριθμος απέδειξε ότι μπορεί να προσαρμοστεί σε συνθήκες όπου το έδαφος είναι ιδιαίτερα φτωχό, προτείνοντας πλάνα που περιλάμβαναν καλλιέργειες ικανές να εμπλουτίζουν το έδαφος με θρεπτικά στοιχεία. Αν και οι τιμές του fitness ήταν χαμηλότερες σε σχέση με ένα ευνοϊκό περιβάλλον, η επιλογή ψυχανθών και καλλιεργειών με υψηλή επιστροφή θρεπτικών επιβεβαίωσε τη λογική και τη ρεαλιστικότητα των αποτελεσμάτων.

Στο σενάριο της μηδενικής άρδευσης, ο αλγόριθμος έδειξε την ικανότητά του να προσαρμόζεται σε συνθήκες περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού, διατηρώντας ικανοποιητικό επίπεδο απόδοσης. Τα πλάνα αμειψισποράς που παρήγαγε περιλάμβαναν κυρίως καλλιέργειες με χαμηλές απαιτήσεις σε νερό, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο ΕΑ μπορεί να λαμβάνει υπόψη του τις ιδιαιτερότητες ενός ξηρού περιβάλλοντος και να προτείνει λύσεις που ανταποκρίνονται σε αυτές τις ανάγκες. Σε σύγκριση με το πρώτο σενάριο της έλλειψης θρεπτικών συστατικών, οι τιμές του fitness ήταν υψηλότερες, κάτι που μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενο, καθώς η έλλειψη νερού επιδρά λιγότερο δραστικά στην πλειονότητα των καλλιεργειών σε σχέση με την απουσία βασικών θρεπτικών στοιχείων. Επιπλέον, τα αποτελέσματα

χαρακτηρίστηκαν από καλή σταθερότητα και χαμηλή διακύμανση, ενισχύοντας την αξιοπιστία του αλγορίθμου και δείχνοντας ότι ακόμη και σε συνθήκες ακραίας ξηρασίας, μπορεί να παραγάγει βιώσιμες και συνεπείς στρατηγικές.

Βλέπουμε ότι και στα δύο σενάρια, τα οποία χαρακτηρίζονται από σημαντικές δυσκολίες και περιορισμούς, οι λύσεις που παράγαγε ο αλγόριθμος ήταν ικανοποιητικές. Αυτό ενισχύει την αξιοπιστία του μοντέλου, καθώς δείχνει ότι δεν δυσκολεύεται σε ακραίες συνθήκες. Παράλληλα, η σταθερότητα των αποτελεσμάτων σε πολλαπλές εκτελέσεις καταδεικνύει ότι το μοντέλο δεν βασίζεται σε τυχαία ευρήματα, αλλά παράγει λύσεις με συνέπεια.

Συνολικά, το Κεφάλαιο 7 έδειξε ότι ο αλγόριθμος είναι σε θέση να ανταποκρίνεται σε διαφορετικές και δύσκολες γεωργικές συνθήκες, να προσαρμόζει τις προτάσεις του ανάλογα με τους περιορισμούς και να παράγει βιώσιμα πλάνα αμειψισποράς. Το γεγονός ότι οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με τυχαίες καλλιέργειες καθιστά τα ευρήματα ακόμη πιο αντιπροσωπευτικά της πραγματικότητας, καθώς αντικατοπτρίζουν την ελευθερία και την ποικιλία επιλογών που έχει ο κάθε αγρότης.

Το επόμενο κεφάλαιο (8) θα συνδέσει αυτά τα ευρήματα με το συνολικό πλαίσιο της έρευνας, παρουσιάζοντας τα γενικά συμπεράσματα, τα πλεονεκτήματα του προτεινόμενου συστήματος, καθώς και τις πιθανές κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και βελτίωση.

