



**ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ**

Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών

**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**ΕΥΦΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ  
(INTELLIGENT SYSTEMS)**  
(ΠΔ 96/2015/ΦΕΚ 163 Α'/20.08.2014)



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

## **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Σχεδιασμός τροχιάς Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών για  
εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας**

Υπό:

Ευαγγελία Άννα Παπαϊωάννου

A.M.: 2022018001



Η Μεταπτυχιακή Διατριβή της Ευαγγελίας Άννας Παπαϊωάννου, εγκρίνεται:

### ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αναπληρωτής Καθηγητής Ελευθέριος Δοϊτσίδης (Επιβλέπων), ELEFTHERIOS DOITSIDIS  
02.07.2025 12:40

Καθηγητής Νικόλαος Τσουρβελούδης, NIKOLAOS TSOURVELOUDIS  
03/07/2025 10:54

Καθηγήτρια Ειρήνη Καρανάσιου

ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ – ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

2025

III

#### Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο docs.gov.gr/validate



Επιβεβαιώνεται το γνήσιο. Υπουργείο  
Ψηφιακής Διακυβέρνησης / Verified by the Ministry  
of Digital Governance, Hellenic Republic  
20250703125808+03'00'

Κωδικός εγγράφου: drxy8skIxEeUleDD5thaTA

: 1/1

Υπογραφή:  
ΕΙΡΗΝΗ ΚΑΡΑΝΑΣΙΟΥ  
Πατρώνυμο: ΣΩΤΗΡΙΟΣ  
ΑΦΜ: 105781977  
Ημ. Υπογραφής: 03/07/2025 12:58:05

*Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων και Πολυτεχνείου Κρήτης.*

Copyright ©Ευαγγελία Άννα Παπαϊωάννου, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερα θερμές ευχαριστίες μου στον Αναπληρωτή Καθηγητή του Π.Κ. κ. Ε. Δοϊτσίδη που ήταν ο επιβλέπων της μεταπτυχιακής μου διατριβής, καθώς με βοήθησε εύστοχα στην επιλογή του θέματος αλλά και για τη συνεχή καθοδήγηση κατά την εκτέλεση του πειραματικού μέρους. Οι πολύ διαφωτιστικές βασικές υποδείξεις και διορθώσεις κατά τη συγγραφή του κειμένου αλλά και κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων ήταν καθοριστικές.

Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου τόσο στον κ. Ν. Τσουρβελούδη αλλά και στην κα. Ε. Καρανάσιου Καθηγητή του Π.Κ. και Καθηγήτρια της Σχολής Ευελπίδων αντίστοιχα, για τη βοήθειά τους στην διόρθωση της εργασίας όσο και στον κ. Γεώργιο Κλάδη για την πολύτιμη βοήθεια και τις διευκρινίσεις του κυρίως στη διεξαγωγή του πειραματικού μέρους όσο και στη συγγραφή της εργασίας αλλά και για τη διαμόρφωση του τελικού κειμένου. Επιπλέον θα ήταν παράλειψή μου να μην αναφερθώ στον κ. Χ. Καβαλάρη Μέλος ΕΔΙΠ του Π.Θ., ο οποίος απλόχερα μου παρέδωσε το φωτογραφικό υλικό των καλλιιεργειών που χρησιμοποιήθηκαν στο πειραματικό μέρος.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους φίλους μου καθώς και τους συμφοιτητές μου οι οποίοι ευγενικά προσφέρθηκαν να με βοηθήσουν και να με στηρίζουν με συνεχή ενθάρρυνση κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος Εικόνων .....	XI
Κατάλογος Πινάκων.....	XVI
Κατάλογος Συντμήσεων.....	XVII
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....</b>	<b>1</b>
Εισαγωγή .....	1
1.1. Γεωργία Ακριβείας (ΓΑΚΡ).....	1
1.2. Πρόβλημα Σχεδιασμού Τροχιάς (ΣΤ) και Πρόβλημα Κάλυψης (ΠΚ).....	2
1.3. Σκοπός.....	4
1.4. Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν.....	4
1.5. Διάρθρωση Κεφαλαίων.....	7
1.6. Σύνοψη Κεφαλαίου .....	8
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....</b>	<b>9</b>
Αναπαράσταση Δεδομένων και Ενσωμάτωση του Δείκτη Βλάστησης.....	9
2.1. Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης (ΔΚΔΒ) .....	9
2.1.1. Γενικά-Ορισμός.....	9
2.1.2. Μαθηματική έκφραση.....	10
2.1.3. Τιμές ΔΚΔΒ.....	10
2.2. Δημιουργία ΔΚΔΒ .....	11
2.2.1. Εισαγωγή-Βιβλιογραφικές αναφορές .....	11
2.2.2. Επεξήγηση ΔΚΔΒ .....	12
2.2.2.1. Γενικά-Εφαρμογές.....	12
2.2.2.2. Αλγόριθμος Απεικόνισης ΔΚΔΒ.....	14
2.3. Αναπαράσταση χαρτών .....	17
2.4. Γράφος Ορατότητας (ΓΟ).....	18

2.4.1. Γενικά-Ορισμός .....	18
2.4.2. Ορολογία .....	19
2.5. Δημιουργία ΓΟ .....	20
2.5.1. Εισαγωγή-Βιβλιογραφικές αναφορές .....	20
2.5.2. Επεξήγηση ΓΟ .....	20
2.5.2.1. Γενικά-Εφαρμογές.....	20
2.5.2.2. Μοντελοποίηση .....	21
2.5.2.3. Ανάλυση .....	23
2.6. Συσχέτιση Γράφου-ΔΚΔΒ και Αναπαράσταση δομών/αντικειμένων.....	25
2.7. Σύνοψη Κεφαλαίου .....	27
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....</b>	<b>28</b>
Εύρεση Βέλτιστου Μονοπατιού για το Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή με Γενετικούς Αλγόριθμους .....	<b>28</b>
3.1. Πρόβλημα Βελτιστοποίησης.....	28
3.1.1. Εισαγωγή-Βιβλιογραφικές αναφορές .....	28
3.1.2. Ανάλυση-Ορισμός.....	30
3.2. Πρόβλημα Πλανόδιου Πωλητή (ΠΠΠ) .....	31
3.3. Αλγόριθμοι σχεδιασμού διαδρομής.....	33
3.3.1. Εισαγωγή-Βιβλιογραφικές αναφορές .....	33
3.3.2. Αλγόριθμος Ντάικστρα .....	35
3.3.3. Αλγόριθμος Floyd-Warshall.....	35
3.3.4. Γενετικός Αλγόριθμος (ΓΑ).....	36
3.3.4.1. Ανάλυση ΓΑ.....	37
3.3.4.2. ΓΑ-Τελεστές .....	40
3.3.4.2.1. Κωδικοποίηση.....	40
3.3.4.2.2. Επιλογή .....	42



3.3.4.2.3. Διασταύρωση.....	46
3.3.4.2.4. Μετάλλαξη.....	48
3.3.5. Συνάρτηση καταλληλότητας.....	50
3.3.6. Τελεστές ΓΑ για την Επίλυση του ΠΠΠ .....	51
3.4. Σύνοψη Κεφαλαίου .....	52
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....</b>	<b>53</b>
Παράδειγμα Εύρεσης Βέλτιστου Μονοπατιού για Εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας .....	<b>53</b>
4.1. Δημιουργία ΓΑ .....	53
4.1.1. Εισαγωγή-Βιβλιογραφικές αναφορές .....	53
4.1.2. Επεξήγηση ΓΑ.....	54
4.1.2.1. Γενικά-Εφαρμογές.....	54
4.1.2.2. Μοντελοποίηση .....	55
4.1.2.3. Ανάλυση .....	57
4.2. Υλοποίηση-Αποτελέσματα .....	59
4.2.1. Γενικά .....	59
4.2.2. Προδιαγραφές ΜηΕΑ .....	59
4.2.3. Επιλογή αγροτεμαχίων .....	60
4.2.4. Διαδικασία υλοποίησης .....	60
4.2.4.1. Λήψη αεροφωτογραφιών.....	60
4.2.4.2. Επεξεργασία αεροφωτογραφιών .....	61
4.2.4.3. Δημιουργία ΓΟ και Υπολογισμός Βάρους.....	61
4.2.4.4. Σενάρια .....	63
4.3. Συζήτηση .....	75
4.4. Σύνοψη Κεφαλαίου .....	77
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....</b>	<b>78</b>

Επίλογος.....	78
---------------	----

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....</b>	<b>79</b>
------------------------	-----------

Σύνοψη .....	79
--------------	----

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....</b>	<b>80</b>
------------------------	-----------

Βιβλιογραφία .....	80
--------------------	----

## Κατάλογος Εικόνων

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εικόνα 1.1.	Χρήσεις των ΜηΕΑ στον αγροτικό τομέα (Katekar & Cheruku, 2022) .....	2
Εικόνα 1.2.	Απλό πρόβλημα σχεδιασμού κάλυψης μίας περιοχής (Choi, 2009). .....	3
Εικόνα 1.3.	Απεικόνιση υγιούς και μη βλάστησης με βάση τη διαφορά ανακλαστικότη- τας των RED και NIR (Evangelides & Nobajas, 2020). .....	5
Εικόνα 1.4.	Γράφος ορατότητας με εμφάνιση του βέλτιστου μονοπατιού από ένα αρχικό σε ένα τελικό σημείο (Kurazume <i>et al.</i> , 2017). .....	6

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Εικόνα 2.1.	Παράδειγμα χάρτη ΔΚΔΒ (Ranagalage, Estoque & Murayama, 2017). .....	13
Εικόνα 2.2.	Διάγραμμα ροής αλγορίθμου για τον υπολογισμό του ΔΚΔΒ. ....	15
Εικόνα 2.3.	Παράδειγμα ΓΟ (Lozano-Pérez & Wesley, 1979). .....	21
Εικόνα 2.4.	Διάγραμμα ροής αλγορίθμου για την δημιουργία ενός ΓΟ. ....	22

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Εικόνα 3.1.	ΠΠΠ με πρόσθετους περιορισμούς για αυτό το πρόβλημα (Pham, Bestaoui & Mammar, 2017). .....	32
Εικόνα 3.2.	ΓΑ που χρησιμοποιεί αυτή την προσέγγιση (Pham, Bestaoui & Mammar, 2017). .....	32
Εικόνα 3.3.	Βήματα ΓΑ (Entezari-Maleki & Movaghar, 2011). ....	37
Εικόνα 3.4.	Παράδειγμα αρχικοποίησης πληθυσμού (Isa <i>et al.</i> , 2024). ....	38

Εικόνα 3.5. Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας που εκτελεί ο γενετικός τελεστής Επιλογή. ....	39
Εικόνα 3.6. Βασική διαδικασία επιλογής στον ΓΑ (Isa <i>et al.</i> , 2024). ....	43
Εικόνα 3.7. Επιλογή Τροχού Ρουλέτας. ....	43
Εικόνα 3.8. Επιλογή Κατάταξης. ....	43
Εικόνα 3.9. Διαδικασία Επιλογής τουρνουά. ....	44
Εικόνα 3.10. Διαδικασία Επιλογής Boltzmann. ....	44
Εικόνα 3.11. Διαδικασία Στοχαστικής Καθολικής Δειγματοληψίας. ....	44
Εικόνα 3.12. Ελιτισμός. ....	45
Εικόνα 3.13. Διασταύρωση Ενός Σημείου. ....	46
Εικόνα 3.14. Διασταύρωση Δύο Σημείων. ....	47
Εικόνα 3.15. Ομοιόμορφη Διασταύρωση. ....	47
Εικόνα 3.16. Αριθμητική Διασταύρωση. ....	47
Εικόνα 3.17. Μερικώς Χαρτογραφημένη Διασταύρωση ....	47
Εικόνα 3.18. Μετάλλαξη με Μετατόπιση ....	49
Εικόνα 3.19. Μετάλλαξη Απλής Ανάστροφης. ....	49
Εικόνα 3.20. Μετάλλαξη Scramble ....	49
Εικόνα 3.21. Μετάλλαξη Swap ....	49

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Εικόνα 4.1. Βασική διάταξη σε έναν ΓΑ (Isa <i>et al.</i> , 2024) ....	54
Εικόνα 4.2. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου επίλυσης ΠΠΠ με τη χρήση ΓΑ ....	56
Εικόνα 4.3. Προδιαγραφές του ΜηΕΑ που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη δι- πλωματική ( <a href="https://ag.dji.com">https://ag.dji.com</a> ).....	60
Εικόνα 4.4. Αεροφωτογραφίες των υπό επεξεργασία αγροτεμαχίων σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά).....	60

Εικόνα 4.5.	DJI Phantom P4, με ΚΠΜ CMOS αισθητήρα ( <a href="https://ag.dji.com">https://ag.dji.com</a> ) .....	61
Εικόνα 4.6.	Χάρτης ΔΚΔΒ Index για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβα- κιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά).....	61
Εικόνα 4.7.	Χάρτης ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά) .....	61
Εικόνα 4.8.	Βάρη αχμών σε ένα από τα υπό εξέταση αγροτεμάχια .....	62
Εικόνα 4.9.	Αποτελέσματα κώδικα για ΓΟ και συντομότερη διαδρομή για τα 3 υπό εξέ- ταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.....	65
Εικόνα 4.10.	Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για τον ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτε- μάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση .....	65
Εικόνα 4.11.	Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για τα σημεία ενδιαφέροντος για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.....	65
Εικόνα 4.12.	Αποτελέσματα βελτιστοποιημένης διαδρομής για τα 3 υπό εξέταση αγροτε- μάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση .....	66
Εικόνα 4.13.	Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης με αποστάσεις για τον ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.....	66
Εικόνα 4.14.	Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για τα σημεία ενδιαφέροντος του ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση τον ΔΚΔΒ .....	67
Εικόνα 4.15.	Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για όλα τα σημεία του ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση τον ΔΚΔΒ .....	67

- Εικόνα 4.16. Αποτελέσματα κώδικα για ΓΟ και συντομότερη διαδρομή για τα 3 υπό εξέ-  
ταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από  
αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.....68
- Εικόνα 4.17. Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για τον ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτε-  
μάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς  
τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση .....68
- Εικόνα 4.18. Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για τα σημεία ενδιαφέροντος για τα 3 υπό  
εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από  
αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.....68
- Εικόνα 4.19. Αποτελέσματα βελτιστοποιημένης διαδρομής για τα 3 υπό εξέταση αγροτε-  
μάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς  
τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση .....69
- Εικόνα 4.20. Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης με αποστάσεις για τον ΓΟ για τα 3 υπό  
εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από  
αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.....69
- Εικόνα 4.21. Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για τα σημεία ενδιαφέροντος του ΓΟ για  
τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού  
κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση τον ΔΚΔΒ.....70
- Εικόνα 4.22. Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για όλα τα σημεία του ΓΟ για τα 3 υπό  
εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από  
αριστερά προς τα δεξιά), με βάση τον ΔΚΔΒ .....70
- Εικόνα 4.23. Αποτελέσματα κώδικα για ΓΟ και συντομότερη διαδρομή για τα 3 υπό εξέ-  
ταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από  
αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.....71
- Εικόνα 4.24. Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για τον ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτε-  
μάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς  
τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση .....71

- Εικόνα 4.25. Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για τα σημεία ενδιαφέροντος για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.....71
- Εικόνα 4.26. Αποτελέσματα βελτιστοποιημένης διαδρομής για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση .....72
- Εικόνα 4.27. Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης με αποστάσεις για τον ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.....72
- Εικόνα 4.28. Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για τα σημεία ενδιαφέροντος του ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση τον ΔΚΔΒ.....73
- Εικόνα 4.29. Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για όλα τα σημεία του ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση τον ΔΚΔΒ .....73
- Εικόνα 4.30. Τεχνικές σχεδιασμού διαδρομής που έχουν χρησιμοποιηθεί έως σήμερα (με παραλλαγές) για τον σχεδιασμό διαδρομών μέσω ΜηΕΑ (Basiri *et al.*, 2022) 75

## Κατάλογος Πινάκων

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πίνακας 3.1. Τελεστές που χρησιμοποιούνται σε έναν ΓΑ (Isa <i>et al.</i> , 2024).....	40
Πίνακας 3.2. Τύποι και παραδείγματα σχημάτων Κωδικοποίησης (Isa <i>et al.</i> , 2024) .....	41
Πίνακας 3.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σχημάτων κωδικοποίησης ενός ΓΑ (Isa <i>et al.</i> , 2024). .....	42
Πίνακας 3.4. Τύπος και παράδειγμα της επιλογής (Isa <i>et al.</i> , 2024) .....	43
Πίνακας 3.5. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κυριότερων τεχνικών επιλογής σε έναν ΓΑ (Isa <i>et al.</i> , 2024) .....	45
Πίνακας 3.6. Τύπος και παράδειγμα διασταύρωσης (Isa <i>et al.</i> , 2024).....	46
Πίνακας 3.7. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαφόρων τεχνικών διασταύρωσης (Isa <i>et</i> <i>al.</i> , 2024).....	48
Πίνακας 3.8. Τύπος και παράδειγμα μετάλλαξης (Isa <i>et al.</i> , 2024) .....	49
Πίνακας 3.9. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαφόρων τεχνικών μετάλλαξης (Isa <i>et</i> <i>al.</i> , 2024).....	50

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Πίνακας 4.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των 3 σεναρίων.....	74
Πίνακας 4.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυριότερων τεχνικών που έχουν χρησιμοποιηθεί στον τομέα της Γεωργίας Ακριβείας .....	76



## Κατάλογος Συντμήσεων

ΓΑΚΡ	Γεωργία Ακριβείας
ΔΚΔΒ	Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης
ΓΟ	Γράφος Ορατότητας
ΓΑ	Γενετικός Αλγόριθμος
ΜηΕΑ	Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος
ΣΤ	Σχεδιασμός Τροχιάς
ΠΚ	Πρόβλημα Κάλυψης
ΣΚΔ	Σχεδιασμός Κάλυψης Διαδρομής
ΜηΕΟΕ	Μη Επανδρωμένο Όχημα Εδάφους
ΔΒ	Διάγραμμα Βορονόϊ
ΔΒΑ	Δείκτης Βλάστησης Αναλογίας
ΔΚΒ	Δείκτης Κάθετης Βλάστησης
ΔΠΒΕ	Δείκτης Προσαρμοσμένης Βλάστησης στο Έδαφος
ΔΠΒΜΕ	Δείκτης Προσαρμοσμένης Βλάστησης Μετασχηματισμένου Εδάφους
Υ	Υπέρυθρο
ΕΥ	Εγγύς Υπέρυθρο
Κ	Κόκκινο
ΚΥ	Κοντινό Υπέρυθρο
ΑΓΟ	Ανάλυση Γράφου Ορατότητας
ΣΓΠ	Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών
ΔΦΕ	Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας

ΚΠΜ	Κόκκινο Πράσινο Μπλε
ΕΓΠ	Επιστήμης Γεωγραφικών Πληροφοριών
ΠΠΠ	Πρόβλημα Πλανόδιου Πωλητή
ΑΥΟ	Αυτόνομο Υποβρύχιο Όχημα
ΤΝ	Τεχνητή Νοημοσύνη
ΠΣΟΧ	Πιθανοτικός Σχεδιαστής Οδικού Χάρτη
ΓΕΤΔ	Γρήγορη Εξερεύνηση Τυχαίου Δέντρου
ΒΣΣ	Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων
ΒΑΜ	Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών
ΤΝΔ	Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο
ΔΣ	Διασταύρωση Σειράς
ΜΧΔ	Μερικώς Χαρτογραφημένη Διασταύρωση

## Περίληψη

Η Γεωργία Ακριβείας (ΓΑΚΡ) αποτελεί μία σύγχρονη σχετικά προσέγγιση στον ψεκασμό φυτοφαρμάκων, διαδραματίζοντας κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της υγείας των καλλιεργειών και κατ' επένταση στις αποδόσεις τους. Σήμερα τα Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (ΜηΕΑ) χρησιμοποιούνται εκτενώς για τον σκοπό αυτό, οδηγώντας σε συνετή χρήση φυτοφαρμάκων, εξισορροπώντας ταυτόχρονα το κόστος καθώς και τη διατήρηση του περιβάλλοντος. Με βάση τα παραπάνω προέκυψε η ανάγκη για την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος υπολογισμού της βέλτιστης τροχιάς ΜηΕΑ με χρήση στη ΓΑΚΡ χρησιμοποιώντας εργαλεία από τη θεωρία γράφων. Για το σκοπό αυτό, αφού αρχικά έγινε εκτενής ανάλυση σε θεωρητικό επίπεδο των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν (Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης-ΔΚΔΒ, Γράφος Ορατότητας-ΓΟ, Αλγόριθμος Ντάικστρα, Αλγόριθμος Floyd-Warshall, Γενετικός Αλγόριθμος-ΓΑ) καθώς και του τρόπου με τον οποίο συνδέονται μεταξύ τους, στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η δημιουργία κωδίκων με τον συνδυασμό των παραπάνω εργαλείων. Ειδικότερα, δημιουργήθηκαν 3 σενάρια με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής για 3 διαφορετικά αγροτεμάχια (σιτάρι, βαμβάκι, κτηνοτροφικό κουκί) όπου το κάθε σενάριο αξιολογούνταν σύμφωνα με την Ευκλείδεια Απόσταση, τον ΔΚΔΒ ή συνδυασμό των 2 αυτών μετρικών. Από τα παραπάνω προέκυψε το συμπέρασμα ότι ο συνδυασμός και των 2 μετρικών για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής δίνει καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με αυτά από κάθε μετρική ξεχωριστά. Ωστόσο, παρά τα θετικά αποτελέσματα, αξίζει περισσότερης διερεύνησης καθώς δεν υπάρχει βιβλιογραφία που να αποδεικνύει άμεσα την αποτελεσματικότητα αυτών των 2 μετρικών.

**Λέξεις Κλειδιά:** ΓΑΚΡ, ΜηΕΑ, βέλτιστη τροχιά, ΔΚΔΒ, ΓΟ, Ντάικστρα, Floyd-Warshall, ΓΑ.



## Abstract

Precision Agriculture (PA) is a relatively modern approach to pesticide spraying, playing a crucial role in ensuring the health of crops and by extension their yields. Today, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are used extensively for this purpose, leading to prudent use of pesticides, while balancing costs and environmental conservation. Based on the above, the need arose to create an integrated optimal trajectory system for use in PA with tools from graph theory. For this purpose, after initially conducting an extensive theoretical analysis of the tools used (Normalized Difference Vegetation Index-NDVI, Visibility graph-VG, Dijkstra Algorithm, Floyd-Warshall Algorithm, Genetic Algorithm-GA) as well as the way in which they are connected to each other, codes were then created with the combination of the above tools. Specifically, 3 scenarios were created to find the optimal route for 3 different agricultural plots (wheat, cotton, faba bean) where each scenario was evaluated according to the Euclidean Distance, the NDVI or a combination of these 2 metrics. From the above, the conclusion emerged that the combination of both metrics for finding the optimal route gives better results compared to those from each metric separately. However, despite the positive results, it deserves more investigation as there is no literature that directly proves the effectiveness of these 2 metrics.

**Key-words:** PA, UAVs, optimal trajectory, NDVI, VG, Dijkstra, Floyd-Warshall, GA.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

Στον τομέα της Γεωργίας Ακριβείας (ΓΑΚΡ) σήμερα, η βέλτιστη διαχείριση των καλλιεργειών επι-  
τυγχάνεται μέσω προηγμένων τεχνολογικών εργαλείων. Στο κεφάλαιο 1, θα γίνει μία συνοπτική παρουσίαση  
της έννοιας της Γεωργίας Ακριβείας καθώς επίσης και των προβλημάτων Σχεδιασμού Τροχιάς (ΣΤ) και  
Κάλυψης (ΠΚ), αλλά και των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διατριβή.

### 1.1. Γεωργία Ακριβείας (ΓΑΚΡ)

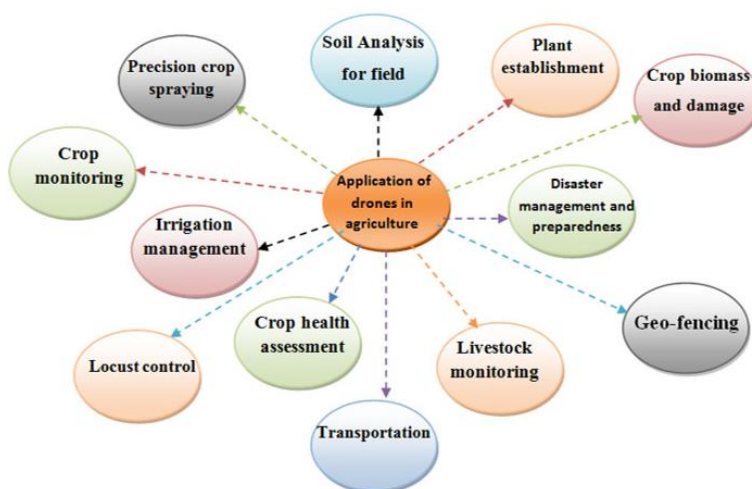
Η έννοια της Γεωργίας Ακριβείας (ΓΑΚΡ) ως στρατηγική διαχείρισης της γεωργίας, έχει λάβει με-  
γάλη προσοχή τα τελευταία χρόνια με όλο και περισσότερους παραγωγούς να έχουν αναγνωρίσει την απο-  
δοτικότητα της καλλιέργειά τους με την χρήση της (Barrientos *et al.*, 2011, Davoodi, Mohammadpour &  
Li, 2018, Mukhamediev *et al.*, 2023).

Ειδικότερα, αποτελεί μία στρατηγική αποσκοπώντας σε ένα πιο ακριβή σχεδιασμό αγροτεχνικών  
μέτρων με βάση τη συλλογή, επεξεργασία καθώς και την καλύτερη διαχείριση των γεωργικών δεδομένων  
(π.χ. στοχευμένη εφαρμογή λιπασμάτων και ζιζανιοκτόνων σε περιοχές όπου χρήζουν επέμβασης) στοχεύο-  
ντας στη βελτίωση της σύστασης του εδάφους και κατ' επέκταση του τοπίου, προκειμένου να εκτιμηθεί, να  
προβλεφθεί και να διαχειριστεί η υγεία των καλλιεργειών σε ένα αγροτεμάχιο (Cortes *et al.*, 2004, Tokekar *et al.*,  
2016, Davoodi, Mohammadpour & Li, 2018, Mukhamediev *et al.*, 2023). Αναλυτικότερα, βασίζεται  
στη συλλογή ενημερωμένων δεδομένων για την κατάσταση του εδάφους, των φυτών και του καιρού που  
λαμβάνονται από τους αισθητήρες οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στα αγροτεμάχια, καθώς και στις εικόνες  
διαφόρων χωρικών αναλύσεων που λαμβάνονται από δορυφόρους ή εναέριες πλατφόρμες (επανδρωμένες ή  
μη), οι οποίες στη συνέχεια υποβάλλονται σε επεξεργασία για την εξαγωγή των πληροφοριών και κατά συνέ-  
πεια τη λήψη αποφάσεων (Shafi *et al.*, 2019, Mukhamediev *et al.*, 2023).

Έτσι, με βάση τα προαναφερθέντα, η ΓΑΚΡ μπορεί να βελτιώσει την παραγωγικότητα των καλλιερ-  
γειών (απόδοση) (από 30-60%) και κατά συνέπεια το γεωργικό κέρδος (λόγω μείωσης του κόστους παραγω-  
γής) το οποίο οδηγεί σε υψηλότερη περιβαλλοντική ποιότητα (Tokekar *et al.*, 2016, Davoodi, Moham-  
madpour & Li, 2018, Shafi *et al.*, 2019, Mukhamediev *et al.*, 2021, Mukhamediev *et al.*, 2023). Επιπλέον,

βοηθά τους παραγωγούς να λαμβάνουν τις κατάλληλες αποφάσεις, καθώς και να αυτοματοποιούν ορισμένες βασικές γεωργικές εργασίες, επιτρέποντας παράλληλα επιτρέπει την αύξηση της αποδοτικότητας της εργασίας (Barrientos *et al.*, 2011, Tokekar *et al.*, 2016, Davoodi, Mohammadpour & Li, 2018).

Επιπρόσθετα, τα μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (ΜηΕΑ) χρησιμοποιούνται επίσης και σε πολλές ακόμη εφαρμογές της, όπως στην παρακολούθηση της ανάπτυξης της βλάστησης και στην εκτίμηση της απόδοσης, στη διαχείριση της άρδευσης των καλλιεργειών κ.α. (Εικ. 1.1) (Tsouros, Bibi, S. & Sarigiannidis, 2019, Boursianis *et al.*, 2022, Mukhamediev *et al.*, 2023).

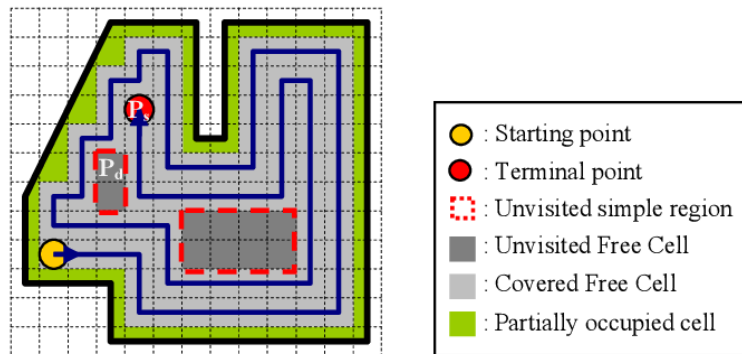


Εικόνα 1.1. Χρήσεις των ΜηΕΑ στον αγροτικό τομέα (Katekar & Cheruku, 2022).

## 1.2. Πρόβλημα Σχεδιασμού Τροχιάς (ΣΤ) και Πρόβλημα Κάλυψης (ΠΚ)

Το πρόβλημα Σχεδιασμού Κάλυψης Διαδρομής (ΣΚΔ) έγκειται στον υπολογισμό μίας διαδρομής που διέρχεται από όλα τα σημεία ενδιαφέροντος ενός χώρου εργασίας ξεκινώντας από ένα αρχικό και καταλήγοντας σε ένα τελικό σημείο (Εικ. 1.2). Αυτό το πρόβλημα έχει ως επί το πλείστον αντιμετωπιστεί σε Μη Επανδρωμένα Οχήματα Εδάφους (ΜηΕΟΕ) που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό, τη γεωργία, την αποναρκοθέτηση κ.λπ. (Valente *et al.*, 2013). Προσδιορίζει ουσιαστικά την τροχιά που θα πρέπει να ακολουθήσει ένα ρομπότ για να περάσει κάθε σημείο ενός περιβάλλοντος, αποφεύγοντας ταυτόχρονα τα εμπόδια, ολοκληρώνοντας έτσι προκαθορισμένες εργασίες (Pham, Ichalal & Mammam, 2020).





Εικόνα 1.2. Απλό πρόβλημα σχεδιασμού κάλυψης μίας περιοχής (Choi, 2009).

Το ΣΚΔ, αν και αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για τον σχεδιασμό κίνησης ενός ΜηΕΟΕ, τα τελευταία χρόνια έχει μελετηθεί εκτενώς για χρήση του σε διάφορες εφαρμογές όπως σε χλοοκοπτικά, κ.λπ. (Bosse, Nourani-Vatani & Roberts, 2007, Paull, Saeedi & Li, 2012, Pham, Ichalal & Mammar, 2020). Ωστόσο το πρόβλημα ΣΚΔ αποτελεί τη βάση και για πολλές εφαρμογές σε ΜηΕΑ, όπως η αναζήτηση στόχων, η περιμετρική επιτήρηση και ο σχεδιασμός διαδρομής αν και υπόκειται σε αυστηρότερους περιορισμούς (Doherty, 2004, Acevedo *et al.*, 2013, Valente *et al.*, 2013, Duan & Li, 2014, Chen, Zhang & Xu, 2014).

Αριετές εργασίες έχουν παρουσιάσει κατά καιρούς την μεθοδολογία τους σχετικά με την επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού βέλτιστης τροχιάς ενός ΜηΕΑ στον τομέα της γεωργίας γενικότερα, με τη χρήση διαφόρων τεχνικών. Ειδικότερα, οι Linker & Blass (2008) χρησιμοποίησαν τη μέθοδο A\* για πλοήγηση σε οπωρώνα. Συγκεκριμένα έλαβαν υπόψη τα όρια, τα οποία είναι μοναδικά για το όχημα και το περιβάλλον (περιορισμένη γωνία διεύθυνσης, περιορισμένο εύρος βαθμών βήματος και κύλισης, προτίμηση για κίνηση προς τα εμπρός και απροθυμία για συχνές στροφές). Αν και οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι η διαδρομή που έχουν επινοήσει είναι η καλύτερη, ορισμένοι από τους περιορισμούς μπορεί να οδηγήσουν σε μία λιγότερο ιδανική διαδρομή (Linker & Blass, 2008). Επιπλέον οι Nolan Paley & Kroeger (2017) χρησιμοποίησαν ένα Διάγραμμα Βορονόϊ (ΔΒ) (Voronoi diagram) σε διδιάστατους (2D) χώρους για εύρεση μονοπατιών σε κάλυψη γεωργικής έκτασης. Ωστόσο οι συγγραφείς δεν προσπάθησαν να βρουν τον συντομότερο δρόμο (Nolan, Paley & Kroeger, 2017). Ακολουθώντας, ο Sinha (2017) σχεδίασε έναν αλγόριθμο σχεδιασμού διαδρομής για ένα αυτόνομο ΜηΕΑ πολλαπλών ροτόρων με σκοπό την περιήγηση και κάλυψη πολλαπλών γεωργικών περιοχών στο συντομότερο δυνατό χρόνο με βάση τον αλγόριθμο του Ντάικστρα σε 2D περιβάλλοντα (Sinha, 2017).

Επομένως, η βέλτιστη τοποθέτηση των τροχιών καθοδήγησης παίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση του συνολικού κόστους επεξεργασίας ενός αγροτεμαχίου. Γενικά, το να ληφθούν υπόψη διάφορα κριτήρια βελτιστοποίησης κατά τη δημιουργία τμημάτων καθοδήγησης μπορεί να οδηγήσει σε πολύ διαφορετικά τελικά αποτελέσματα σε σύγκριση με τη χρήση κατευθυντήριων γραμμών ή ευρετικών μόνο (Höffmann, Patel & Büskens, 2023).

### 1.3. Σκοπός

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η δημιουργία και παρουσίαση ολοκληρωμένου συστήματος βέλτιστης τροχιάς ενός ΜηΕΑ σε 3 αγροτεμάχια μέσω της χρήσης ΓΑ, σε συνδυασμό με Floyd-Warshall και Ντάικστρα, για τη διασφάλιση του αποτελεσματικού ψεκασμού διαφορετικών ειδών καλλιεργειών σε περιοχές ενδιαφέροντος. Ειδικότερα, γίνεται μία εκτενής παρουσίαση του τρόπου λειτουργίας των ΔΚΔΒ και ΓΟ, τα οποία, σε συνδυασμό με τους Ντάικστρα, Floyd-Warshall και ΓΑ συμμετέχουν στην επίλυση του ΠΠΠ, θέτοντας το πρόβλημα βελτιστοποίησης μέσω της δημιουργίας 3 σεναρίων (με βάση μόνο την Ευκλείδεια απόσταση, με βάση μόνο το ΔΚΔΒ και συνδυασμός τους).

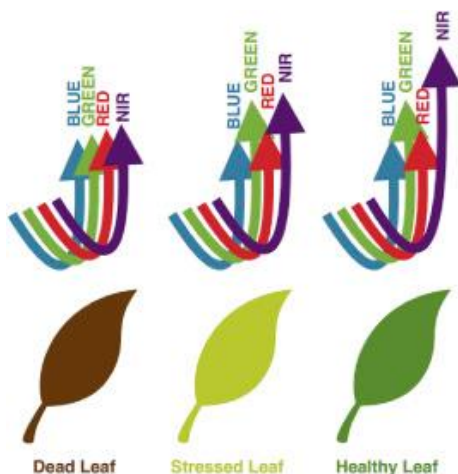
### 1.4. Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν

Η βλάστηση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους βιοφυσικούς δείκτες που χρησιμοποιούνται για την μελέτη της διάβρωσης του εδάφους, ο οποίος μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της χρήσης δεικτών βλάστησης οι οποίοι προέρχονται από δορυφορικές εικόνες (Chouhan & Rao, 2011, Bhandari, Kumar & Singh, 2012).

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί δείκτες βλάστησης, όπως ο Δείκτης Βλάστησης Αναλογίας (ΔΒΑ), ο Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης (ΔΚΔΒ), ο Δείκτης Κάθετης Βλάστησης (ΔΚΒ), ο Δείκτης Προσαρμοσμένης Βλάστησης στο Έδαφος (ΔΠΒΕ), ο Δείκτης Προσαρμοσμένης Βλάστησης Μετασχηματισμένου Εδάφους (ΔΠΒΜΕ) κ.α. (Jensen 1996, Lyon *et al.* 1997), με τους Perry & Lautenschlager (1984) να αποδεικνύουν την ομοιότητα στις πληροφορίες στους περισσότερους από αυτούς τους δείκτες (Fung & Siu, 2000).

Ωστόσο, ο πιο κοινός και ευρέως χρησιμοποιούμενος φασματικός δείκτης που χρησιμοποιείται, εκτός των άλλων, και για την αξιολόγηση της βλάστησης στη γεωργία αναμφισβήτητα είναι ο ΔΚΔΒ (Moscovini *et al.*, 2024), όχι μόνο λόγω του τρόπου με τον οποίο μπορεί να υπολογιστεί με έναν οποιονδήποτε πολυφασματικό αισθητήρα με ορατή και σχεδόν Φασματοσκοπία Υπερύθρου (ΦΥ) ζώνη (Εικ. 1.3) (Huang

*et al.*, 2021) αλλά και λόγω του ότι αποτελεί ένα από τα παλαιότερα αναλυτικά προϊόντα τηλεπισκόπησης εξαιτίας της απλούστευσης της πολυπλοκότητας των πολυφασματικών εικόνων (Jiang *et al.*, 2006).



**Εικόνα 1.3.** Απεικόνιση υγιούς και μη βλάστησης με βάση τη διαφορά ανακλαστικότητας των RED και NIR (Evangelides & Nobajas, 2020).

Ειδικότερα ο δείκτης αυτός περιγράφει και ποσοτικοποιεί το επίπεδο ευρωστίας της υπό εξέταση βλάστησης (Moscovini *et al.*, 2024), κεφαλαιοποιώντας τις οπτικές ιδιότητες της κυτταρικής δομής των φύλλων. Οι φωτοσυνθετικές χρωστικές (χλωροφύλλη, σχετικές χρωστικές ουσίες συλλογής φωτός και βοηθητικές χρωστικές) απορροφούν αποτελεσματικά την ακτινοβολία στο ορατό εύρος του φάσματος (για την τροφοδοσία της φωτοσύνθεσης) και αντανακλούν την ακτινοβολία στην περιοχή του Εγγύς Υπερύθρου (ΕΥ) (Robinson *et al.*, 2017). Υπολογίζεται ως ο λόγος των ορατών ζωνών φασματικών κυμάτων προς τις εγγύς υπέρυθρες ζώνες φασματικών κυμάτων, με την υγιή πράσινη βλάστηση να παρουσιάζει υψηλή παρουσία χλωροφύλλης, η οποία προκαλεί χαμηλή ανάκλαση στις ορατές ζώνες κυμάτων και υψηλή ανάκλαση σε ζώνες κυμάτων κοντά στο υπέρυθρο, ενώ με την βλάστηση υπό πίεση να ισχύει το αντίστροφο (Hu *et al.*, 2008, Turvey & McLaurin, 2012, Bhandari, Kumar & Singh, 2012). Λόγω αυτών, ο ΔΚΔΒ έχει μεγάλη σημασία στη ΓΑ.