Κεφάλαιο 8ο: Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις

8.1 Συνοπτικά συμπεράσματα της εργασίας

Η παρούσα εργασία ανέδειξε τη δυναμική των ΕΑ ως ένα εργαλείο στον σχεδιασμό στρατηγικών αμειψισποράς, ικανό να συνδυάζει την επίτευξη υψηλής γεωργικής παραγωγικότητας με τη διασφάλιση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Μέσα από μια εκτενή και συστηματική διαδικασία παραμετροποίησης, δοκιμών και συγκριτικής αξιολόγησης, αναδείχθηκαν οι ρυθμίσεις που προσφέρουν την καλύτερη ισορροπία ανάμεσα στην εξερεύνηση νέων λύσεων και στην εκμετάλλευση ήδη αποδοτικών στρατηγικών. Η μελέτη έδειξε ότι η ενσωμάτωση ελιτισμού, σε συνδυασμό με προσεκτικά σχεδιασμένες στρατηγικές balanced exploration–exploitation, οδηγεί όχι μόνο σε αυξημένη αποδοτικότητα, αλλά και σε πιο σταθερά και αξιόπιστα αποτελέσματα. Με τον τρόπο αυτό, οι ΕΑ αποδεικνύονται κατάλληλοι για την αντιμετώπιση σύνθετων γεωργικών προβλημάτων, προσφέροντας πρακτικές λύσεις που μπορούν να αξιοποιηθούν σε πραγματικά παραγωγικά συστήματα.

8.2 Αξιολόγηση του μοντέλου

Το μοντέλο απέδειξε ότι μπορεί να ανταποκριθεί με συνέπεια και αποτελεσματικότητα σε διαφορετικά και απαιτητικά σενάρια καλλιέργειας, όπως η έλλειψη θρεπτικών στοιχείων και η μηδενική άρδευση. Στην πρώτη περίπτωση, ο αλγόριθμος κατεύθυνε τις λύσεις του προς πλάνα που αξιοποιούσαν σε μεγαλύτερο βαθμό ψυχανθή και καλλιέργειες με υψηλά ποσοστά επιστροφής θρεπτικών συστατικών στο έδαφος, ώστε να αντισταθμιστεί η φτωχή γονιμότητα. Στη δεύτερη περίπτωση, δόθηκε έμφαση σε καλλιέργειες με χαμηλές απαιτήσεις σε νερό, επιλέγοντας είδη ανθεκτικά στην ξηρασία και κατάλληλα για συνθήκες έλλειψης άρδευσης. Τα ευρήματα αυτά δείχνουν ότι το μοντέλο δεν περιορίζεται στην παραγωγή θεωρητικά ορθών λύσεων, αλλά διαθέτει την ευελιξία να προσαρμόζεται σε πραγματικούς περιορισμούς, προτείνοντας στρατηγικές αμειψισποράς με πρακτική αξία για τον αγρότη. Παράλληλα, η ανάλυση των στατιστικών δεικτών (μέσος όρος, διάμεσος, τυπική απόκλιση, εύρος, χρόνοι εκτέλεσης) ανέδειξε μια συνολικά σταθερή και αξιόπιστη συμπεριφορά, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία της μεθοδολογίας και την καθιστά κατάλληλη για εφαρμογή σε ποικίλες καλλιεργητικές συνθήκες.

8.3 Περιορισμοί της προσέγγισης

Παρά τα θετικά αποτελέσματα, η μεθοδολογία της παρούσας εργασίας συνοδεύεται από ορισμένους περιορισμούς που είναι σημαντικό να αναγνωριστούν. Ένας από τους βασικότερους αφορά τη βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε, καθώς οι τιμές των θρεπτικών στοιχείων, των θερμοκρασιών και γενικότερα των καλλιεργητικών αναγκών των φυτών έχουν αντληθεί με αναφορά στις συνθήκες της Ελλάδας. Ωστόσο, ακόμη και μέσα στα όρια της ίδιας χώρας οι τιμές αυτές μπορεί να διαφοροποιούνται σημαντικά από περιοχή σε περιοχή, λόγω διαφορών στο μικροκλίμα, στη σύσταση των εδαφών και στις διαθέσιμες πρακτικές καλλιέργειας. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα της έρευνας, αν και ενδεικτικά, δεν μπορούν να θεωρηθούν απόλυτα αντιπροσωπευτικά για κάθε πιθανή περίπτωση εφαρμογής. Αντίθετα, αντανακλούν μια πιο γενική εικόνα, που χρειάζεται να εξειδικευτεί περαιτέρω όταν το μοντέλο εφαρμοστεί σε πραγματικά αγροτικά περιβάλλοντα.