Ο συσχετισμός στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή της θεωρίας γράφων και του ΔΚΔΒ επιτρέπει την αποτελεσματική ανάλυση και κατανόηση της χωρικής και χρονικής κατανομής της βλάστησης, παρέχοντας ισχυρά εργαλεία για την περιβαλλοντική παρακολούθηση και διαχείριση.

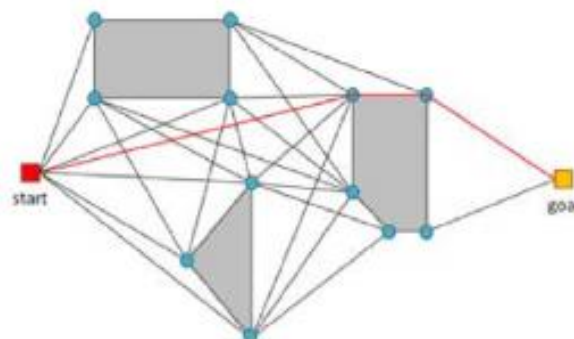
Αν και η εφαρμογή της Ανάλυσης Γράφων Ορατότητας (ΑΓΟ) σε κτιριακά περιβάλλοντα εισήχθη για πρώτη φορά από τους Braaksma και Cook (1980), ωστόσο ανακαλύφθηκε ξανά πρόσφατα από τους Turner *et al.* (1999, 2001), εξετάζοντας αυτή τη φορά τις πρόσφατες εξελίξεις στη Σύνταξη του Διαστήματος διαφόρων ισοβιστικών (isonists) προσεγγίσεων (ορατοί χώροι από ένα συγκεκριμένο σημείο μέσα σε ένα

περιβάλλον), το οποίο αποτελεί ένα θεωρητικό και μεθοδολογικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε κατά τη δεκαετία του 1980 από τους Bill Hillier και Julianne Hanson, αποσκοπώντας στην ανάλυση της χωρικής διάταξης καθώς και των χωρικών σχέσεων σε δομημένα περιβάλλοντα (π.χ. πόλεις, κτήρια, δρόμοι) ώστε να κατανοηθεί πώς αυτές οι σχέσεις επηρεάζουν τόσο ανθρώπινες συμπεριφορές και κινήσεις όσο και κοινωνικές αλληλεπιδράσεις (Benedikt, 1979, Braaksma & Cook, 1980, Hillier & Hanson, 1989, Turner & Penn, 1999, Turner *et al.*, 2001). Ειδικότερα, αναδιατύπωσαν τον παρακείμενο πίνακα ως ένα ΓΟ τοποθεσιών, όπου η μία ακμή γράφου συνδέει κορυφές που αντιπροσωπεύουν αμοιβαία ορατές θέσεις (Turner, 2001, O'Sullivan & Turner, 2001).

Ο ΓΟ χρησιμοποιείται συχνά για να βελτιώσει τις διαδρομές που εμφανίζουν πολλά περιττά σημεία διαδρομής (Niu *et al.*, 2018, Lee, Choi & Kim, 2021) ενώ παρουσιάζουν πολλές εφαρμογές. Για παράδειγμα, έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές φορές ως προσέγγιση για προβλήματα συντομότερης διαδρομής στο επίπεδο (Lozano-Perez και Wesley, 1979, Overmars & Welzl, 1988).

Εν συνεχεία, η μεθοδολογία του ΓΟ αναπτύχθηκε περαιτέρω ως τυπική λειτουργία ρουτίνας σε πολλές πλατφόρμες ΣΓΠ, η οποία ονομάζεται ανάλυση οπτικού πεδίου (Burrough, 1986) με ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα, πλέγματα κυψελών ή τριγωνικά ακανόνιστα δίκτυα που αντιπροσωπεύουν το γεωγραφικό τοπίο, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στη σύσταση τοποθεσίας για εγκαταστάσεις (Goodchild and Lee, 1989, Senaratne *et al.*, 2013), επιλογή διαδρομής (π.χ. Stucky, 1998, Leusen, 1999), χαρτογράφηση της έκθεσης σε βλαβερές δραστηριότητες κ.λπ. (Falconer *et al.*, 2013, Pearson *et al.*, 2014, Shen & Wu, 2022).

Ο χαρακτήρας ενός ΓΟ εξαρτάται επίσης από πολύπλοκες μετρικές και γεωμετρικές ιδιότητες του περιβάλλοντος για το οποίο προέρχεται και αυτό είναι που το καθιστά ένα ενδιαφέρον αντικείμενο έρευνας. Ένας γενικός ΓΟ συνδέει οποιοδήποτε σύνολο σημείων και μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διάφορες τεχνικές ανάλυσης για να κατασκευάσουμε σημειακά μέτρα για αυτές τις θέσεις (Εικ. 1.4) (O'Sullivan & Turner, 2001).



**Εικόνα 1.4.** Γράφος ορατότητας με εμφάνιση του βέλτιστου μονοπατιού από ένα αρχικό σε ένα τελικό σημείο (Kurazume *et al.*, 2017).

Τέλος, ο ΓΑ ανήκει στις τεχνικές που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη και ειδικότερα στην οικογένεια των εξελικτικών αλγορίθμων (Ntakolia *et al.*, 2022). Αποτελεί ένα δημοφιλές εργαλείο βελτιστοποίησης το οποίο στηρίζεται στην αναζήτηση που ακολουθεί την αρχή της Γενετικής και της φυσικής επιλογής που ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά από τον Bremermann το 1958. Σήμερα, έχει ευρεία εφαρμογή σε όλους τους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας, συμπεριλαμβανομένης της πλοήγησης ρομπότ (Patle, 2019, Santos, 2021). Ειδικότερα, χρησιμοποιείται για τη δημιουργία λύσεων σε προβλήματα αναζήτησης που βασίζονται σε λειτουργίες όπως αυτές της μετάλλαξης, διασταύρωσης και επιλογής. Επιπλέον βρίσκει εφαρμογή στα ΜηΕΑ και συγκεκριμένα στην ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης της περιήγησης η οποία περιλαμβάνει την κάλυψη εδάφους, την βελτιστοποίηση της τροχιάς εργασίας καθώς και την βελτίωση της απόδοσης αυτών μειώνοντας παράλληλα την κατανάλωση καυσίμου τους (Aggarwal & Kumar, 2020, Ntakolia *et al.*, 2022).

Έτσι, με βάση όλα τα παραπάνω, γίνεται εμφανές ότι η συνδυασμένη χρήση των ΔΚΔΒ, ΓΟ, Ντάικστρα, Floyd-Warshall και ΓΑ στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία ιδανική λύση για την εύρεση της βέλτιστης τροχιάς στη ΓΑΚΡ. Ειδικότερα, ο ΔΚΔΒ παρέχει ακριβή και αξιόπιστα δεδομένα σχετικά με την υγεία και την κατανομή της βλάστησης, επιτρέποντας τον εντοπισμό των περιοχών που απαιτούν περισσότερη προσοχή, τα ΓΟ επιτρέπουν τη χαρτογράφηση του τοπίου με ακρίβεια, αναδεικνύοντας τις χωρικές σχέσεις και τις αμοιβαίες ορατότητες των θέσεων, βελτιστοποιώντας έτσι τη διαδρομή για αποφυγή εμποδίων και περιττών σημείων ενώ τέλος οι ΓΑ, μέσω της εξελικτικής αναζήτησης, μπορούν να βελτιστοποιήσουν τις διαδρομές εργασίας, λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλούς παράγοντες όπως η απόδοση, η κατανάλωση καυσίμου και ο χρόνος ολοκλήρωσης, εξασφαλίζοντας έτσι μια αποδοτική και βιώσιμη προσέγγιση στην αγροτική διαχείριση.

### 1.5. Διάρθρωση κεφαλαίων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία στην Ενότητα 2 περιγράφεται αναλυτικά την αναπαράσταση δεδομένων για το ΔΚΔΒ και ο ΓΟ καθώς και τη συσχέτισή τους, ενώ στην Ενότητα 3 τίθεται το πρόβλημα εύρεσης του βέλτιστου μονοπατιού για την επίλυση του Προβλήματος του Πλανόδιου Πωλητή (ΠΠΠ), με την ανάλυση των αλγορίθμων Ντάικστρα, Floyd-Warshall και ΓΑ που θα χρησιμοποιηθούν. Ακολούθως, στην Ενότητα 4 παρουσιάζεται το προς επίλυση σενάριο της παρούσας διπλωματικής εργασίας σε συνδυασμό με την υλοποίηση και τα αποτελέσματα που προκύπτουν καθώς και την συζήτηση ενώ στις Ενότητες 5,

6 και 7 παρουσιάζεται ο επίλογος, μία σύνοψη των ανωτέρω κεφαλαίων σε συνδυασμό με προτάσεις για μελλοντική έρευνα και η βιβλιογραφία αντίστοιχα.

### **1.6. Σύνοψη κεφαλαίου**

Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε μία συνοπτική αναφορά όλων των εργαλείων που συντέλεσαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Παρουσιάστηκε ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, ερμηνεύτηκαν οι λέξεις κλειδιά και δόθηκαν τα εργαλεία και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, περιγράφεται με λεπτομέρεια το κάθε εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε καθώς και η συσχέτιση όλων μεταξύ τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Αναπαράσταση Δεδομένων και Ενσωμάτωση του Δείκτη Βλάστησης

Ο συνδυασμός των εργαλείων ΔΚΔΒ και ΓΟ στον τομέα της ΓΑΚΡ επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση των καλλιεργειών ενώ ταυτόχρονα βελτιστοποιεί τη γεωργική δραστηριότητα. Παρακάτω θα γίνει μία διεξοδική αναφορά στον δείκτη ΔΚΔΒ και στον ΓΟ με ταυτόχρονη ανάλυση του κώδικά τους. Εν συνεχεία θα παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η αναπαράσταση των χαρτών καθώς και η συσχέτιση μεταξύ ενός Γράφου με τον ΔΚΔΒ καθώς και ο λόγος για τον οποίο γίνεται η αναπαράσταση δομών/αντικειμένων μέσα στο χώρο.

#### 2.1. Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης (ΔΚΔΒ)

##### 2.1.1. Γενικά-Ορισμός

Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχουν πολλοί και διαφορετικοί δείκτες βλάστησης οι οποίοι αποτελούν δεδομένα τα οποία προέρχονται από πολυφασματικά δεδομένα με βάση τις διαφορές στην απορρόφηση, τη διαπερατότητα καθώς και την ανάδραση της ενέργειας από τη βλάστηση στις κόκκινες και εγγύς υπέρυθρες ζώνες. Επιτρέπουν επίσης την οριοθέτηση της κατανομής τόσο της βλάστησης όσο και του εδάφους με βάση τα χαρακτηριστικά μοτίβα ανάκλασης της πράσινης βλάστησης, προσπαθώντας παράλληλα να υπολογίσουν τη βιομάζα της βλάστησης αυτής αποκαλύπτοντας συγχρόνως τις φυσιολογικές συνθήκες καθώς και τα πρότυπα κατανομής της πράσινης βλάστησης (Fung & Siu, 2000, Bhandari, Kumar & Singh, 2012).

Από όλους τους δείκτες βλάστησης ο πιο κοινός και ευρέως χρησιμοποιούμενος είναι αυτός του ΔΚΔΒ καθώς, εκτός των προαναφερθέντων, κεφαλαιοποιεί τις οπτικές ιδιότητες της κυτταρικής δομής των φύλλων. Ειδικότερα, οι φωτοσυνθετικές χρωστικές (π.χ. χλωροφύλλη, κ.λπ.) απορροφούν αποτελεσματικά την ακτινοβολία στο ορατό εύρος του φάσματος (για την τροφοδοσία της φωτοσύνθεσης) και αντανακλούν την ακτινοβολία στην περιοχή του Εγγύς Υπερύθρου (ΕΥΟ (Robinson *et al.*, 2017).

Ήδη από τις αρχές του 1970 αναγνωρίστηκε γρήγορα από όλους στην επιστημονική κοινότητα λόγω της απήχυσής του, με τα εργαλεία τηλεπισκόπησης από δορυφόρους παρατήρησης της Γης να είναι εξο-



πλισμένα για να παράγουν αυτόν τον δείκτη σε διαφορετικές χωρικές και χρονικές αναλύσεις (Huang *et al.*, 2021).

### 2.1.2. Μαθηματική έκφραση

Μαθηματικά, ο ΔΚΔΒ εκφράζεται ως εξής (Εξ. 1) (Manganiello *et al.*, 2021, Li *et al.*, 2021, Moscovini *et al.*, 2024):

$$NDVI = \frac{NIR (800nm) - RED (670nm)}{NIR (800nm) + RED (670nm)}, \text{ όπου } 0 < NDVI < 1 \quad (1)$$

όπου NDVI είναι ο ΔΚΔΒ και τα Red και NIR αντιπροσωπεύουν επιφανειακές ανακλάσεις που υπολογίζονται κατά μέσο όρο σε περιοχές μηκών κύματος στις ορατές ( $\lambda \approx 0,6 \mu m$ , «K») και κοντά στο Υ ( $\lambda \approx 0,8 \mu m$ ) περιοχές του φάσματος, αντίστοιχα (Carlson & Ripley, 1997, Jiang *et al.*, 2006, Chandrasekar *et al.*, 2010), με την περιοχή του μήκους κύματος της ζώνης ΕΥ να είναι 750-1300 nm, η κόκκινη ζώνη στα 600-700 nm και η πράσινη ζώνη στα 550 nm (Bhandari, Kumar & Singh, 2012).

Ωστόσο, οι διαφορές στις τιμές ΔΚΔΒ μεταξύ διαφορετικών αντικειμένων οφείλονται στις σχετικές διαφορές τους στις φασματικές αποκρίσεις. Έτσι, η παραπάνω εξίσωση (Εξ. 1) μπορεί να αλλάξει ως εξής:

$$NDVI = \frac{R - 1}{R + 1} \quad (2)$$

Η εξίσωση αυτή (Εξ. 2) είναι πιο σαφής για την εξήγηση των προτύπων συμπεριφοράς του ΔΚΔΒ λόγω των διαφορετικών αποκρίσεων του ΕΥ και του Κ τόσο στην ατμόσφαιρα όσο και στο στρες (McVeagh *et al.* 2012, Huang *et al.*, 2021).

### 2.1.3. Τιμές ΔΚΔΒ

Ο ΔΚΔΒ είναι ένας δείκτης χωρίς μονάδα, με τιμές που κυμαίνονται από -1 έως 1 (Turvey & McLaurin, 2012) ανάλογα με την απορρόφηση του κόκκινου φωτός από τη χλωροφύλλη των φυτών και την ανάκλαση της υπέρυθρης ακτινοβολίας από τα γεμάτα νερό κύτταρα φύλλων (Bhandari, Kumar & Singh, 2012), με την υγιή βλάστηση να καταλαμβάνει τις υψηλότερες θετικές τιμές, η βλάστηση υπό πίεση ή με μικρή φυλλική επιφάνεια τις χαμηλότερες θετικές τιμές, ενώ το γυμνό έδαφος, το νερό, το χιόνι, ο πάγος ή τα σύννεφα έχουν τιμές 0 ή ελαφρώς αρνητικές (Turvey & McLaurin, 2012). Πιο συγκεκριμένα, η υγιής, υψηλής πυκνότητας, βλάστηση (π.χ. εύκρατα και τροπικά δάση) εμφανίζουν τιμές 0,6 έως 0,8 (υψηλή τιμή), χλοώδεις εκτάσεις που εμφανίζονται στην περιοχή (θάμνοι και λιβάδια) από 0,2-0,3 (μέτριες τιμές), επιφάνειες όπως άμμος, βράχοι και χιόνι έχουν τιμές 0,1 και κάτω (πολύ χαμηλές τιμές ΔΚΔΒ) και τέλος, το γυ-



μνό έδαφος αντιπροσωπεύεται με τιμές ΔΚΔΒ πλησίον του 0 ενώ τα υδάτινα σώματα αρνητικές τιμές (κοντά στο -1) (Weier and Herring, 2000, Kumar & Singh, 2012, Rugel *et al.*, 2017, Bhandari).

Συνήθως στην αρχή της καλλιεργητικής περιόδου οι τιμές ΔΚΔΒ της υγιούς βλάστησης αυξάνονται καθώς αυξάνεται η φυτική κάλυψη, φθάνουν στο μέγιστο κάποια στιγμή στη μέση της καλλιεργητικής περιόδου και εν συνεχεία θα μειώνονται καθώς επέρχεται το τέλος αυτής (Mkhabela *et al.* 2005, Turvey & McLaurin, 2012).

## 2.2. Δημιουργία ΔΚΔΒ

### 2.2.1. Εισαγωγή-Βιβλιογραφικές αναφορές

Όπως προαναφέρθηκε, ο ΔΚΔΒ αποτελεί αναμφισβήτητα τον πιο κοινό και ευρέως χρησιμοποιούμενο φασματικό δείκτη που χρησιμοποιείται αυτή τη στιγμή στον γεωργικό τομέα (Moscovini *et al.*, 2024).

Ειδικότερα, όπως και άλλοι δείκτες βλάστησης, δεν αποτελούν μόνο πολύτιμα βοηθήματα στην πρόβλεψη της απόδοσης, αλλά και σημαντικά εργαλεία για την ανίχνευση μίας συγκεκριμένης μεταβολής της βλάστησης, όπως η ανεπάρκεια θρεπτικών ή η έλλειψη νερού (Ahmad *et al.*, 2023, Moscovini *et al.*, 2024). Ωστόσο, όσον αφορά τον ΔΚΔΒ, έχει δειχθεί ότι παρουσιάζει υπερευαισθησία στις συνθήκες του οικοσυστήματος, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με σύνθεση μέγιστης τιμής για τη μείωση των επιπτώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων (π.χ. σύννεφα και αερολύματα) (Goward, Tucker & Dye, 1985, Holben, 1986, Myneni *et al.*, 1995, Ollinger, 2011, Eastman *et al.*, 2013).

Όπως όλοι οι δείκτες που δημιουργήθηκαν για να απλοποιήσουν τις, κατά τα άλλα, πολύπλοκες συγχωνεύσεις δεδομένων, έτσι και ο ΔΚΔΒ εφαρμόζεται πολύ συχνά λόγω της ικανότητάς του να οριοθετεί γρήγορα τη βλάστηση και το φυτικό στρες, κάτι το οποίο έχει μεγάλη απήχηση σε εμπορικές μελέτες σχετικά με τη γεωργία και τις χρήσεις γης.

Ήδη από τις αρχές του 1970 αναγνωρίστηκε γρήγορα από την επιστημονική κοινότητα λόγω της απήχησης του, με όλα τα δεδομένα τηλεπισκόπησης από δορυφόρους παρατήρησης της Γης να είναι εξοπλισμένα για να παράγουν αυτόν τον δείκτη σε διαφορετικές χωρικές και χρονικές αναλύσεις (Huang *et al.*, 2021).

Αρκετές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί με σκοπό τη μελέτη των εξαρτήσεων της χωρικής κλίμακας του ΔΚΔΒ και τη σχέση μεταξύ του ΔΚΔΒ και της κλασματικής βλάστησης, χωρίς ωστόσο καμία σύνδεση αυτών των δύο. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα των ερευνών έδειξαν ισχυρές εξαρτήσεις χωρικής κλίμακας του ΔΚΔΒ σε ετερογενείς επιφάνειες, υποδεικνύοντας ότι οι τιμές ΔΚΔΒ σε διαφορετικές αναλύσεις μπορεί να μην είναι συγκρίσιμες. Η μη γραμμικότητα του ΔΚΔΒ σε επιφάνειες με μερική βλάστηση γίνεται

εμφανής με πιο σκούρα εδάφη και με παρουσία σιιάς. Έτσι, το ΔΚΔΒ μπορεί να μην είναι κατάλληλο για να συμπεράνει το κλάσμα της βλάστησης λόγω της μη γραμμικότητας και των επιπτώσεων του σε κλίμακα (Jiang *et al.*, 2006).