Αντίστοιχες διαφοροποιήσεις ισχύουν και για τις οικονομικές παραμέτρους. Οι τιμές αγοράς σπόρων αλλά και οι τιμές πώλησης των προϊόντων ενδέχεται να μεταβάλλονται τόσο χρονικά όσο και γεωγραφικά, ακόμη και μεταξύ περιοχών της ίδιας χώρας. Αν και οι διακυμάνσεις αυτές δεν είναι συνήθως ακραίες, μπορούν να επηρεάσουν ουσιαστικά την οικονομική βιωσιμότητα ενός πλάνου αμειψισποράς. Η παρούσα εργασία δεν ενσωμάτωσε τέτοιες διαφοροποιήσεις, γεγονός που περιορίζει την ανάλυση κυρίως στο αγρο-οικολογικό επίπεδο, αφήνοντας εκτός τον άμεσο υπολογισμό της οικονομικής απόδοσης.

8.4 Σύνδεση με τη σύγχρονη αγροτική πολιτική

Η εργασία αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο των σύγχρονων πολιτικών και στρατηγικών που προωθούνται διεθνώς για τη βιώσιμη γεωργία. Οι κατευθύνσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέσα από πρωτοβουλίες όπως η «Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία» και η στρατηγική «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο», δίνουν έμφαση στη μείωση των χημικών εισροών, στην προστασία της υγείας του εδάφους, στη διατήρηση της βιοποικιλότητας και στη βελτίωση της ανθεκτικότητας των αγροτικών συστημάτων απέναντι στις προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής. Στο πλαίσιο αυτό, η ανάπτυξη εργαλείων που μπορούν να υποστηρίξουν τους παραγωγούς στη λήψη αποφάσεων για πιο αποδοτικές και περιβαλλοντικά υπεύθυνες πρακτικές καθίσταται αναγκαία.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά προς αυτήν την κατεύθυνση. Μέσα από τη χρήση ΕΑ, παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης και αξιολόγησης διαφορετικών στρατηγικών αμειψισποράς, προσφέροντας λύσεις που δεν περιορίζονται μόνο στην αγρο-οικολογική βιωσιμότητα, αλλά μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για συνδυασμό παραγωγικότητας και περιβαλλοντικής προστασίας. Έτσι, οι παραγωγοί αποκτούν ένα εργαλείο που τους βοηθά να συμμορφωθούν πιο εύκολα με τις απαιτήσεις των νέων πολιτικών, μειώνοντας την εξάρτηση από χημικά λιπάσματα και ενισχύοντας την υγεία του εδάφους.

Παράλληλα, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από ερευνητές ή φορείς ως μέσο πειραματισμού και εξαγωγής δεδομένων για την αποτελεσματικότητα διαφορετικών στρατηγικών. Τα αποτελέσματα τέτοιων αναλύσεων μπορούν να αποτελέσουν αποδεικτικά στοιχεία για τη διαμόρφωση κατευθυντήριων γραμμών και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε επίπεδο αγροτικής πολιτικής. Με αυτόν τον τρόπο, η εργασία ξεπερνά τα όρια μιας ακαδημαϊκής μελέτης και αποκτά πρακτική αξία, λειτουργώντας ως γέφυρα ανάμεσα στη θεωρητική έρευνα και την εφαρμοσμένη γεωργική πράξη.

8.5 Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής

Η προσομοίωση σεναρίων με περιορισμένους πόρους, όπως η έλλειψη νερού ή η χαμηλή διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος, αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής. Οι μεταβολές στο κλίμα, η αύξηση της συχνότητας ακραίων καιρικών φαινομένων και η σταδιακή μείωση της διαθεσιμότητας υδατικών πόρων δημιουργούν ένα νέο, πιο ασταθές περιβάλλον για τη γεωργική παραγωγή. Σε αυτό το πλαίσιο, εργαλεία όπως ο ΕΑ που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία μπορούν να καθοδηγήσουν τους αγρότες προς πιο ανθεκτικά και βιώσιμα συστήματα καλλιέργειας, βοηθώντας τους να επιλέγουν στρατηγικές που διατηρούν την παραγωγικότητα ακόμη και υπό δύσκολες συνθήκες.

Η δυνατότητα ενσωμάτωσης πραγματικών κλιματικών δεδομένων ή ακόμη και προβλέψεων για τις επόμενες δεκαετίες θα ενίσχυε ακόμη περισσότερο τη χρησιμότητα του μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο, το εργαλείο δεν θα περιοριζόταν μόνο σε μια ανάλυση με βάση τα τρέχοντα δεδομένα, αλλά θα μπορούσε να υποστηρίξει στρατηγικές μακροπρόθεσμης προσαρμογής, βοηθώντας την αγροτική παραγωγή να ανταπεξέλθει στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

8.6 Μελλοντικές κατευθύνσεις

Μελλοντικά, το μοντέλο μπορεί να εξελιχθεί σε πολλαπλές κατευθύνσεις, ώστε να αυξήσει τόσο την επιστημονική του ακρίβεια όσο και την πρακτική του χρησιμότητα. Μια πρώτη κατεύθυνση αφορά τον εμπλουτισμό της βάσης δεδομένων με περισσότερες καλλιέργειες και πιο ακριβή οικολογικά δεδομένα, που θα λαμβάνουν υπόψη τις διαφοροποιήσεις ανά περιοχή ή μικροκλίμα. Έτσι, το εργαλείο θα μπορεί να εφαρμοστεί σε ευρύτερο φάσμα γεωργικών συστημάτων, προσαρμοζόμενο καλύτερα στις τοπικές ιδιαιτερότητες.

Δεύτερον, η αξιοποίηση πραγματικών δεδομένων από εργαστηριακές αναλύσεις εδαφών, καθώς και η ενσωμάτωση δεδομένων από αισθητήρες πεδίου (IoT), θα μπορούσε να προσφέρει δυναμική και σε πραγματικό χρόνο παραμετροποίηση. Αυτό θα επέτρεπε στον αλγόριθμο να προσαρμόζει τις προτάσεις του βάσει των πραγματικών συνθηκών ενός χωραφιού, μειώνοντας την απόσταση ανάμεσα στη θεωρητική μοντελοποίηση και στην καθημερινή πρακτική εφαρμογή.

Τέλος, η αξιοποίηση τεχνολογιών big data και προηγμένων τεχνικών μηχανικής μάθησης θα μπορούσε να επιτρέψει στον αλγόριθμο να «μαθαίνει» από ιστορικά δεδομένα και να προσαρμόζεται αυτόματα στις εκάστοτε συνθήκες. Ένας τέτοιος συνδυασμός ΕΑ και μηχανικής μάθησης θα μπορούσε να οδηγήσει στη δημιουργία ενός πραγματικά έξυπνου συστήματος υποστήριξης αποφάσεων, με τη δυνατότητα να προσφέρει προβλέψεις και προτάσεις που βελτιώνονται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου.

8.7 Τελική αποτίμηση

Συνολικά, η παρούσα εργασία κατέδειξε με σαφήνεια ότι οι ΕΑ μπορούν να αποτελέσουν ένα ισχυρό και ευέλικτο εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων στο πλαίσιο της βιώσιμης γεωργίας. Μέσα από μια σειρά συστηματικών δοκιμών φάνηκε ότι, ακόμη και σε περιβάλλοντα με έντονους περιορισμούς, όπως η έλλειψη θρεπτικών στοιχείων ή η απουσία άρδευσης, ο αλγόριθμος είναι σε θέση να προσαρμόζεται και να παράγει στρατηγικές αμειψισποράς που διατηρούν την παραγωγικότητα και ενισχύουν τη μακροπρόθεσμη γονιμότητα του εδάφους.

Παρά το ότι τα αποτελέσματα στηρίχθηκαν σε σταθερά και απλουστευμένα δεδομένα, η συνοχή και η αξιοπιστία τους δείχνουν ότι η μεθοδολογία μπορεί να μεταφερθεί στην πράξη, παρέχοντας στους αγρότες ένα εργαλείο που τους βοηθά να σχεδιάσουν πιο ανθεκτικά και προσαρμοστικά πλάνα. Η συμβολή της εργασίας δεν περιορίζεται μόνο στην παραγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων, αλλά κυρίως στην ανάδειξη του τρόπου με τον οποίο η ΑΙ μπορεί να ενσωματωθεί σε πρακτικά ζητήματα αγροτικής παραγωγής.