Επιπρόσθετα, τις τελευταίες δεκαετίες οι ερευνητές χρησιμοποίησαν τεχνικές τηλεπισκόπησης για την εκτίμηση της κατάστασης βλάστησης των αναπτυσσόμενων καλλιεργειών, προσδιορίζοντας το κατάλληλο μήκος κύματος ή συνδυασμό μηκών κύματος για τον χαρακτηρισμό της ανεπάρκειας των καλλιεργειών (Aparicio *et al.*, 2002, Yang *et al.*, 2011, Bhandari, Kumar & Singh, 2012). Εν συνεχεία, αρκετοί ερευνητές διερεύνησαν τεχνικές τηλεπισκόπησης για την εκτίμηση της κατάστασης αζώτου των αναπτυσσόμενων καλλιεργειών, προσδιορίζοντας το κατάλληλο μήκος κύματος ή συνδυασμό μηκών κύματος για τον χαρακτηρισμό της ανεπάρκειας του αζώτου των καλλιεργειών (Carlson & Ripley, 1997, Aparicio *et al.*, 2002, El-Shikha *et al.*, 2007, Lan, 2009, Bhandari, Kumar & Singh, 2012).

Τέλος, αρκετές μελέτες έχουν δείξει το συσχετισμό του ΔΚΔΒ με ορισμένες βιοφυσιικές ιδιότητες του θόλου της βλάστησης (π.χ. Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (LAI), κλασματική βλάστηση, κατάσταση της βλάστησης και βιομάζα), με το πρώτο να αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση του LAI και στη συνέχεια εισέρχεται σε μία ασυμπτωτική φάση όπου αυξάνεται πολύ αργά με την αύξηση του LAI. Έχει βρεθεί λοιπόν ότι αυτή η ασυμπτωτική περιοχή αφορά μία επιφάνεια η οποία καλύπτεται σχεδόν πλήρως από φύλλα (Curran, 1983, Huete *et al.*, 1985, Carlson and Ripley, 1997, Jiang *et al.*, 2006), με το ΔΚΔΒ να ανταποκρίνεται, κυρίως επιφάνειες με πυκνή βλάστηση, στις κόκκινες ανακλάσεις και να παρουσιάζει μία σχετική ανθεκτικότητα στις παραλλαγές Κοντινού Υπερύθρου (ΚΥ), και ως εκ τούτου δεν μπορεί να απεικονίσει παραλλαγές στο LAI (Huete *et al.*, 1997, Jiang *et al.*, 2006).

## 2.2.2. Επεξήγηση ΔΚΔΒ

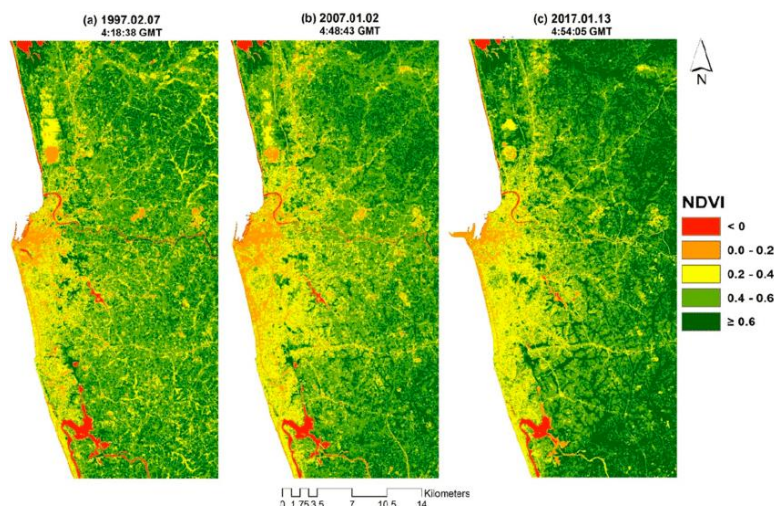
### 2.2.2.1. Γενικά-Εφαρμογές

Γενικός σκοπός της χρήσης του ΔΚΔΒ είναι η βελτίωση της ανάλυσης πληροφοριών σχετικά με τη βλάστηση, με τη χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης (Huang *et al.*, 2021). Ειδικότερα, η ιδέα πίσω από τη χρήση του ΔΚΔΒ είναι ότι μετρώντας το πράσινο, το ΔΚΔΒ παρέχει μία περιγραφή της βλαστικής υγείας ανά πάσα στιγμή και με τη σειρά του θα πρέπει να συσχετίζεται στενά με τις αποδόσεις των καλλιεργειών καθώς επίσης και την πρωτογενή παραγωγή (Turvey & McLaurin, 2012).

Αποτελεί μία γρήγορη και χαμηλού κόστους μέθοδο για την παροχή σημαντικών πληροφοριών σχετικά με την υπό εξέταση βλάστηση. Μέσω της χρήσης χαμηλού κόστους καμερών ΚΠΜ, τα προβλήματα

τα που σχετίζονται με τη χρήση εικόνων που λαμβάνονται από πολυφασματικές κάμερες χαμηλής ανάλυσης μπορούν να περιοριστούν (Costa *et al.*, 2020, Moscovini *et al.*, 2024).

Πολλοί ερευνητές έχουν αναφέρει στη χρήση του ΔΚΔΒ στην παρακολούθηση της βλάστησης για την αξιολόγηση της κάλυψης των καλλιεργειών, για την παρακολούθηση της ξηρασίας καθώς επίσης και για την αξιολόγηση της ξηρασίας στον τομέα της γεωργίας, τόσο σε εθνικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο (Bhandari, Kumar & Singh, 2012).



Εικόνα 2.1. Παράδειγμα χάρτη ΔΚΔΒ (Ranagalage, Estoque & Murayama, 2017).

Ο ΔΚΔΒ στοχεύει στη διαφοροποίηση των περιοχών με βλάστηση από αυτές χωρίς βλάστηση (Shukla *et al.*, 2021). Ειδικότερα, παρέχει μία ποσοτική εκτίμηση τόσο της βιομάζας όσο και της υγείας της βλάστησης αλλά και της ανάπτυξης μίας καλλιέργειας μέσω της μέτρησης της διαφοράς μεταξύ του ΕΥ (αντανακλαστική ζώνη) καθώς και του Κ (ζώνη απορρόφησης) της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, με τις τιμές του να κυμαίνονται από -1 έως 1, ανάλογα με την έλλειψη ή μη της υγείας της εκάστοτε καλλιέργειας (Εικ. 2.1) (Rouse *et al.*, 1973, Amani & Shafizadeh-Moghadam, 2023).

Σχετίζεται άμεσα με τη φωτοσυνθετική ικανότητα και, ως εκ τούτου, την ενεργειακή πρόσληψη των θόλων των φυτών (Gamon *et al.*, 1995; Grace *et al.*, 2007), παρέχοντας ουσιαστικές πληροφορίες σχετικά με την εκτεθειμένη επιφάνεια στην ατμόσφαιρα για τη φωτοσύνθεση (Kamble *et al.*, 2013, Amani & Shafizadeh-Moghadam, 2023).

Περιγράφει τη διαφορά μεταξύ της ορατής και της εγγύς υπέρυθρης ανάκλασης της κάλυψης της βλάστησης, ενώ μετρά τη διαφορά μεταξύ του ΕΥ (το οποίο αντανακλά η βλάστηση) και του Κόκκινου φωτός (το οποίο απορροφά η βλάστηση) (Chen *et al.*, 2006, Zhang *et al.*, 2022).

Ο υπολογισμός του βασίζεται στη παρακάτω εξίσωση (Εξ. 3):

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} \quad (3)$$

όπου το  $R_{NIR}$  σημαίνει ανάκλαση κοντά στο ΕΥ και το  $R_{RED}$  σημαίνει Κόκκινη ανάκλαση (Nowak, 2020).

Μετράται με τηλεπισκόπηση μέσω δορυφορικών αισθητήρων, ενώ έχει βρεθεί να συσχετίζεται σημαντικά με το θερμικό περιβάλλον (Zhang *et al.*, 2022).

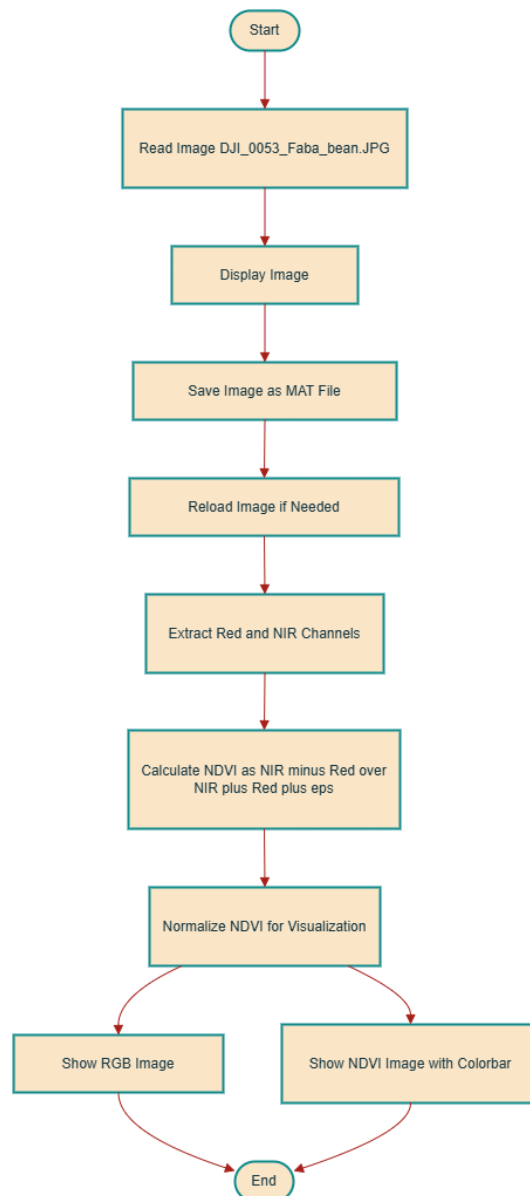
Τα δεδομένα του ΔΚΔΒ, ύστερα από σωστή ταξινόμηση, βρίσκουν στις μέρες μας τεράστιες εφαρμογές και στον τομέα της ΓΑΚΡ. Πράγματι, τα ταξινομημένα δεδομένα έχειδειχθεί ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία χαρτών-συνταγών, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σκοπό την κατανομή λιπασμάτων μεταβλητού ρυθμού, την άρδευση, τα φυτοπροστατευτικά κ.λπ. (Stone *et al.*, 2022, Li *et al.*, 2023, Sozzi *et al.*, 2023, Moscovini *et al.*, 2024).

Πιο συγκεκριμένα, μελέτες έχουν δείξει ότι ο δείκτης ΔΚΔΒ είναι αποτελεσματικός, μεταξύ των άλλων, για τη διαφοροποίηση της σαβάνας, των πυκνών δασών, των μη δασικών και γεωργικών αγρών, καθώς και για την εκτίμηση των διαφορών ιδιοτήτων βλάστησης, συμπεριλαμβανομένου των LAI (π.χ. Tian *et al.*, 2017), βιομάζα (π.χ. Zhu and Liu, 2015), συγκέντρωση χλωροφύλλης στα φύλλα (π.χ. Pastor-Guzman *et al.*, 2015), παραγωγικότητα φυτών (π.χ. Vicente-Serrano *et al.*, 2016), κλασματική κάλυψη βλάστησης (π.χ. Dutrieux *et al.*, 2015) και στρες των φυτών, ακόμη και στις οικονομικές, κοινωνικές και ιατρικές επιστήμες (Chavez *et al.*, 2016, Robinson *et al.*, 2017, Huang *et al.*, 2021).

#### 2.2.2.2. Αλγόριθμος Απεικόνισης ΔΚΔΒ

Ο ΔΚΔΒ που προτείνεται από τους Haboudane *et al.*, (2004) αναφέρεται στην πρόοδο της φασματοσκοπίας πεδίου, η οποία σχετίζεται άμεσα με τη μέτρηση του ΔΚΔΒ και άλλων φασματικών δεικτών για την ανίχνευση βλάστησης.

Παρακάτω εμφανίζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου για την δημιουργία του ΔΚΔΒ (Εικ. 2.2):



Εικόνα 2.2. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου για τον υπολογισμό του ΔΚΔΒ.

Γενικά, ο παραπάνω κώδικας διαβάζει μία εικόνα, υπολογίζει τον ΔΚΔΒ χρησιμοποιώντας τα κανάλια της εικόνας, τον κανονικοποιεί και τελικώς εμφανίζει τόσο την αρχική εικόνα όσο και την εικόνα του ΔΚΔΒ σε ένα νέο παράθυρο.

Ο ΔΚΔΒ χρησιμοποιείται συχνά για την ανάλυση της βλάστησης σε δορυφορικές και αεροφωτογραφίες, με τις τιμές του να κυμαίνονται από -1 έως 1 (Turvey & McLaurin, 2012), με την υγιή, υψηλής πυκνότητας, βλάστηση (π.χ. εύκρατα και τροπικά δάση) να εμφανίζουν τιμές 0,6 έως 0,8 (υψηλή τιμή), χλωώδεις εκτάσεις που εμφανίζονται στην περιοχή (θάμνοι και λιβάδια) από 0,2-0,3 (μέτριες τιμές), επιφάνειες

όπως άμμος, βράχοι και χιόνι έχουν τιμές 0,1 και κάτω (πολύ χαμηλές τιμές ΔΚΔΒ) και τέλος, το γυμνό έδαφος αντιπροσωπεύεται με τιμές ΔΚΔΒ πλησίον του 0 ενώ τα υδάτινα σώματα αρνητικές τιμές (ιοντά στο -1) (Weier and Herring, 2000, Kumar & Singh, 2012, Rugel *et al.*, 2017, Bhandari), με την ιδανική τιμή να εξαρτάται από την εφαρμογή. Ειδικότερα, στις γεωργικές εκμεταλλεύσεις, οι οποίες αποτελούν αντικείμενο έρευνας στην συγκεκριμένη διπλωματική, η πλέον αποδεκτή τιμή η οποία συνδέεται με την υγεία της εκάστοτε καλλιέργειας είναι αυτή από 0,6 και πάνω.

Παρακάτω παρατίθεται μια αναλυτική εξήγηση του κώδικα χωρίς να εμφανίζεται ο ίδιος ο κώδικας.

Αρχικά, ο κώδικας διαβάζει την εικόνα από ένα αρχείο. Η εικόνα αυτή φορτώνεται σε μια μεταβλητή που ονομάζεται 'img'. Αυτή η ενέργεια πραγματοποιείται με τη χρήση της συνάρτησης 'imread', η οποία είναι ενσωματωμένη στο MATLAB και διαβάζει την εικόνα από το αρχείο και την αποθηκεύει σε μορφή πίνακα. Ο πίνακας αυτός περιέχει τιμές για κάθε εικονοστοιχείο (pixel) της εικόνας, χωρισμένες στα τρία κανάλια χρώματος (κόκκινο, πράσινο, μπλε - RGB).

Στη συνέχεια, η εικόνα απεικονίζεται στην οθόνη χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση 'imshow'. Αυτή η ενέργεια είναι προαιρετική και έχει ως σκοπό την εμφάνιση της αρχικής εικόνας για έλεγχο.

Η εικόνα αποθηκεύεται επίσης σε μορφή αρχείου '.mat' χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση 'save'. Η μορφή αυτή είναι συγκεκριμένη για το MATLAB και επιτρέπει την εύκολη αποθήκευση και φόρτωση δεδομένων. Αυτή η αποθήκευση είναι επίσης προαιρετική και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποθηκευτεί η εικόνα σε μορφή που να είναι εύκολα προσβάσιμη στο MATLAB.

Αν χρειαστεί, η εικόνα μπορεί να διαβαστεί ξανά από το αρχείο χρησιμοποιώντας την ίδια συνάρτηση 'imread'. Αυτό το βήμα μπορεί να φανεί χρήσιμο εάν θέλουμε να διασφαλίσουμε ότι η εικόνα που χρησιμοποιούμε είναι η ίδια με αυτήν που φορτώθηκε αρχικά.

Για τον υπολογισμό του δείκτη ΔΚΔΒ, χρησιμοποιούνται δύο από τα κανάλια της εικόνας. Ο δείκτης ΔΚΔΒ υπολογίζεται από τη διαφορά και το άθροισμα των τιμών δύο καναλιών χρώματος, συνήθως του κοντινού υπερύθρου (NIR) και του κόκκινου (Red). Στον κώδικα αυτόν, υποτίθεται ότι το κανάλι του κοντινού υπερύθρου είναι το πράσινο κανάλι της εικόνας. Έτσι, το κόκκινο κανάλι αποθηκεύεται στη μεταβλητή 'redChannel' και το πράσινο κανάλι (που θεωρείται NIR) αποθηκεύεται στη μεταβλητή 'nirChannel'.

Για την αποφυγή της διαίρεσης με το μηδέν, προστίθεται μια πολύ μικρή τιμή ('eps') στον παρονομαστή. Αυτό εξασφαλίζει ότι η διαίρεση θα είναι ασφαλής και δεν θα προκαλέσει σφάλματα. Η συνάρτηση 'double' χρησιμοποιείται για να μετατρέψει τις τιμές των καναλιών σε τύπο 'double', επιτρέποντας πιο ακριβείς υπολογισμούς.



Αφού υπολογιστεί ο δείκτης ΔΚΔΒ, οι τιμές του κανονικοποιούνται ώστε να βρίσκονται στο διάστημα  $[0, 1]$  για καλύτερη απεικόνιση. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσαρμογή των τιμών από το διάστημα  $[-1, 1]$  στο διάστημα  $[0, 1]$ .

Τέλος, τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα παράθυρο γραφικών. Δημιουργείται μια νέα φιγούρα με συγκεκριμένες διαστάσεις και τοποθετούνται δύο υποκατηγορίες (‘axes’). Στην πρώτη υποκατηγορία απεικονίζεται η αρχική εικόνα RGB, ενώ στη δεύτερη υποκατηγορία απεικονίζεται η εικόνα ΔΚΔΒ χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση ‘imagesc’, η οποία χρωματίζει τα δεδομένα σύμφωνα με τις τιμές τους. Προστίθεται επίσης μια χρωματική γραμμή (colorbar) για να δείχνει την αντιστοιχία χρωμάτων-τιμών στην εικόνα ΔΚΔΒ.

Με τον τρόπο αυτόν, ο κώδικας επιτυγχάνει τον υπολογισμό και την απεικόνιση του δείκτη ΔΚΔΒ, παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες για την ανάλυση της βλάστησης στην εικόνα.

Η φασματική υπογραφή της βλάστησης είναι πολύ χαρακτηριστική και για αυτό η διάκρισή της από τις χέρσες περιοχές είναι εύκολη. Η διαφορά ανάμεσα στην ανάκλαση στην περιοχή του ορατού και σε εκείνη στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της φωτοσύνθεσης και της ανάπτυξης των φυτών.

Παράδειγμα αυτού αποτελεί η εργασία των Wang *et al.* (2017) όπου χρησιμοποίησαν δείκτες βλάστησης όπως ο ΔΚΔΒ, για την παρακολούθηση της φαινολογίας της βλάστησης σε δάση υψηλών γεωγραφικών πλατών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενσωμάτωση ενός μοντέλου απόδοσης χρήσης φωτός στις εκτιμήσεις που βασίζονται στον ΔΚΔΒ μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την παρακολούθηση της φαινολογίας της βλάστησης, καθιστώντας την πιο συνεπή με τη δυναμική της φωτοσύνθεσης (Wang *et al.*, 2017).

### 2.3. Αναπαράσταση χαρτών

Η αναπαράσταση των χαρτών αποτελεί μία διαδικασία η οποία περιλαμβάνει, εκτός των άλλων, την απόδοση γεωγραφικών δεδομένων και πληροφοριών σε ένα γραφικό μέσο, όπως ένας χάρτης. Αυτή η διαδικασία στοχεύει σε μία κατανοητή και οπτικά ελκυστική εικόνα του γεωγραφικού χώρου, διευκολύνοντας έτσι την ανάλυση και την ερμηνεία των δεδομένων (Nkeki, N. F., & Asikhia, 2014).