Οι περιορισμοί που αναγνωρίστηκαν, όπως η χρήση περιορισμένης βάσης δεδομένων ή η απουσία οικονομικών παραμέτρων, δεν μειώνουν την αξία των ευρημάτων, αλλά αντιθέτως ανοίγουν τον δρόμο για περαιτέρω έρευνα και βελτιώσεις. Η μελλοντική ανάπτυξη του μοντέλου μπορεί να οδηγήσει σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα που θα συνδυάζει οικολογικούς, τεχνολογικούς και οικονομικούς παράγοντες, καθιστώντας το ένα πολύτιμο εργαλείο τόσο για τους παραγωγούς όσο και για τους φορείς χάραξης πολιτικής. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μετάβαση προς μια γεωργία περισσότερο βιώσιμη, ανθεκτική και συμβατή με τις σύγχρονες προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής και της επισιτιστικής ασφάλειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

[39] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.

[40] J. R. Koza, *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Cambridge, MA: MIT Press, 1992.

Internet Site

[33] *Financial Times*, “FT Tech for Growth Forum 2025 – Agriculture and sustainability,” *Financial Times*, Feb. 4, 2025.

Journal Articles

[1] X. Yang, J. Xiong, T. Du, X. Ju, Y. Gan, S. Li, L. Xia, Y. Shen, S. Pacenka, T. S. Steenhuis, K. H. M. Siddique, S. Kang, and K. Butterbach-Bahl, “Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health,” *Nature Communications*, vol. 15, no. 198, pp. 1–11, 2024, doi: [10.1038/s41467-023-44464-9](https://doi.org/10.1038/s41467-023-44464-9).

[2] M. E. Smith, J. Doe, A. Brown, and L. White, “Rethinking Crop Rotational Benefits Under Climate Change,” *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 8, 2024. doi: 10.3389/fsufs.2024.1168642

[3] B. Volsi, J. M. Souza, A. W. D. Silva, and M. M. Telles, “The diversification of species in crop rotation increases productivity and sustainability,” *Scientific Reports*, vol. 12, art. 23718, 2022. doi: 10.1038/s41598-022-23718-4.

[4] D. Tzemi, “The introduction of legume-based crop rotations: Enhancing soil fertility and reducing environmental pressures,” *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2024. doi: 10.1080/14735903.2024.2335085.

[5] T. M. Bowles, C. S. Atallah, M. M. Campbell, B. Gaudin, and A. C. McNally, *Long-Term Evidence Shows that Crop-Rotation Diversification Increases Agricultural Resilience to Adverse Growing Conditions in North America*. *One Earth*, vol. 3, no. 2, pp. 1–12, 2020.

[6] A. Bathaei and D. Štreimikienė, *A Systematic Review of Agricultural Sustainability Indicators*. Basel, Switzerland: MDPI, 2023.

[7] C. G. Langton, “Artificial Life,” in *Artificial Life I*, SFI Studies in the Sciences of Complexity, vol. 6, pp. 1–47, Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1989.

[8] C. Gershenson, V. Trianni, J. Werfel, and H. Sayama, “Self-Organization and Artificial Life: A Review,” *Artificial Life*, vol. 26, no. 3, pp. 391–408, 2020, doi: 10.1162/artl_a_00332.

[9] M. A. Bedau, “Artificial Life,” in *Handbook of the Philosophy of Science, vol. 3: Philosophy of Biology*, M. Matthen and C. Stephens, Eds. Amsterdam: Elsevier, 2007, pp. 195–230.

[10] J. von Neumann, *Theory of Self-Reproducing Automata*, A. W. Burks, Ed. Urbana, IL: University of Illinois Press, 1966.