Οι χάρτες αποτελούνται από διάφορα στοιχεία, όπως σύμβολα, χρώματα, γραμμές και κείμενο, τα οποία βοηθούν στην αναπαράσταση διαφορετικών τύπων γεωγραφικών πληροφοριών. Η επιλογή λοιπόν των κατάλληλων συμβόλων και χρωμάτων είναι κρίσιμη, καθώς θα πρέπει να είναι τόσο εύκολα στην κατανόηση όσο και στην αποτελεσματική μεταφορά των πληροφοριών που αντιπροσωπεύουν. Επιπλέον χρησιμοποιούν την κλίμακα για να δείξουν τη σχέση μεταξύ των αποστάσεων στον χάρτη καθώς και των πραγματικών απο-

στάσεων στο έδαφος (Dong, Ran & Wang, 2012). Ακολούθως η προβολή είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας, καθώς οι τρισδιάστατες (3D) γεωγραφικές επιφάνειες πρέπει να αναπαρίστανται σε 2D επιφάνειες, με τον κάθε τύπο προβολής να εμφανίζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Οι τεχνολογικές εξελίξεις από την άλλη, έχουν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται και χρησιμοποιούνται οι χάρτες. Η ψηφιακή χαρτογράφηση καθώς και τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) έχουν κάνει την επεξεργασία και ανάλυση γεωγραφικών δεδομένων ευκολότερη και ακριβέστερη. Ειδικότερα, τα GIS επιτρέπουν την αποθήκευση, ανάλυση και προβολή γεωγραφικών δεδομένων σε πολλαπλά επίπεδα, διευκολύνοντας τη δημιουργία σύνθετων και δυναμικών χαρτών. Επιπρόσθετα, οι τεχνολογίες έχουν επίσης καταστήσει δυνατή τη δημιουργία διαδραστικών χαρτών, που επιτρέπουν στους χρήστες να εξερευνούν τα δεδομένα με πιο ευέλικτο τρόπο (Nkeki, N. F., & Asikhia, 2014).

Οι χάρτες χρησιμοποιούνται σε μία πληθώρα εφαρμογών, μία εκ των οποίων και αυτή της γεωργίας. Η αναπαράσταση λοιπόν των χαρτών συνδέεται στενά με τον γεωργικό τομέα και ειδικότερα με τη ΓΑ. Επιπλέον, η χρήση χαρτών και GIS στη ΓΑ επιτρέπει την ακριβή ανάλυση και διαχείριση των αγροτικών εκτάσεων, βελτιώνοντας έτσι τη λήψη αποφάσεων καθώς και τη διαχείριση πόρων (Wilson, 1999, Raihan, 2024).

Ειδικότερα, στη ΓΑ οι χάρτες χρησιμοποιούνται για τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων από διάφορες πηγές, όπως δορυφορικές εικόνες, αισθητήρες εδάφους και κλιματικά δεδομένα. Αυτά τα δεδομένα ενσωματώνονται σε GIS και μετατρέπονται σε θεματικούς χάρτες όπου αποτυπώνονται οι χωρικές διακυμάνσεις του εδάφους, της υγρασίας, της θρεπτικής κατάστασης αλλά και άλλων παραμέτρων.

Με τη χρήση αυτών των χαρτών, οι παραγωγοί μπορούν να κατανοήσουν καλύτερα τις ανάγκες κάθε τμήματος της καλλιέργειάς τους αλλά και να λάβουν τεκμηριωμένες αποφάσεις για τη διαχείριση των πόρων (Rane *et al.*, 2023, Kushwaha *et al.*, 2024).

## 2.4. Γράφος Ορατότητας (ΓΟ)

### 2.4.1. Γενικά-Ορισμός

Η ορατότητα είναι μία κρίσιμη έννοια για την αξιολόγηση λεπτής κλίμακας αρχιτεκτονικών τοπίων. Ως ένας τύπος οπτικής προσβασιμότητας, εμφανίζει τις κατανεμημένες δυνατότητες των συναντήσεων πρόσωπο με πρόσωπο, καθώς και συνδέει τις δομημένες μορφολογίες με τα συνολικά ταξιδιωτικά μοτίβα και άλλες κοινωνικοοικονομικές κατανομές (Shen & Wu, 2022).

Η ανάπτυξη αυτής της ιδέας εντοπίζεται πίσω στην περίοδο που εισήχθη η έννοια του «σοβιστή» ή του «viewshed» (Amidon & Elsner, 1968) η οποία αργότερα εξελίχθηκε σε μία νέα μορφή που ονομάζεται



Ανάλυση Γραφήματος Ορατότητας (ΑΓΟ) (De Floriani *et al.*, 1994), με το γράφημα ορατότητας να σχηματίζεται συνδέοντας τοποθεσίες σε ένα περιβάλλον ανάλογα με το αν η καθεμία είναι ορατή από την άλλη (O'Sullivan & Turner, 2001).

#### 2.4.2. Ορολογία

Μια αναλυτική εισαγωγή στη μαθηματική θεωρία των γράφων και τη σχετική ορολογία, δίνεται από τον Wilson (1996).

Γενικά, ένας γράφος  $G$  αποτελείται από δύο σύνολα  $V$  και  $E$ , και συχνά γράφεται  $G(V, E)$ . Το  $V(G)$  αποτελεί ένα σύνολο κορυφών (ή κόμβων)  $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , όπου  $n$  είναι το μέγεθος του γράφου. Το  $E(G)$  από την άλλη αποτελεί ένα σύνολο ακμών (ή συνδέσμων) μεταξύ των κορυφών, όπου κάθε ακμή  $e$  είναι ένα μη διατεταγμένο ζεύγος κορυφών  $v_i$  και  $v_j$  και μπορεί να γραφεί  $v_i v_j$  ή  $e_{ij}$  για συντομία (O'Sullivan & Turner, 2001).

Ο ΓΟ που προτείνεται από τους Lozano-Perez και Wesley (1979) είναι η κλασική μέθοδος για την αντιμετώπιση της εύρεσης του συντομότερου μονοπατιού ενός σημείου ανάμεσα σε πολυγωνικά εμπόδια. Το ΓΟ αποτελεί ένα συμπαγές, μη κατευθυνόμενο γράφημα που καταγράφει την ορατότητα μεταξύ των κορυφών των εμποδίων. Από την άλλη, ο αλγόριθμος ΓΟ, αν και είναι πλήρης και εύκολος στην εφαρμογή, ωστόσο είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί μια αποτελεσματική διαδρομή για το περιβάλλον με πολύπλοκα εμπόδια. Συνήθως χρειάζεται υπολογιστικός χρόνος  $O(N)$ , όπου  $N$  είναι ο συνολικός αριθμός κορυφών εμποδίου (Huang & Chung, 2004).

Μια άλλη σημαντική έννοια είναι ο πίνακας γειτνίασης  $A$  ενός γραφήματος  $G$ . Το  $A$  ορίζεται έτσι ώστε (Εξ. 4):

$$A = [a_{ij}] \text{ where } a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } v_i v_j \in E(G) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

Ο πίνακας γειτνίασης (adjacency matrix) είναι χρήσιμος για την κατανόηση της σχέσης μεταξύ της ανάλυσης οπτικής γωνίας και του γραφήματος ορατότητας. Σε ένα απλό γράφημα, σε όλες τις περιπτώσεις, ισχύει  $a_{ij} = a_{ji}$ . Ωστόσο, σε ένα κατευθυνόμενο γράφημα αυτό δεν συμβαίνει απαραίτητα, με την συμμετρία των συνδέσεων μεταξύ των κορυφών μπορεί να σπάσει. Πολλοί χειρισμοί απλών μη κατευθυνόμενων γραφημάτων είναι επίσης δυνατοί σε κατευθυνόμενα γραφήματα (O'Sullivan & Turner, 2001).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, συσχετίζουμε τα δεδομένα του δείκτη βλάστησης με έναν γράφο.

## 2.5. Δημιουργία ΓΟ

### 2.5.1. Εισαγωγή-Βιβλιογραφικές αναφορές

Η ορατότητα αποτελεί μία κρίσιμη έννοια για την αξιολόγηση λεπτής κλίμακας αρχιτεκτονικών τοπίων (Shen & Wu, 2022), με το γράφημα ορατότητας να πλεονεκτεί λόγω της ευκαιρίας που παρέχει για περαιτέρω ανάλυση των χαρακτηριστικών ορατότητας μίας περιοχής (O'Sullivan & Turner, 2001).

Η ιδέα των ΓΟ αρχικά εισήχθη με σκοπό την ανάλυση των σχέσεων αμοιβαίας ορατότητας μεταξύ σημείων και εμποδίων σε 2D τοπία στο πλαίσιο της υπολογιστικής γεωμετρίας, με εφαρμογές που κυμαίνονται από τον σχεδιασμό κίνησης ρομπότ έως τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και τις τοπογραφικές περιγραφές του γεωγραφικού χώρου (Lozano-Perez & Wesley, 1979, Nagy, 1994, de Floriani *et al.*, 1994, Donner & Donges, 2012). Ακολούθως χρησιμοποιήθηκαν από τους Braaksma & Cook (Braaksma & Cook, 1980), όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, με τους Lacasa *et al.*, (2008) να υιοθετούν την προσέγγιση ΓΟ για την ανάλυση δομών σε βαθμωτές, μονομεταβλητές χρονοσειρές, ενώ οι Telesca & Lovallo (2012) τα χρησιμοποίησαν για τη μελέτη της σεισμικής δραστηριότητας στην Ιταλία (Donner & Donges, 2012).

Ακολούθως, οι Natapon *et al.*, (2016) και Natapon και Fisher-Gewirtzman (2016) να επαναλαμβάνουν αργότερα την ανάγκη δημιουργίας ενός πιο ολοκληρωμένου ΓΟ τόσο με τα τμήματα του δρόμου όσο και με τις λειτουργίες του τόπου τους (Shen & Wu, 2022).

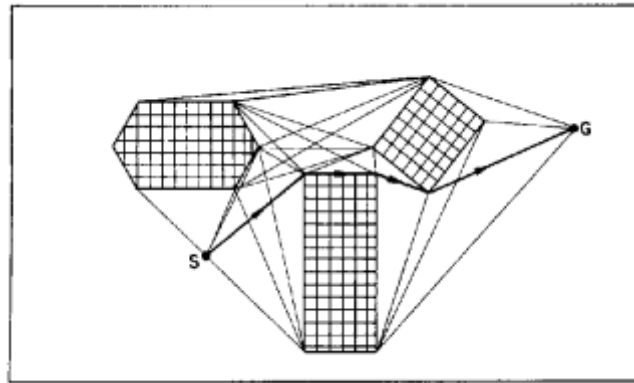
Όσον αφορά τον τομέα της γεωργίας, η έννοια αυτή εμφανίστηκε για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία της Επιστήμης των Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΕΓΠ) στο πλαίσιο του προσδιορισμού των προτιμώμενων δρομολογήσεων μέσω ενός συνόλου πομποδεκτών επικοινωνίας οπτικής επαφής σε ένα τοπίο (de Floriani *et al.*, 1994). Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν και στον τομέα της πλοήγησης ρομπότ σε πολύπλοκα 2D και 3D περιβάλλοντα (de Berg *et al.*, 1997), με την 2D περίπτωση της πλοήγησης από ένα ρομπότ ανάμεσα σε ένα σύνολο πολυγωνικών εμποδίων να βασίζεται στο σύνολο των κορυφών του πολυγώνου και στην αμοιβαία ορατότητά τους (O'Sullivan & Turner, 2001).

### 2.5.2. Επεξήγηση ΓΟ

#### 2.5.2.1. Γενικά-Εφαρμογές

Ως ΓΟ ορίζεται ένας γράφος με ορατές τοποθεσίες, συνήθως για ένα σύνολο σημείων και εμποδίων στον Ευκλείδειο χώρο.

Δύο κόμβοι θεωρούνται γειτονικοί σε ένα ΓΟ κορυφής ενός πολυγώνου εάν και μόνο εάν το ευθύγραμμο τμήμα που καθορίζεται από τις συσχετισμένες κορυφές δεν είναι σε κανένα σημείο εξωτερικό του πολυγώνου. Έτσι οι συνδέσεις αντιπροσωπεύουν οπτικές γραμμές μεταξύ κορυφών (O'rourke, 1987).



Εικόνα 2.3. Παράδειγμα ΓΟ (Lozano-Pérez & Wesley, 1979).

Έστω ότι έχουμε το πρόβλημα της μετακίνησης ενός σημειακού αντικειμένου  $A$  από τη θέση  $S$  στη θέση  $G$ , αποφεύγοντας παράλληλα τα εμπόδια (Εικ. 2.3), ενώ φαίνεται επίσης και η συντομότερη διαδρομή χωρίς σύγκρουση από το  $S$  στο  $G$  (Lozano-Pérez & Wesley, 1979).

Η πιο σημαντική ιδιότητα αυτής της διαδρομής είναι ότι αποτελείται από ευθείες γραμμές οι οποίες ενώνουν την αρχή με τον προορισμό μέσω μίας πιθανώς κενής ακολουθίας κορυφών εμποδίων (Lozano-Pérez & Wesley, 1979).

Ακολουθώς έχουμε τον μη κατευθυνόμενο γράφο  $VG(N, L)$ , ο οποίος ορίζεται ως εξής: Το σύνολο κόμβων  $N$  είναι  $V \cup \{S, G\}$ , όπου  $V$  είναι το σύνολο όλων των κορυφών των εμποδίων και το σύνολο συνδέσμων  $L$  είναι το σύνολο όλων των συνδέσμων  $(n_i, n_j)$  έτσι ώστε μία ευθεία γραμμή που συνδέει το  $i$ th στοιχείο του  $N$  με το  $j$ th να μην επικαλύπτει κανένα εμπόδιο. Ο γράφος  $VG(N, L)$  ονομάζεται γράφος ορατότητας (VGRAPH) του  $N$  αφού οι συνδεδεμένες κορυφές στο γράφημα μπορούν να δουν η μία την άλλη (Lozano-Pérez & Wesley, 1979).

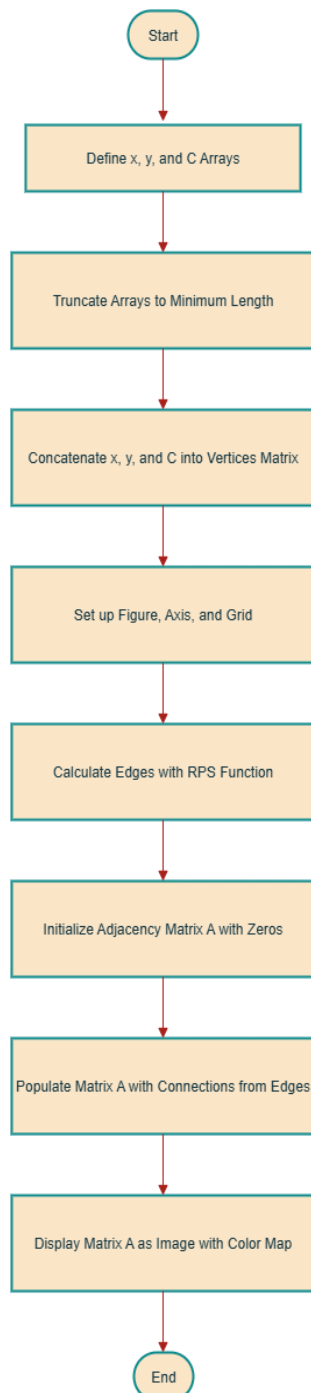
Επιπλέον, ως συντομότερη διαδρομή χωρίς σύγκρουση από το  $S$  στο  $G$  στο επίπεδο ορίζεται η συντομότερη διαδρομή στο VGRAPH από τον κόμβο που αντιστοιχεί στο  $S$  σε εκείνον που αντιστοιχεί στο  $G$  όταν χρησιμοποιείται η μετρική της Ευκλείδειας απόστασης στους συνδέσμους (Lozano-Pérez & Wesley, 1979).

Οι ΓΟ έχουν πολλές εφαρμογές. Για παράδειγμα έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές φορές ως προσέγγιση για προβλήματα συντομότερης διαδρομής στο επίπεδο, κ.α. (Overmars & Welzl, 1988).

### 2.5.2.2. Μοντελοποίηση

Ο ΓΟ που προτείνεται από τους Lozano-Perez και Wesley (1979) είναι η κλασική μέθοδος για την αντιμετώπιση της εύρεσης του συντομότερου μονοπατιού ενός σημείου ανάμεσα σε πολυγωνικά εμπόδια.

Παρακάτω εμφανίζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου για την δημιουργία του ΓΟ (Εικ 2.4).



Εικόνα 2.4. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου για την δημιουργία ενός ΓΟ.

Ο κώδικας δημιουργεί έναν γράφο από ένα σύνολο κορυφών και συνδέσεων, υπολογίζει τον πίνακα γειτνίασης που απεικονίζει τις συνδέσεις μεταξύ των κορυφών και παρουσιάζει αυτόν τον πίνακα με τη μορφή μίας εικόνας.

### 2.5.2.3. Ανάλυση

Για την δημιουργία ενός ΓΟ χρειάζονται τα εξής:

- α) κόμβοι οι οποίοι αντιπροσωπεύουν το αρχικό και τελικό σημείο καθώς και τις κορυφές των εμποδίων
- β) σύνδεση όλων των κόμβων οι οποίοι είναι μεταξύ τους «ορατοί» (η σύνδεση γίνεται σε ευθεία γραμμή και χωρίς εμπόδια μεταξύ 2 οποιονδήποτε κόμβων) και
- γ) συμπερίληψη όλων των άκρων των πολυγωνικών εμποδίων.

Σύμφωνα με τον Joseph O'Rourke, τα βήματα για την δημιουργία ενός ΓΟ, είναι τα κάτωθι:

- 1) **Καθορισμός των κορυφών:** πραγματοποίηση εντοπισμού όλων των κορυφών των πολυγώνων που απαρτίζουν το περιβάλλον (εμπόδια, ελεύθερος χώρος).
- 2) **Έλεγχος της ορατότητας:** έλεγχος για το κατά πόσο το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει κάθε φορά ένα ζεύγος κορυφών, ενώνει τα δύο αυτά σημεία χωρίς να τέμνει τυχόν πολυγωνικά εμπόδια που παρεμβάλλονται μεταξύ αυτών.
- 3) **Κατασκευή των ακμών:** σύνδεση κάθε ζεύγους ορατών κορυφών με μία ακμή, σχηματίζοντας έναν γράφο όπου οι κόμβοι αποτελούν τις κορυφές.
- 4) **Αποθήκευση του γράφου:** αποθήκευση ΓΟ σε δομές δεδομένων (π.χ. πίνακας γειτνίασης, κ.λπ.).

Πιο αναλυτικά, αρχικά γίνεται ο ορισμός καθώς και η εισαγωγή των εμποδίων και των σημαντικών σημείων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εισόδου ενός συνόλου από πολυγωνικά εμπόδια σε δισδιάστατο χώρο, των αρχικών και τελικών σημείων ενώ πραγματοποιείται και η προσθήκη των κορυφών των πολυγώνων καθώς και τα σημεία ενδιαφέροντος.

Ακολούθως γίνεται η δημιουργία των ακμών, μόνο μεταξύ των «ορατών» κορυφών. Ειδικότερα, για κάθε ζεύγος κορυφών ( $u$ ,  $v$ ) εξετάζεται αν η ευθεία μεταξύ τους δεν τέμνει κάποια ακμή από τα εμπόδια (εκτός από τις ακμές που ενώνουν γειτονικές κορυφές του ίδιου εμποδίου). Σε περίπτωση που δεν υφίσταται τμήση, δημιουργείται η αντίστοιχη  $u$ - $v$  ακμή στον γράφο. Η διαδικασία αυτή είναι υπολογιστικά απαιτητική διότι μπορεί να έχει  $O(n^2)$  ζεύγη προς εξέταση.