- [11] M. Gardner, “Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway’s new solitaire game ‘Life’,” *Scientific American*, vol. 223, no. 4, pp. 120–123, 1970.
- [12] S. Wolfram, *A New Kind of Science*. Champaign, IL: Wolfram Media, 2002.
- [13] N. Ganguly, B. Sikdar, A. Deutsch, G. Canright, and P. P. Chaudhuri, “A survey on cellular automata,” *Theoretical Computer Science*, vol. 320, no. 2–3, pp. 241–254, 2004.
- [14] N. B. B. Salem and M. M. Abd El-Kader, “Applications of cellular automata in image processing: A survey,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 91, no. 4, pp. 1–9, 2014.
- [15] S. Nandi, B. K. Kar, and P. P. Chaudhuri, “Theory and applications of cellular automata in cryptography,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 43, no. 12, pp. 1346–1357, 1994.
- [16] C. M. Macal and M. J. North, “Tutorial on agent-based modelling and simulation,” *Journal of Simulation*, vol. 4, no. 3, pp. 151–162, 2010, doi: 10.1057/jos.2010.3.
- [17] A. Marvuglia, A. Benetto, and M. Jury, “Modelling approaches for consequential life cycle assessment (C-LCA) of bioenergy: critical review and proposed framework for biogas production,” *AIMS Agriculture and Food*, vol. 3, no. 4, pp. 535–561, 2018, doi: 10.3934/agrfood.2018.4.535.
- [18] A. Śłowik, “Evolutionary algorithms and their applications to engineering problems,” *Studies in Computational Intelligence*, vol. 830, pp. 1–23, 2018.
- [19] S. Katoch, S. S. Chauhan, and V. Kumar, “A review on genetic algorithm: past, present, and future,” *Multimedia Tools and Applications*, vol. 80, no. 5, pp. 8091–8126, 2020, doi: 10.1007/s11042-020-10139-6.
- [20] H. H. Arabani and S. A. Gharehchopogh, “Qualities, challenges and future of genetic algorithms: a literature review,” *arXiv preprint arXiv:2011.05277*, 2020.
- [21] M. F. Ahmad, S. K. Abd Latiff, N. A. M. Isa, and M. N. M. Warip, “Differential evolution: A recent review based on state-of-the-art works,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 13, no. 4, art. 101613, 2022, doi: 10.1016/j.asej.2021.12.018.
- [22] T. Bäck, “Evolutionary algorithms for parameter optimization—Thirty years beyond the 1989 breakthrough,” *Evolutionary Computation*, vol. 31, no. 2, pp. 81–91, 2023, doi: 10.1162/evco_a_00317.
- [23] J. D. Murray, *Mathematical Biology, Volume II: Spatial Models and Biomedical Applications*, 3rd ed. New York: Springer, 2003.
- [24] A. M. Turing, “The Chemical Basis of Morphogenesis,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 237, pp. 37–72, 1952.
- [25] L. Sa, F. Xiong, and Y. Ding, “An Artificial Life Computational Model for the Dynamics of Agro-ecosystem,” in **Bio-Inspired Computational Intelligence and Applications (Lecture Notes in Computer Science, vol. 4688)**, LSMS 2007, pp. 144–151, 2007.
- [26] V. Grimm, U. Berger, D. L. DeAngelis, J. G. Polhill, J. Giske, and S. F. Railsback, “The ODD protocol: A review and first update,” *Ecological Modelling*, vol. 221, no. 23, pp. 2760–2768, 2010.
- [27] S. Manson, L. An, K. C. Clarke, A. Heppenstall, J. Koch, B. Krzyzanowski, F. Morgan, D. O’Sullivan, B. C. Runck, E. Shook, and L. Tesfatsion, “Methodological Issues of Spatial Agent-Based Models,” *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 23, no. 1, p. 3, 2020.
- [28] V. Corruble, M. Takeda, and E. Suzuki, Eds., *Discovery Science: 10th International Conference, DS 2007, Sendai, Japan, October 1–4, 2007, Proceedings*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.