Εν συνεχεία πραγματοποιείται ο έλεγχος της ορατότητας. Συγκεκριμένα, για κάθε ζεύγος ( $u$ ,  $v$ ) χρησιμοποιείται ένα τεστ τομής ευθύγραμμου τμήματος με πολύγωνα. Αν η ευθεία γραμμή  $u$ - $v$  δεν τέμνει κάποια ακμή από τα υπάρχοντα εμπόδια, προστίθεται ακμή, αλλιώς η ευθεία γραμμή  $u$ - $v$  δεν είναι ορατή.

Τέλος, έχοντας κάνει τα παραπάνω βήματα, ακολουθεί η σύνθεση του ΓΟ. Ειδικότερα, ο συνδυασμός των παραπάνω βημάτων έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ΓΟ  $G = (V, E)$ , όπου το  $V$  αποτελεί το σύνολο των κορυφών (κορυφές πολυγώνων, αρχικό και τελικό σημείο) και το  $E$  το σύνολο των ακμών που συνδέουν τις «ορατές» κορυφές.

Στον παραπάνω αλγόριθμο (Εικ. 2.4), απεικονίζεται ο ψευδοκώδικας του ΓΟ που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μελέτη. Η εφαρμογή του αλγορίθμου αυτού βασίζεται σε μία μέθοδο, αυτή των Ghosh και Mount, περιγράφει έναν αποδοτικό αλγόριθμο για την κατασκευή ΓΟ, ο οποίος είναι ευαίσθητος στην έξοδο (output-sensitive) (Ghosh & Mount, 1991).

Ο κώδικας αυτός έχει ως στόχο τη δημιουργία ενός γράφου από σύνολο κορυφών και την απεικόνιση της γειτνίασης μεταξύ αυτών των κορυφών με τη μορφή ενός πίνακα γειτνίασης. Η ανάλυση γίνεται σε διάφορα στάδια, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

Αρχικά, ο κώδικας καθαρίζει τον χώρο εργασίας, κλείνει όλα τα ανοιχτά παράθυρα και καθαρίζει το παράθυρο εντολών. Αυτό διασφαλίζει ότι ο χρήστης ξεκινά με έναν καθαρό πίνακα και δεν υπάρχει καμία σύγχυση από προηγούμενα δεδομένα ή γραφικά.

Στη συνέχεια, ορίζονται οι συντεταγμένες  $x$  και  $y$  για 14 κορυφές, καθώς και ένας πίνακας  $C$  που περιέχει τις συνδέσεις μεταξύ των κορυφών. Οι συντεταγμένες ' $x$ ' και ' $y$ ' δίνονται ως στήλες, ενώ ο πίνακας ' $C$ ' καθορίζει ποια κορυφή συνδέεται με ποια άλλη κορυφή και αποθηκεύει τις κατηγορίες ή τις ομάδες των κορυφών.

Επειδή οι πίνακες ' $x$ ', ' $y$ ' και ' $C$ ' μπορεί να έχουν διαφορετικά μήκη, ο κώδικας υπολογίζει το μικρότερο μήκος μεταξύ αυτών των πινάκων και τους κόβει ώστε να έχουν το ίδιο μήκος. Αυτό γίνεται για να διασφαλιστεί ότι δεν υπάρχουν περιττά δεδομένα και ότι οι πίνακες μπορούν να συνδυαστούν χωρίς σφάλματα.

Οι συντεταγμένες  $x$  και  $y$ , καθώς και οι κατηγορίες από τον πίνακα  $C$ , συνδυάζονται σε έναν πίνακα ' $vertices$ ', όπου κάθε γραμμή αντιπροσωπεύει μια κορυφή με τις συντεταγμένες της και την κατηγορία της. Αυτός ο πίνακας περιέχει όλες τις πληροφορίες για τις κορυφές του γράφου.

Σε αυτό το σημείο, δημιουργείται ένα νέο παράθυρο γραφικών με άξονες από το 0 έως το 10 και ένα πλέγμα για την καλύτερη απεικόνιση των κορυφών. Ο κώδικας περιέχει μια συνάρτηση RPS που δημιουργεί τις ακμές (συνδέσεις) του γράφου με βάση τις κορυφές. Αυτή η συνάρτηση δεν παρέχεται, αλλά υποθέτουμε ότι επιστρέφει έναν πίνακα με τις ακμές του γράφου.

Ακολούθως, ο κώδικας δημιουργεί έναν πίνακα γειτνίασης  $A$  με μηδενικά αρχικά, με μέγεθος ίσο με τον αριθμό των κορυφών. Ο πίνακας αυτός χρησιμοποιείται για να αποθηκεύσει τις συνδέσεις μεταξύ των κορυφών. Για κάθε ακμή που επιστρέφεται από τη συνάρτηση RPS, οι τιμές στον πίνακα  $A$  ενημερώνονται ώστε να δείχνουν τις συνδέσεις μεταξύ των κορυφών. Για παράδειγμα, αν η κορυφή 1 συνδέεται με την κορυφή 2, οι τιμές  $A(1,2)$  και  $A(2,1)$  θα γίνουν 1.

Τέλος, δημιουργείται ένα νέο παράθυρο γραφικών για να απεικονίσει τον πίνακα γειτνίασης  $A$ . Η απεικόνιση γίνεται με τη χρήση της συνάρτησης 'imagesc', η οποία δημιουργεί μια εικόνα όπου κάθε κελί έχει χρώμα ανάλογα με την τιμή του. Ο πίνακας γειτνίασης παρουσιάζεται με γκρι αποχρώσεις, όπου το μαύρο αντιπροσωπεύει την απουσία σύνδεσης (τιμή 0) και το λευκό αντιπροσωπεύει την ύπαρξη σύνδεσης (τιμή 1). Οι άξονες της εικόνας επισημαίνονται για να δείχνουν τις κορυφές  $i$  και  $j$ , παρέχοντας μια οπτική αναπαράσταση των συνδέσεων μεταξύ των κορυφών του γράφου.

## 2.6. Συσχέτιση Γράφου-ΔΚΔΒ και Αναπαράσταση δομών/αντικειμένων

Ο ΔΚΔΒ χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της πυκνότητας και της υγείας της βλάστησης μέσω δορυφορικών εικόνων όπου τα δεδομένα του μπορούν να αναπαρασταθούν σε μορφή πλέγματος (grid), όπου κάθε pixel αντιπροσωπεύει μία γεωγραφική περιοχή και η τιμή του αντιπροσωπεύει την ένταση της βλάστησης (Ghorbani, Mossivand & Ouri, 2012).

Η θεωρία γράφων παρέχει ένα εργαλείο για αναπαράσταση των δεδομένων. Σε αυτήν την προσέγγιση, τα εικονοστοιχεία του πλέγματος μπορούν να θεωρηθούν ως κόμβοι ενός γράφου, ενώ οι ακμές συνδέουν γειτονικά εικονοστοιχεία. Αυτή η αναπαράσταση επιτρέπει τη μελέτη των χωρικών σχέσεων και τη διάδοση των τιμών του ΔΚΔΒ μέσω του πλέγματος (Guttler et al., 2017, Streich, 2019).

Οι γράφοι επιτρέπουν την ανάλυση της χωρικής κατανομής της βλάστησης. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αλγορίθμους θεωρίας γράφων για να εντοπίσουμε μοτίβα και ανωμαλίες στα δεδομένα του ΔΚΔΒ. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στην ταυτοποίηση περιοχών με υψηλή ή χαμηλή βλάστηση και στην παρακολούθηση των αλλαγών τους με την πάροδο του χρόνου (Schorcht, 2012).

Εκτός από τη χωρική ανάλυση, η θεωρία γράφων μπορεί να εφαρμοστεί και στη χρονική ανάλυση των δεδομένων του ΔΚΔΒ. Οι κόμβοι ενός γράφου μπορούν να αναπαριστούν χρονικές στιγμές, ενώ οι ακμές αντιπροσωπεύουν τις σχέσεις ή τις μεταβολές μεταξύ αυτών των στιγμών. Αυτό επιτρέπει τη μελέτη των μεταβολών του ΔΚΔΒ διαχρονικά, διευκολύνοντας την ανίχνευση τάσεων και εποχικών αλλαγών στη βλάστηση (Schorcht, 2012).



Έτσι, με βάση τα παραπάνω, η συσχέτιση μεταξύ της θεωρίας γράφων και του ΔΚΔΒ επιτρέπει την αποτελεσματική ανάλυση και κατανόηση της χωρικής και χρονικής κατανομής της βλάστησης, παρέχοντας ισχυρά εργαλεία για την περιβαλλοντική παρακολούθηση και διαχείριση.

Από την άλλη, η χρήση διαφόρων δομών και εμποδίων σε έναν γράφο είναι κρίσιμη για την αναπαράσταση και επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων σε διάφορους τομείς, έναν εκ των οποίων αυτού του αγροτικού τομέα.

Όσον αφορά τους γράφους, αυτοί επιτρέπουν την αποτύπωση σχέσεων και αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφόρων στοιχείων (κόμβων) μέσω των συνδέσεων (ακμών). Η επιλογή λοιπόν διαφορετικών δομών, όπως δέντρα, κυκλικοί ή κατευθυνόμενοι γράφοι, επιτρέπει την εξειδικευμένη ανάλυση και επίλυση προβλημάτων ανάλογα με τη φύση των δεδομένων αλλά και των απαιτήσεων του συστήματος (Das & Soylu, 2023). Παραδείγματος χάριν, στα δίκτυα άρδευσης, οι κόμβοι μπορούν να αναπαριστούν σημεία άντλησης ή διανομής νερού και οι ακμές τις διαδρομές των σωλήνων, επιτρέποντας την ανάλυση και βελτιστοποίηση της κατανομής του νερού.

Τα εμπόδια σε έναν γράφο, όπως περιορισμοί ή διακοπές σε διαδρομές, αντιπροσωπεύουν πραγματικούς περιορισμούς που πρέπει να ξεπεραστούν. Τόσο η αναγνώριση όσο και η διαχείριση αυτών των εμποδίων είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του συστήματος. Για παράδειγμα, σε ένα γράφο που αναπαριστά ένα αγροτικό δίκτυο μεταφορών, τα εμπόδια μπορεί να περιλαμβάνουν κατεστραμμένους δρόμους ή γεωγραφικά εμπόδια. Η ανάλυση αυτών των γραφημάτων βοηθά στην εύρεση εναλλακτικών διαδρομών ή λύσεων για την αποκατάσταση της λειτουργικότητας του δικτύου (Das & Soylu, 2023).

Έτσι, με τη χρήση διαφορετικών δομών και τη διαχείριση των εμποδίων σε έναν γράφο επιτρέπεται η αποτελεσματική μοντελοποίηση και ανάλυση πολύπλοκων συστημάτων. Αυτό βοηθά στην επίλυση προβλημάτων, στην βελτιστοποίηση διαδικασιών καθώς και στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων, παρέχοντας έτσι πιο αποδοτικές και αξιόπιστες λύσεις σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένου του αγροτικού τομέα (Das & Soylu, 2023).

Δυστυχώς, αν και υπάρχουν αρκετές δημοσιευμένες εργασίες σχετικά με τη χρήση τόσο του ΔΚΔΒ όσο και του ΓΟ μεμονωμένα, ωστόσο δεν υπάρχει επί του παρόντος κάποια η οποία να συνδυάζει και τα 2, έτσι ώστε να αναφερθούμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στη μεταξύ τους συσχέτιση. Ωστόσο, με βάση τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η εφαρμογή ΓΟ σε χρονοσειρές ΔΚΔΒ θα μπορούσε να επι-



τρέφει την ανίχνευση ανωμαλιών ή μεταβολών στη βλάστηση με βάση τον γράφο που προκύπτει από τα δεδομένα του ΔΚΔΒ.

## 2.7. Σύνοψη κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο, πραγματοποιήσαμε εκτενή ανάλυση του δείκτη ΔΚΔΒ και του ΓΟ. Ξεκινήσαμε με την εισαγωγή και τις βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με τον ΔΚΔΒ, εξηγώντας τη σημασία του στην αξιολόγηση της υγείας της βλάστησης και τη χρήση του στη ΓΑΚΡ. Στη συνέχεια, εξετάσαμε το ΓΟ, περιγράφοντας τη μοντελοποίηση και την ανάλυσή του, καθώς και τις εφαρμογές του στην περιβαλλοντική παρακολούθηση. Αναλύσαμε επίσης πώς η αναπαράσταση χαρτών μπορεί να ενσωματώσει δεδομένα ΔΚΔΒ και Γράφου, επιτρέποντας μια λεπτομερή αναπαράσταση των δομών και αντικειμένων μέσα σε ένα αγροτεμάχιο. Τέλος, συζητήσαμε τη συσχέτιση μεταξύ Γράφου και ΔΚΔΒ, καταδεικνύοντας πώς η συνδυασμένη χρήση αυτών των εργαλείων μπορεί να βελτιώσει τη διαχείριση και την ανάλυση της βλάστησης. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, περιγράφεται ο τρόπος εύρεσης του βέλτιστου μονοπατιού με σκοπό την επίλυση του ΠΠΠ μέσω της χρήσης των αλγορίθμων Ντάικστρα, Floyd-Warshall και ΓΑ.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Εύρεση Βέλτιστου Μονοπατιού για το Πρόβλημα του Πλανό- διου Πωλητή με Γενετικούς Αλγόριθμους

Η εύρεση του βέλτιστου μονοπατιού για το Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή (ΠΠΠ) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις στο κομμάτι της βελτιστοποίησης των διαδρομών, με εφαρμογές σε τομείς όπως η ΓΑΚΡ. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα εξετάσουμε την εύρεση του βέλτιστου μονοπατιού, ξεκινώντας με εισαγωγικά στοιχεία και βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Εν συνεχεία θα επεξηγήσουμε το ΠΠΠ ενώ τέλος, θα γίνει μία συνοπτική παρουσίαση των αλγορίθμων σχεδιασμού διαδρομής που χρησιμοποιούνται στη ΓΑΚΡ, με έμφαση στους Ντάικστρα, Floyd-Warshall και ΓΑ, οι οποίοι αποτελούν τους αλγόριθμους που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα.

#### 3.1. Πρόβλημα βελτιστοποίησης

##### 3.1.1. Εισαγωγή-Βιβλιογραφικές αναφορές

Το πρόβλημα Σχεδιασμού Κάλυψης Διαδρομής (ΣΚΔ) αποτελεί τον υπολογισμό μίας διαδρομής που διέρχεται από όλα τα απαιτούμενα σημεία του χώρου εργασίας από ένα αρχικό σε ένα τελικό σημείο. Αυτό το πρόβλημα έχει ως επί το πλείστον αντιμετωπιστεί σε ΜηΕΟΕ που χρησιμοποιούνται στον καθαρισμό, την αποναρκοθέτηση, τη γεωργία, κ.λπ., ενώ γενικά αποτελεί τη βάση πολλών εφαρμογών ΜηΕΑ, όπως η αναζήτηση στόχων, η περιμετρική επιτήρηση καθώς και ο σχεδιασμός διαδρομής αν και υπόκειται σε αυστηρότερους περιορισμούς (Valente *et al.*, 2013, Chen, Zhang & Xu, 2014).

Ο σχεδιασμός διαδρομής μέσω της χρήσης ΜηΕΑ είναι ένα από τα πεδία που έχει συγκεντρώσει μεγάλη προσοχή ως τομέας έρευνας και εφαρμογής, υπαγορεύοντας συχνά την αποτελεσματικότητα μίας εργασίας που εκτελείται από αυτό. Η κύρια πρόκληση είναι να εξασφαλιστεί η πλήρης κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος, αποφεύγοντας οποιαδήποτε απώλεια ή ανεπιθύμητη κάλυψη της περιοχής. Δεδομένου ότι το περίγραμμα μίας περιοχής είναι γενικά πολυγωνικό και όχι ομοιόμορφο, οποιαδήποτε προσέγγιση χρειάζεται σωστό σχεδιασμό και υπολογισμό (Bhattacharya *et al.*, 2020).

Όσον αφορά το πρόβλημα της εύρεσης μίας διαδρομής ενός ρομπότ που καλύπτει έναν δεδομένο χώρο εργασίας με βέλτιστο τρόπο, έχει μελετηθεί εκτενώς από αριετούς συγγραφείς, με τα σχήματα που προτείνονται για την επίλυσή του να είναι γενικά προσανατολισμένα στο διαδικτυακό ή το εκτός σύνδεσης ΣΚΔ (Oh *et al.*, 2004, Oksanen & Visala, 2009, Moon & Shim, 2009, Barrientos *et al.*, 2011).

Υπάρχουν διάφορες ταξινομήσεις των αλγορίθμων ΣΚΔ που μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία (Oksanen, 2007). Ανάλογα με το εάν το όριο της περιοχής που πρέπει να διασχιστεί είναι εκ των προτέρων χαρτογραφημένο ή όχι, οι αλγόριθμοι ΣΚΔ μπορούν να αναγνωριστούν ως εκτός σύνδεσης ή σε απευθείας σύνδεση, αντίστοιχα, με την τελευταία προσέγγιση να ονομάζεται επίσης κάλυψη βάσει αισθητήρων καθώς βασίζεται σε δεδομένα αισθητήρα πραγματικού χρόνου από το ρομπότ για την εξαγωγή πληροφοριών για το περιβάλλον. Επιπλέον, ανάλογα με τη διάσταση του χώρου που θα καλυφθεί, οι προσεγγίσεις ΣΚΔ μπορούν να ταξινομηθούν σε 2D, όταν η κίνηση του ρομπότ περιορίζεται σε επίπεδο, ή σε 3D, με αλγόριθμους κάλυψης 3D να βρίσκουν συνάφεια σε επιχειρήσεις με ΜηΕΑ ή Αυτόνομα Υποβρύχια Οχήματα (ΑΥΟ) (π.χ. εφαρμογές που περιλαμβάνουν δομικές επιθεωρήσεις (Bircher *et al.*, 2016, Pham, Ichalal & Mammari, 2020, Höffmann & Büskens, 2023).

Η πλειονότητα των εργασιών που εξετάστηκαν αναπτύχθηκαν για ρομπότ εδάφους, με την επέκτασή τους σε άλλους τύπους οχημάτων να μην συζητείται. Επιπλέον, τα περισσότερα από αυτά έχουν παρουσιάσει μόνο αποτελέσματα προσομοίωσης με ελάχιστο πειραματικό έλεγχο σε πραγματικές πλατφόρμες (Barrientos *et al.*, 2011).

Σχετικά με τις απαιτήσεις για κάλυψη αεροσκαφών που εφαρμόζονται στην τηλεπισκόπηση σε αγροτικό περιβάλλον, είναι διαφορετικές από εκείνες για τα ρομπότ εδάφους καθώς ένα εναέριο όχημα είναι σχεδόν πάντα σε θέση να κινηθεί προς οποιαδήποτε κατεύθυνση χωρίς να καταστρέφει την καλλιέργεια και, ανάλογα με το ύψος πτήσης και τη χωρική ανάλυση που απαιτείται, να αντιμετωπίσει ευρύτερες περιοχές και επομένως αυξημένες διαστάσεις κυψέλης. Επιπλέον, επειδή δεν είναι όλες οι περιοχές κατάλληλες για απογείωση ή προσγείωση με εναέριο ρομπότ, η τροχιά πρέπει να εξασφαλίζει σημεία εκκίνησης και τερματισμού σε μέρη που πληρούν όλες τις απαιτήσεις, όπως περιθώρια ασφαλείας, επαρκή χώρο για λειτουργία, δυνατότητα λήψης και απόθεσης καθώς επίσης και προσβασιμότητα (Barrientos *et al.*, 2011).