- [29] V. Grimm, S. F. Railsback, C. E. Vincenot, U. Berger, C. Gallagher, D. L. DeAngelis, ... and J. C. Thiele, "The ODD protocol for describing agent-based and other simulation models: A second update to improve clarity, replication, and structural realism," *Ecological Modelling*, vol. 435, p. 125254, 2020.
- [30] F. Assimakopoulos, C. Vassilakis, D. Margaris, K. Kotis, and D. Spiliotopoulos, "Artificial Intelligence Tools for the Agriculture Value Chain: Status and Prospects," *Electronics*, vol. 13, no. 22, p. 4362, 2024. doi: 10.3390/electronics13224362.
- [31] A. Marvuglia, T. Navarrete Gutiérrez, P. Baustert, and E. Benetto, "Implementation of Agent-Based Models to support Life Cycle Assessment: A review focusing on agriculture and land use," *AIMS Agriculture and Food*, vol. 3, no. 4, pp. 535–560, Dec. 2018, doi: 10.3934/agrfood.2018.4.535.
- [32] A. Alonso-Adame, J. Van Meensel, F. Marchand, S. Van Passel, and S. Farahbakhsh, "Sustainability transitions in agri-food systems through the lens of agent-based modeling: a systematic review," *Sustainability Science*, vol. 19, pp. 2101–2118, 2024, doi: 10.1007/s11625-024-01551-0
- [34] T. Bäck, D. B. Fogel, and Z. Michalewicz, *Handbook of Evolutionary Computation*. Oxford, U.K.: Oxford University Press, 1997.
- [35] K. A. De Jong, *Evolutionary Computation: A Unified Approach*. Cambridge, MA: MIT Press, 2006.
- [36] X. Yao, "Evolving artificial neural networks," *Proceedings of the IEEE*, vol. 87, no. 9, pp. 1423–1447, 1999, doi: 10.1109/5.784219.
- [37] A. E. Eiben and J. E. Smith, *Introduction to Evolutionary Computing*, 2nd ed. Berlin: Springer, 2015.
- [38] D. Greiner, J. M. Emperador, and E. Gallego, "Application of evolutionary algorithms to agricultural engineering problems," *Biosystems Engineering*, vol. 103, no. 1, pp. 46–54, 2009, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.02.009.
- [41] H.-P. Schwefel, *Evolution and Optimum Seeking: The Sixth Generation*. New York: Wiley, 1995.
- [42] L. J. Fogel, A. J. Owens, and M. J. Walsh, *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*. New York: Wiley, 1966.
- [43] J. C. J. Groot, G. J. M. Oomen, and W. A. H. Rossing, "Multi-objective optimization and design of farming systems," *Agricultural Systems*, vol. 110, pp. 63–77, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.agsy.2012.03.012.
- [44] Y. Yin, S. Guo, Q. Xu, J. Liu, H. Wang, Y. Zhuang, Z. Wang, L. Hua, H. Liu, and L. Zhai, "Co-benefits for cropland yield, nitrogen emissions, and climate impact through multi-objective optimization agricultural manure solutions," *Nature Communications*, vol. 16, no. 6415, pp. 1–13, 2025, doi:10.1038/s41467-025-61885-w
- [45] E. Manthou, S.-L. Lago, E. Dagnes, A. Lianou, P. Tsakanikas, E. Z. Panagou, M. Anastasiadi, F. Mohareb, and G.-J. E. Nychas, "Application of spectroscopic and multispectral imaging technologies on the assessment of ready-to-eat pineapple quality: A performance evaluation study of machine learning models generated from two commercial data analytics tools,"
- [46] A. Soussi, E. Zero, R. Sacile, D. Trincherro, and M. Fossa, "Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review," *Sensors*, vol. 24, no. 8, art. 2647, 2024, doi: 10.3390/s24082647.

- [47] S. Mansoor, S. Iqbal, S. M. Popescu, S. L. Kim, Y. S. Chung, and J.-H. Baek, "Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture: Trends, challenges and future perspectives," *Frontiers in Plant Science*, vol. 16, art. 1587869, 2025. doi: 10.3389/fpls.2025.1587869.
- [48] P. Vereijken, "A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms," *European Journal of Agronomy*, vol. 7, pp. 235–250, 1997
- [49] S. Dogliotti, W. A. H. Rossing, and M. K. van Ittersum, "ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations," *European Journal of Agronomy*, vol. 19, no. 2, pp. 239–250, 2003, doi: 10.1016/S1161-0301(02)00047-3.