Ακολουθώντας οι Moon & Shim (2009), παρουσίασαν μία μελέτη δύο αλγορίθμων για την κάλυψη περιοχής διευθύνσεων με ΜηΕΑ για σκοπούς ελέγχου καλλιέργειών. Ο πρώτος αλγόριθμος χαρακτηρίζεται ως αλγόριθμος που βασίζεται σε σημείο πλέγματος και ο δεύτερος ως τροποποιημένος αλγόριθμος Boustrophedon. Οι προσεγγίσεις που προτείνονται από τους συγγραφείς είναι αφιερωμένες κυρίως στην α-

ποσύνθεση της περιοχής και στη δειγματοληψία. Αν και η πρώτη προσέγγιση παρουσιάζει έναν απλό τρόπο δειγματοληψίας μίας περιοχής, ωστόσο η λύση που παρέχεται για τον υπολογισμό της τροχιάς κάλυψης δεν υπόκειται σε περιορισμούς. Επιπλέον, η τροχιά που επιτυγχάνεται αναπαράγεται ως μία σπείρα από έξω προς τα μέσα, κάτι που μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα σε μεγάλες περιοχές εάν το ΜηΕΑ ξεμείνει από καύσιμο. Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται σε μία πολύ γνωστή μέθοδο ακριβούς κυτταρικής σύνθεσης που χρησιμοποιεί απλές κινήσεις μπρος-πίσω για να καλύψει τις αποσυντιθέμενες υποπεριοχές. Σε κάθε περίπτωση, τα παρεχόμενα αποτελέσματα αναφέρονται μόνο σε προσομοιώσεις (Barrientos *et al.*, 2011).

Τέλος, οι Jiao, Wang, Chen και Li (2010) ανέφεραν επίσης εναέρια ΣΚΔ. Ειδικότερα, πρότειναν μία ακριβή μέθοδο αποσύνθεσης κυττάρου για τη διάσπαση μίας πολυγωνικής περιοχής σε υποπεριοχές χρησιμοποιώντας έναν άπληστο (greedy) αλγόριθμο. Αυτή η εργασία δεν εξέταζε τα εμπόδια ενώ είχε ως υπόθεση ότι το εναέριο όχημα ίπταται ακριβώς πάνω από μία κυρτή περιοχή πολυγώνου. Επιπλέον, δεν είναι σαφές ποιος τύπος εναέριου οχήματος προορίζονταν να χρησιμοποιηθεί σε αυτήν την προσέγγιση. Η προτεινόμενη μέθοδος δοκιμάστηκε μόνο με προσομοίωση (Barrientos *et al.*, 2011).

### 3.1.2. Ανάλυση-Ορισμός

Γνωρίζουμε ότι το συντομότερο μονοπάτι είναι η γραμμή που συνδέεται από το σημείο εκκίνησης στο σημείο στόχου (γραμμή S-G) εάν δεν διασχίζει κανένα εμπόδιο. Εάν η γραμμή διασχίζει εμπόδια, η συντομότερη διαδρομή θα είναι η διαδρομή κατά μήκος της εφαπτομένης μεταξύ των εμποδίων. Με άλλα λόγια, ιδανικά μόνο τα εμπόδια που διασχίζει η γραμμή S-G πρέπει να ληφθούν υπόψη. Ωστόσο, αυτή η άποψη είναι αρκετά μη ικανοποιητική διότι όταν τυχόν εμπόδια που δεν βρίσκονται στη γραμμή S-G μπουν σε εφαπτομένη, η ιδέα δεν λειτουργεί. Για την επίλυση αυτής της δυσκολίας, η συντομότερη διαδρομή θα αποτελείται από τις πιο μακριές γραμμές που συνδέονται με τις κορυφές αυτών των εμποδίων (Huang & Chung, 2004).

Ακολούθως, η εξωτερική διαδρομή είναι η διαδρομή που βρίσκεται εκτός της ενεργού περιοχής ενώ αντίθετα η εσωτερική διαδρομή σημαίνει ότι η διαδρομή βρίσκεται εντός περιοχής. Εάν βεβαιωθούμε ότι όλες οι εξωτερικές διαδρομές είναι μεγαλύτερες από τις εσωτερικές διαδρομές, η συντομότερη διαδρομή πρέπει να βρίσκεται μέσα εντός της ενεργού περιοχής. Το εύρος της ενεργού περιοχής θα καθοριστεί αφού όλα τα εμπόδια υπακούσουν στον κανόνα. Από την άλλη πλευρά, η ενεργή περιοχή πρέπει να επεκταθεί εάν οποιαδήποτε εξωτερική διαδρομή είναι μικρότερη από την εσωτερική (Huang & Chung, 2004).

Η εύρεση της εξωτερικής διαδρομής είναι κοστοβόρα χρονικά ενώ η εσωτερική διαδρομή των εμποδίων έδειχνε τα σημεία αναφοράς διαφορετικά κάθε φορά. Το σημείο αναφοράς σημαίνει το διαχωρι-

σμένο σημείο μεταξύ της εξωτερικής και της εσωτερικής διαδρομής. Στην πραγματικότητα, θα ήταν πολύ περίπλοκο να αναζητείται κάθε σημείο αναφοράς, ειδικά αν δεν υπολογίζουμε τη θέση του. Για να απλοποιήσουμε και να επιταχύνουμε τη διαδικασία, εξετάζουμε μόνο ορισμένες απαραίτητες προϋποθέσεις. Εάν η εξωτερική διαδρομή είναι μικρότερη, τότε θα ληφθεί υπόψη η συντομότερη εξωτερική διαδρομή. Αντίθετα, εάν η εσωτερική διαδρομή είναι μεγαλύτερη, τότε θα παρουσιαστεί η μεγαλύτερη εσωτερική διαδρομή. Μπορεί να συνεπάγεται ότι το συντομότερο μονοπάτι βρίσκεται εντός ενεργούς περιοχής, εάν το πιο έντονο εξωτερικό μονοπάτι εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερο από το μεγαλύτερο εσωτερικό (Huang & Chung, 2004).

Όπως προαναφέρθηκε λοιπόν, είναι πολύ χρήσιμο να βρεθεί η συντομότερη διαδρομή χωρίς να ληφθούν υπόψη όλες οι κυρτές κορυφές. Αυτές που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι εκείνες που βρίσκονται μέσα στην ενεργό περιοχή, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του τοπικού οδικού χάρτη. Με άλλα λόγια, η αποτελεσματικότητα αυξάνεται πάρα πολύ, ειδικά στο περιβάλλον που έχει πολλά εμπόδια και προεξοχές (Huang & Chung, 2004).

### 3.2. Πρόβλημα Πλανόδιου Πωλητή (ΠΠΠ)

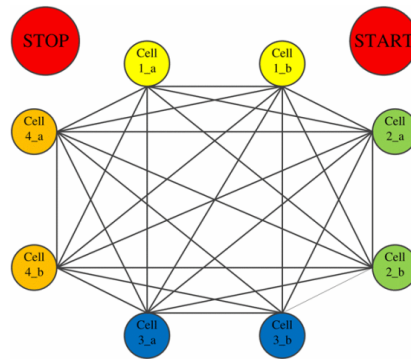
Θεωρητικά είναι δυνατό να βρεθεί η συντομότερη απόσταση διαδρομής για όλα τα σημεία μίας διαδρομής. Για να γίνει αυτό, πρώτα πρέπει να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ κάθε δύο σημείων, όπου στη διαδρομή μεταξύ των δύο αυτών σημείων θα πρέπει να αποφευχθούν τα εμπόδια. Πολλές μέθοδοι μπορούν να το επιτύχουν, όπως ο Πιθανοτικός Σχεδιαστής Οδικού Χάρτη (ΠΣΟΧ) ή η Γρήγορη Εξερεύνηση Τυχαίου Δέντρου (ΓΕΤΔ). Για παράδειγμα, εάν υπάρχουν  $n$  σημεία διαδρομής, ο αριθμός των μονοπατιών που πρέπει να βρεθούν είναι  $n(n-1)^2$ . Μετά από αυτό μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ΠΠΠ για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής μεταξύ  $n$  σημείων διαδρομής. Ωστόσο, ο χρόνος υπολογισμού μπορεί να είναι σημαντικός (Pham, Bestaoui & Mammam, 2017).

Αρχικά, αντί να εφαρμόσουμε το ΠΠΠ για όλα τα σημεία διαδρομής, θα πρέπει πρώτα να χωρίσουμε ολόκληρη την περιοχή σε κελιά χωρίς εμπόδια, με το κάθε κελί να μπορεί να καλυφθεί με απλή κίνηση εμπρός-πίσω από το ΜηΕΑ. Στη συνέχεια, το ΠΠΠ εφαρμόζεται μόνο για την εύρεση του συντομότερου μήκους διαδρομής για τη μετακίνηση μεταξύ κελιών (Pham, Bestaoui & Mammam, 2017).

Ακολούθως, η περιοχή εργασίας χωρίζεται σε κελιά χωρίς εμπόδια και το ΜηΕΑ μπορεί να κάνει την κίνηση μπρος-πίσω για να καλύψει τα κελιά. Συνεπώς, για κάθε κυψέλη θα υπάρχουν δύο σημεία: το αρχικό και το τελικό σημείο για την κάλυψη από ένα ΜηΕΑ (Pham, Bestaoui & Mammam, 2017).

Σε αυτό το σημείο, κάθε κελί θα σχηματίσει δύο κόμβους του ΠΠΠ. Κατά συνέπεια, εάν το ΜηΕΑ βρίσκεται στον κόμβο  $cell1_a$ , πρέπει να περάσει από τον κόμβο  $cell1_b$  και το αντίστροφο.

Εν συνεχεία, το ΜηΕΑ ξεκινά από την αρχική θέση (START), σαρώνει ολόκληρη την περιοχή και πηγαίνει πίσω στην τελική θέση (STOP) για φόρτιση της μπαταρίας όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 3.1) (Pham, Bestaoui & Mammar, 2017).



**Εικόνα 3.1.** ΠΠΠ με πρόσθετους περιορισμούς για αυτό το πρόβλημα (Pham, Bestaoui & Mammar, 2017).

Για να διασφαλιστεί ότι θα υπάρχει πάντα μία λύση για αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης, ο αρχικός πληθυσμός για τον ΓΑ έχει τη μορφή όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 3.2). Οι λειτουργίες flip, slide και swap εκτελούνται πάντα σε κάθε ζεύγος κόμβων  $x_a$  και  $x_b$  όπου  $x \in [1, n]$ . Σε κάθε επανάληψη, η τυχαία θέση εναλλαγής των κελιών  $x_a$  και  $x_b$  επεξεργάζεται επίσης (Pham, Bestaoui & Mammar, 2017).



**Εικόνα 3.2.** ΓΑ που χρησιμοποιεί αυτή την προσέγγιση (Pham, Bestaoui & Mammar, 2017).

Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης προτεινόμενων λειτουργιών flip, slide και swap, είναι η αναζήτηση για ταχύτερη βέλτιστη διαδρομή, επειδή αυτή η αναζήτηση εκτελείται μόνο στο σύνολο των διαδρομών που ικανοποιούν το δεδομένο αίτημα. Επιπρόσθετα, η λύση βρίσκεται πάντα παρόλο που ο αριθμός των κυττάρων είναι τεράστιος (Pham, Bestaoui & Mammam, 2017).

Εάν δεν εφαρμοστούν οι προτεινόμενες λειτουργίες αναστροφής, διαφάνειας, εναλλαγής, η βέλτιστη διαδρομή μπορεί να βρεθεί μόνο όταν ο  $\text{number\_of\_cell} \leq 16$  και ο χρόνος προσομοίωσης είναι πάντα μεγαλύτερος από 2000 δευτερόλεπτα (Pham, Bestaoui & Mammam, 2017).

### 3.3. Αλγόριθμοι Σχεδιασμού διαδρομής

#### 3.3.1. Εισαγωγή-Βιβλιογραφικές αναφορές

Αυτή η ενότητα ασχολείται με την παρουσίαση αλγορίθμων σχεδιασμού διαδρομής ΜηΕΑ πολλαπλών ροτόρων στο πλαίσιο της ΓΑ. Η ταξινόμηση χωρίζεται σε τρία μέρη: τους αλγόριθμους που βασίζονται σε πλέγμα, τους αλγόριθμους που βασίζονται σε τεχνικές δειγματοληψίας και τέλος οι αλγόριθμοι που βασίζονται σε ΓΟ (Basiri *et al.*, 2022).

Υπάρχουν πολυάριθμες μελέτες σχετικά με τα προβλήματα σχεδιασμού διαδρομής ΜηΕΑ πολλαπλών ροτόρων, όπως η εύρεση της συντομότερης διαδρομής, η δρομολόγηση με το χαμηλότερο κόστος και η διατήρηση μίας επίμονης ασφαλούς διαδρομής (Korkmaz & Durdu, 2018, Babel, 2019, Basiri *et al.*, 2022).

Τα ανοιχτά προβλήματα σχετικά με τη χρονική απόδοση και τον υπολογιστικό φόρτο έχουν απαιτήσει από τους ερευνητές να δημιουργήσουν μεθόδους και προσεγγίσεις που να περιλαμβάνουν τεχνικές που βασίζονται στην Τεχνητή Νοημοσύνη (ΤΝ), συνεργατικές και μη συνεργατικές τεχνικές, τεχνικές που βασίζονται σε δίκτυο και τεχνικές βάσει δειγματοληψίας. Αυτή η ενότητα στοχεύει στη συλλογή των πιο χρησιμοποιούμενων, περιγράφοντας τις βάσεις της λειτουργίας τους και μερικές συγκρίσεις των πιο σημαντικών πτυχών (Basiri *et al.*, 2022).

Οι κλασικές μέθοδοι, όπως οι μέθοδοι γραμμικού ή μη γραμμικού προγραμματισμού, δεν είναι κατάλληλες για αντικείμενα μεγάλης κλίμακας και σύνθετες αντικειμενικές συναρτήσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται μέθοδοι ΤΝ (Μηχανική μάθηση, Ασαφής λογική, Βελτιστοποίηση σμηνών, Υβριδικές μέθοδοι και Εξελικτικός προγραμματισμός). Η βιβλιογραφία αναφέρει τους ΓΑ, Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (ΒΣΣ), Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών (BAM), Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (ΤΝΔ), Μεθόδους Βασισμένες στη Μάθηση κ.λπ. Από αυτές που αναφέρονται, ο ΓΑ αντιπροσωπεύει το 21% των



δημοσιεύσεων και είναι ένας από τους πιο δημοφιλείς αλγόριθμους σχεδιασμού πτήσεων (Mukhamediev *et al.*, 2023).

Υπάρχουν διάφορες ταξινομήσεις των αλγορίθμων που μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία ανάλογα με το εάν το όριο της περιοχής που πρέπει να διασχιστεί είναι εκ των προτέρων χαρτογραφημένο ή όχι. Έτσι οι αλγόριθμοι (Oksanen, 2007, Höffmann, Patel & Büskens, 2023):

1. Μπορούν να αναγνωριστούν ως εκτός σύνδεσης ή σε απευθείας σύνδεση, αντίστοιχα, με την τελευταία προσέγγιση να ονομάζεται επίσης κάλυψη βασισμένη σε αισθητήρες καθώς βασίζεται σε αισθητήρα πραγματικού χρόνου δεδομένων από το ρομπότ, για την εξαγωγή πληροφοριών για το περιβάλλον.
2. Επιπλέον, ανάλογα με τη διάσταση του χώρου που θα καλυφθεί, οι προσεγγίσεις μπορούν να ταξινομηθούν σε 2D, όταν η κίνηση του ρομπότ περιορίζεται σε επίπεδο, ή σε τρισδιάστατες 3D, με αλγόριθμους κάλυψης 3D να βρίσκουν συνάφεια σε επιχειρήσεις με ΜηΕΑ ή ΑΥΟ, κ.λπ. (Bircher *et al.*, 2016).
3. Τέλος, σε αντίθεση με τους κλασσικούς αλγόριθμους κάλυψης ενός ρομπότ, πρόσφατα έχει δοθεί μεγάλη προσοχή στις λύσεις ΣΚΔ πολλαπλών ρομπότ, χρήσιμες σε περίπτωση ευρύτερης κάλυψης περιοχής για τη βελτιστοποίηση του χρόνου λειτουργίας και την αύξηση της ευρωστίας (Fevgas *et al.*, 2022).

Με την πάροδο των ετών, έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθούν αρκετοί αλγόριθμοι για την αντιμετώπιση ορισμένων πτυχών αυτών των προκλήσεων, ειδικά στο πλαίσιο της ΓΑΚΡ (Basiri *et al.*, 2022).

Οι Li *et al.* (2016) εφάρμοσαν έναν ΑΒΣ για τη βελτιστοποίηση του χρόνου πτήσης λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του αεροσκάφους σε 3D χώρους, ειδικά σε αγροτικά περιβάλλοντα, ενώ οι Dewang *et al.* (2018) χρησιμοποίησαν έναν ΓΑ για να λύσει το σχεδιασμό διαδρομής για την ελαχιστοποίηση του χρόνου υπολογισμού. Ομοίως, οι Pham *et al.* (2017) χρησιμοποίησαν τον ΓΑ για την επίλυση προβλημάτων εύρεσης μονοπατιών για εναέρια ρομπότ σε σενάρια ΓΑΚΡ, ενώ έλαβε επίσης υπόψη την παρουσία εμποδίων. Οι Sunny *et al.* (2017) και Noguchi *et al.* (1998) προσπάθησαν να ελέγξουν ένα ΤΝΔ εκπαιδευμένο να πλοηγείται σε ημιδομημένα αγροτικά περιβάλλοντα, με στατικά εμπόδια σε έναν 3D χώρο. Αυτό απαιτεί δεδομένα εισαγωγής εκπαίδευσης, τα οποία ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμα σε νέο περιβάλλον. Οι Hao & Yan (2018) χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο Ντάμπινς και τον αλγόριθμο Γρήγορη Εξερεύνηση Τυχαίου Δέντρου Άστρο (ΓΕΤΔ★) σε ένα αγροτικό περιβάλλον με πυκνά εμπόδια για να βρουν την ασφαλή διαδρομή για τα ΜηΕΑ και επίσης έδωσαν προτεραιότητα στην αποφυγή εμποδίων έναντι άλλων παραμέτρων, όπως η απόδοση. Ακολούθως ο Sinha (2017) σχεδίασε έναν αλγόριθμο σχεδιασμού διαδρομής για ένα αυτόνομο ΜηΕΑ πολλαπλών ροτόρων που θα περιηγηθεί και θα καλύψει πολλαπλές γεωργικές περιοχές στο συντομότερο δυνατό χρόνο με βάση τον αλγόριθμο του Ντάινιστρα σε 2D περιβάλλοντα. Επιπλέον, οι



Wang *et al.* (2019) και Bakhtiari *et al.* (2012) χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο BAM για την αποφυγή εμποδίων και την παραγωγή βέλτιστων μονοπατιών για την κάλυψη γεωργικής γης. Εν συνεχεία οι Nolan *et al.* (2017) χρησιμοποίησαν ένα ΔΒ σε 2D χώρους για εύρεση μονοπατιών σε κάλυψη γεωργικής έκτασης. Ωστόσο, οι συγγραφείς δεν προσπάθησαν να βρουν τον συντομότερο δρόμο (Basiri *et al.*, 2022).

Γενικά, για να αναπαρασταθεί το πρόβλημα της συντομότερης διαδρομής χρησιμοποιούνται γράφοι, ενώ για την επίλυσή του υπάρχουν διάφοροι τύποι αλγορίθμων. Ωστόσο, αυτοί που θα αναλυθούν παρακάτω είναι αυτοί που πρόκειται να συζητηθούν σε αυτή τη μεταπτυχιακή διατριβή και είναι οι εξής:

1. Ο αλγόριθμος του Ντάικστρα
2. Αλγόριθμος Floyd-Warshall
3. ΓΑ (Magzhan & Jani, 2013).

### 3.3.2. Αλγόριθμος Ντάικστρα

Ο αλγόριθμος του Ντάικστρα χρησιμοποιείται σε κατευθυνόμενα γραφήματα με μη αρνητικά βάρη, προσδιορίζοντας δύο τύπους κορυφών: (1) Λυμένες και (2) Μη λυμένες κορυφές (Madkour *et al.*, 2017).

Ακολουθεί μία διαδοχική διαδικασία προσέγγισης που βασίζεται στην αρχή της βελτιστότητας του Bellman Ford. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος του Ντάικστρα μπορεί να λύσει την εξίσωση δυναμικού προγραμματισμού μέσω μίας μεθόδου που ονομάζεται Μέθοδος επίτευξης (Madkour *et al.*, 2017).

Αρχικά ορίζει την κορυφή πηγής ως λυμένη κορυφή και ελέγχει όλες τις άλλες ακμές (μέσω μη λυμένων κορυφών) που συνδέονται με την κορυφή πηγής για τις συντομότερες διαδρομές προς τον προορισμό. Μόλις ο αλγόριθμος εντοπίσει τη μικρότερη άκρη, προσθέτει την αντίστοιχη κορυφή στη λίστα των λυμένων κορυφών. Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται μέχρι να λυθούν όλες οι κορυφές (Madkour *et al.*, 2017).

Πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι ότι δεν χρειάζεται να διερευνηθεί όλες τις ακμές. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν τα βάρη σε ορισμένες από τις άκρες είναι ακριβά. Το μειονέκτημα από την άλλη είναι ότι ο αλγόριθμος ασχολείται μόνο με μη αρνητικές σταθμισμένες ακμές αλλά και το γεγονός ότι ισχύει μόνο για στατικά γραφήματα (Madkour *et al.*, 2017).

### 3.3.3. Αλγόριθμος Floyd-Warshall

Ο αλγόριθμος Floyd-Warshall προσπαθεί να βρει όλα τα ζεύγη συντομότερων μονοπατιών σε ένα σταθμισμένο γράφημα που περιέχει τόσο θετικές όσο και αρνητικές σταθμισμένες ακμές, ενώ μπορεί να ανιχνεύσει και την ύπαρξη κύκλων αρνητικού βάρους, αν και δεν τους επιλύει (Madkour *et al.*, 2017).

Ο αλγόριθμος αυτός δεν μπορεί να βρει τις ακριβείς συντομότερες διαδρομές μεταξύ των ζευγών κορυφών επειδή δεν αποθηκεύει τις ενδιάμεσες κορυφές κατά τον υπολογισμό. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας μία απλή ενημέρωση, μπορεί κανείς να αποθηκεύσει αυτές τις πληροφορίες στα βήματα του αλγορίθμου (Madkour *et al.*, 2017).

Έστω ότι έχουμε τον γράφο  $G$ , όπου οι κορυφές του αριθμήθηκαν από το 1 έως το  $n$ . Ο συμβολισμός  $d_{ijk}$  σημαίνει το συντομότερο μονοπάτι από το  $i$  στο  $j$ , το οποίο επίσης διέρχεται από την κορυφή  $k$  (Magzhan & Jani, 2013).

Σε περίπτωση που υπάρξει ακμή μεταξύ των κορυφών  $i$  και  $j$  θα είναι ίση με  $d_{ij0}$ , διαφορετικά μπορεί να εκχωρηθεί ως άπειρο. Ωστόσο, για άλλες τιμές του  $d_{ijk}$  μπορούν να υπάρχουν δύο επιλογές (Magzhan & Jani, 2013):

A) Εάν η συντομότερη διαδρομή από το  $i$  στο  $j$  δεν διέρχεται από την κορυφή  $k$ , τότε η τιμή του  $d_{ijk}$  θα είναι ίση με  $d_{ijk1}$ .

B) Εάν το συντομότερο μονοπάτι από το  $i$  στο  $j$  διέρχεται από την κορυφή  $k$ , τότε πρώτα πηγαίνει από το  $i$  στο  $k$  και μετά πηγαίνει από το  $k$  στο  $j$ , με το  $d_{ijk}$  να είναι ίσο με  $d_{ikk-1} + d_{kjk-1}$ .

Και για να προσδιορίσουμε τη συντομότερη διαδρομή, πρέπει απλώς να βρούμε το ελάχιστο από αυτές τις δύο δηλώσεις (Εξ. 5, Εξ. 6) (Magzhan & Jani, 2013):

$$d_{ij0} = \text{the length of edge between vertices } i \text{ and } j \quad (5)$$

$$d_{ijk} = \min (d_{ijk-1}, d_{ikk-1} + d_{kjk-1}) \quad (6)$$

Το πλεονέκτημά του είναι ότι μπορεί να χειριστεί ακμές αρνητικού βάρους και μπορεί να ανιχνεύσει κύκλους αρνητικού βάρους. Από την άλλη, το κυριότερο μειονέκτημά του είναι ότι η πολυπλοκότητα χρονισμού για την εκτέλεση του αλγορίθμου Ντάικστρα σε όλες τις κορυφές (για τη μετατροπή του από SSSP σε APSP) θα είναι  $O(mn + n \log n)$ .

### 3.3.4. Γενετικός Αλγόριθμος (ΓΑ)

Ο Γενετικός Αλγόριθμος (ΓΑ) χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των καλύτερων δυνατών λύσεων για την αναζήτηση και τη βελτιστοποίηση προβλημάτων που σχετίζονται με βιοεμπνευσμένους τελεστές, όπως η Διασταύρωση, η Μετάλλαξη και η Επιλογή (Hayat *et al.*, 2017, Basiri *et al.*, 2022).

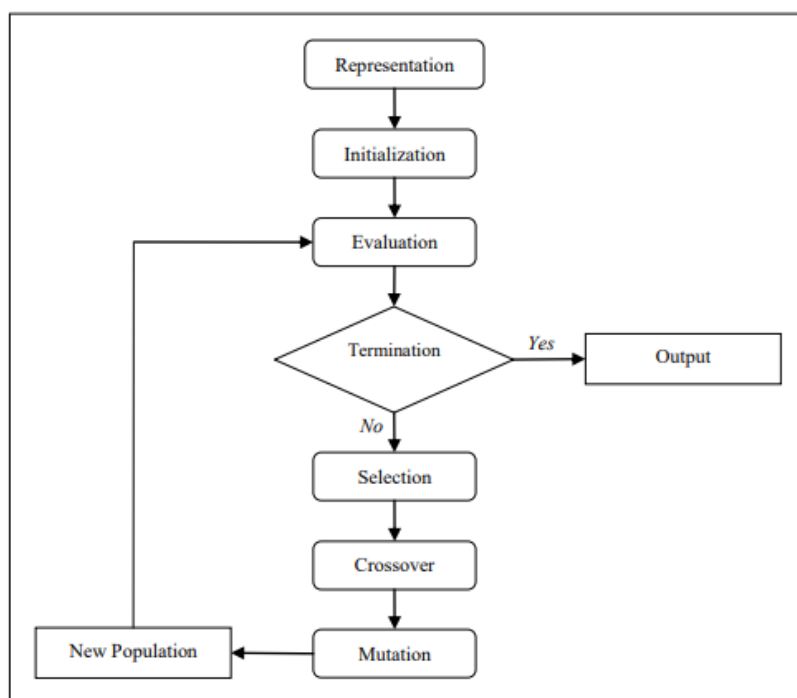
Επιπλέον μιμείται τη δαρβινική αρχή της φυσικής επιλογής, υποδηλώνοντας την παρουσία ορισμένων υποψήφιων λύσεων, που συνήθως ονομάζονται άτομα, οργανισμοί, πλάσματα κ.λπ. Κατά την εκτέλεσή του, το μέγεθος του πληθυσμού των ατόμων δεν αλλάζει και οι κακές λύσεις (άτομα) αντικαθίστανται από καλύτερες χρησιμοποιώντας στοχαστική επιλογή με βάση τη συνάρτηση φυσικής κατάστασης (Whitley,

1994, Mirjalili & Mirjalili, 2019, Mukhamediev *et al.*, 2023). Πιο αναλυτικά, μοντελοποιεί τη διαδικασία της εξέλιξης. Κάθε άτομο (υποψήφια λύση) περιγράφεται από ένα σύνολο ιδιοτήτων. Ο ΓΑ σχηματίζει επαναληπτικά νέους πληθυσμούς ατόμων (γενιές) χρησιμοποιώντας τον τυχαία δημιουργημένο αρχικό πληθυσμό. Σε κάθε γενιά, η προσαρμοστικότητα κάθε ατόμου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη λειτουργία φυσικής κατάστασης.

Η συνάρτηση καταλληλότητας είναι η αντικειμενική συνάρτηση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης σχεδιασμού διαδρομής. Τα πιο κατάλληλα άτομα (λύσεις) επιλέγονται στοχαστικά. Οι ιδιότητες των επιλεγμένων ατόμων ανασυνδυάζονται και/ή μεταλλάσσονται τυχαία. Στη συνέχεια, η νέα γενιά ατόμων χρησιμοποιείται στην επόμενη επανάληψη του αλγορίθμου. Μετά από έναν ορισμένο αριθμό επαναλήψεων, σχηματίζεται μία γενιά που έχει τις καλύτερες τιμές φυσικής κατάστασης (Mukhamediev *et al.*, 2023).

#### 3.3.4.1. Ανάλυση ΓΑ

Τα βήματα ενός ΓΑ φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικ. 3.3) (Entezari-Maleki & Movaghar, 2011).



Εικόνα 3.3. Βήματα ΓΑ (Entezari-Maleki & Movaghar, 2011).

Ένας απλός ΓΑ μπορεί να οριστεί στα ακόλουθα βήματα (Hussain *et al.*, 2017):

**Βήμα 1:** Δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού χρωμοσωμάτων P.

**Βήμα 2:** Αξιολόγηση της καταλληλότητας κάθε χρωμοσώματος.

**Βήμα 3:** Επιλογή P/2 γονείς από τον τρέχοντα πληθυσμό μέσω Αναλογικής Επιλογής.

**Βήμα 4:** Επιλογή τυχαία δύο γονέων για την δημιουργία απογόνων χρησιμοποιώντας τον τελεστή Διασταύρωσης.

**Βήμα 5:** Εφαρμογή τελεστών Μετάλλαξης για μικρές αλλαγές στα αποτελέσματα.

**Βήμα 6:** Επανάληψη των Βημάτων 4 και 5 μέχρι να επιλεγούν και να ζευγαρώσουν όλοι οι γονείς.

**Βήμα 7:** Αντικατάσταση του παλιού πληθυσμού χρωμοσωμάτων με νέο.

**Βήμα 8:** Αξιολόγηση της καταλληλότητας κάθε χρωμοσώματος στον νέο πληθυσμό.

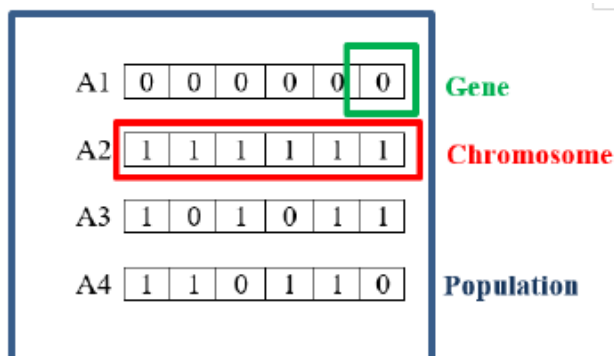
**Βήμα 9:** Τερματισμός εάν ο αριθμός των γενεών πληροί κάποιο ανώτερο όριο. Διαφορετικά, μετάβαση στο Βήμα 3.

Τα κριτήρια Επιλογή, Διασταύρωση και Μετάλλαξη είναι σημαντικοί τελεστές, αλλά η Διασταύρωση παίζει ζωτικό ρόλο στους ΓΑ. Πολλοί τελεστές Διασταύρωσης έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία και όλοι έχουν τη σπουδαιότητά τους (Hussain *et al.*, 2017).

Οι πιο συνηθισμένες συνθήκες τερματισμού της παραπάνω διαδικασίας είναι η εύρεση μίας τέλειας λύσης με βάση τη συνάρτηση καταλληλότητας ή η σύγκλιση όλων των λύσεων σε μία.

Τα βασικά βήματα ενός ΓΑ είναι τα εξής:

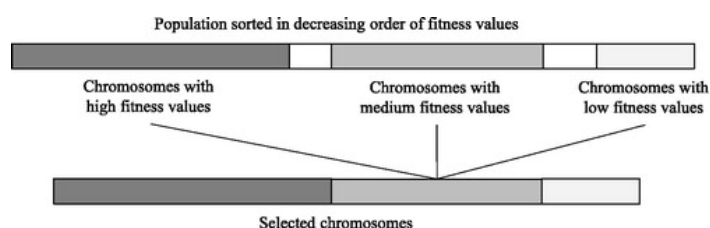
1. **Αρχικοποίηση Πληθυσμού:** Δημιουργείται ένας αρχικός πληθυσμός από τυχαία επιλεγμένα άτομα (λύσεις) (Εικ. 3.4). Κάθε άτομο αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση στο πρόβλημα και κωδικοποιείται συνήθως ως μία σειρά (χρωμόσωμα) (Kaabi & Harrath, 2019).



Εικόνα 3.4. Παράδειγμα αρχικοποίησης πληθυσμού (Isa *et al.*, 2024).

2. **Αξιολόγηση Καταλληλότητας:** Κάθε άτομο του πληθυσμού αξιολογείται με βάση μία συνάρτηση καταλληλότητας, η οποία μετράει πόσο καλή είναι η λύση που αντιπροσωπεύει το άτομο για το πρόβλημα που εξετάζεται (Shorova & Vaklieva-Bancheva, 2006). Όσο υψηλότερη η καταλληλότητα, τόσο καλύτερη είναι η λύση. Η συνάρτηση αυτή συνήθως προέρχεται απευθείας από το πρόβλημα (Bryant, 2000).

3. **Επιλογή:** Αποτελεί τον πρώτο γενετικό τελεστή που λαμβάνει χώρα σε έναν ΓΑ (Shorova & Vaklieva-Bancheva, 2006). Από τον τρέχοντα πληθυσμό επιλέγονται άτομα για αναπαραγωγή με βάση την καταλληλότητά τους. Συνήθως, οι λύσεις με υψηλότερη καταλληλότητα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγούν, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κάποιο τυχαίο στοιχείο για να διατηρηθεί η ποικιλότητα του πληθυσμού. Ειδικότερα, η επιλογή των χρωμοσωμάτων για τη φάση αναπαραγωγής γίνεται ως εξής: το 50% του πληθυσμού επιλέγεται αντιπροσωπεύοντας τα πιο κατάλληλα χρωμοσώματα, ένα 20% των χρωμοσωμάτων με μέτριες τιμές καταλληλότητας και το τελευταίο 10% των χρωμοσωμάτων με χαμηλές τιμές καταλληλότητας. Αυτή η διαδικασία απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 3.5) (Kaabi & Harrath, 2019).



Εικόνα 3.5. Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας που εκτελεί ο γενετικός τελεστής Επιλογή (Kaabi & Harrath, 2019).

4. **Διασταύρωση:** Αποτελεί τον δεύτερο γενετικό τελεστή και συνάμα το πιο σημαντικό στοιχείο ενός ΓΑ. Τα επιλεγμένα άτομα (γονείς) διασταυρώνονται για να δημιουργήσουν νέους απογόνους. Η διαδικασία αυτή αναμιγνύει τη γενετική πληροφορία των γονέων, με στόχο να παράγει απογόνους που συνδυάζουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά των γονέων και συνεχίζεται έως ότου γεμίσει η νέα γενιά (Bryant, 2000, Shorova & Vaklieva-Bancheva, 2006, Kaabi & Harrath, 2019).
5. **Μετάλλαξη:** Είναι ο τρίτος εξελικτικός τελεστής σε έναν ΓΑ. Εφαρμόζονται τυχαίες αλλαγές στα χρωμοσώματα των απογόνων, προκειμένου να διατηρηθεί η γενετική ποικιλότητα του πληθυσμού και να αποφευχθεί η σύγκλιση σε τοπικά βέλτιστα. Η Μετάλλαξη αλλάζει έναν ή περισσότερους γονιδιακούς χαρακτήρες σε ένα χρωμόσωμα (Shorova & Vaklieva-Bancheva, 2006, Kaabi & Harrath, 2019).
6. **Ενημέρωση Πληθυσμού:** Οι νέοι απόγονοι προστίθενται στον πληθυσμό και συνήθως αντικαθιστούν μερικούς ή όλους τους παλιούς. Ο πληθυσμός ανανεώνεται και ο κύκλος ξεκινά πάλι από το βήμα της αξιολόγησης καταλληλότητας. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για έναν ορισμένο αριθμό γενεών ή μέχρι να επιτευχθεί μία ικανοποιητική λύση (Kaabi & Harrath, 2019).
7. **Τερματισμός:** Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν επιτευχθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού, όπως η εύρεση μίας λύσης που ικανοποιεί τις απαιτήσεις ή η επίτευξη ενός συγκεκριμένου αριθμού γενεών. Η καλύτερη λύση του τελευταίου πληθυσμού επιστρέφεται ως το αποτέλεσμα του αλγορίθμου.

### 3.3.4.2. ΓΑ-Τελεστές

Οι τελεστές που χρησιμοποιούνται γενικά σε έναν ΓΑ φαίνονται στον Πίνακα 1 (Πίν. 3.1).

**Πίνακας 3.1.** Τελεστές που χρησιμοποιούνται σε έναν ΓΑ (Isa *et al.*, 2024).

Τύπος χειριστή	Παράδειγμα
(i) Κωδικοποίηση	Δυαδική Κωδικοποίηση, Οκταδική Κωδικοποίηση, Δεκαεξαδική Κωδικοποίηση, Κωδικοποίηση Μετάθεσης, Κωδικοποίηση Τιμής και Κωδικοποίηση Δέντρου.
(ii) Επιλογή	Επιλογή Τροχού Ρουλέτας, Επιλογή Κατάταξης, Επιλογή Τουρνουά, Επιλογή Boltzmann και Στοχαστική Καθολική Δειγματοληψία.
(iii) Διασταύρωση	Διασταύρωση Τις Σημείου, Διασταύρωση Κ- Σημείων, Ομοιόμορφη Διασταύρωση, Μερικώς Χαρτογραφημένη Διασταύρωση, Διασταύρωση Σειράς, Διασταύρωση Διατήρησης Προτεραιότητας, Διασταύρωση Μετάθεσης, Διασταύρωση Μειωμένης Υποκατάστασης και Κυκλική Διασταύρωση.
(iv) Μετάλλαξη	Μετάλλαξη με Μετατόπιση, Μετάλλαξη Αναστροφής, Μετάλλαξη Scramble, Μετάλλαξη Αντιστροφής bit και Μετάλλαξη με Αντιστροφή.

Οι τελεστές του ΓΑ αναλύονται τις επόμενες υποενότητες.

#### 3.3.4.2.1 Κωδικοποίηση

Το σχήμα της κωδικοποίησης παίζει σημαντικό ρόλο στη μετατροπή των λαμβανόμενων πληροφοριών σε μία συγκεκριμένη μορφή. Πιο αναλυτικά, ένα κοινό σχήμα κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται σε έναν ΓΑ είναι η Δυαδική Κωδικοποίηση στην οποία κάθε γονίδιο ή χρωμόσωμα αντιπροσωπεύεται ως συμβολοσειρά 1 ή 0 (Sivanandam *et al.*, 2008, Isa *et al.*, 2024). Ωστόσο, μπορεί να μην είναι κατάλληλο για ορισμένα προβλήματα μηχανικού σχεδιασμού λόγω επίστασης και φυσικής αναπαράστασης. Επιπλέον, οι Οκταδική Κωδικοποίηση, Δεκαεξαδική Κωδικοποίηση, Κωδικοποίηση Μετάθεσης, Κωδικοποίηση Τιμής και Κωδικοποίηση Δέντρου αποτελούν τις στοιχεία στο σχήμα κωδικοποίησης (Isa *et al.*, 2024).

Η σύγκριση των διαφορετικών σχημάτων κωδικοποίησης για έναν ΓΑ παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 2).

**Πίνακας 3.2.** Τύποι και παραδείγματα σχημάτων Κωδικοποίησης (Isa *et al.*, 2024).

Τύπος σχήματος Κωδικοποίησης	Παράδειγμα	
(i) Δυαδική Κωδικοποίηση: Χρησιμοποιείται μία δυαδική συμβολοσειρά για την αναπαράσταση κάθε χρωσώματος σε μορφή (0-1). Στη Δυαδική Κωδικοποίηση, υπάρχουν 4 τύποι διασταυρώσεων: Διασταύρωση Ενός Σημείου, Διασταύρωση Κ-Σημείων, Ομοιόμορφη Διασταύρωση και Αριθμητική Διασταύρωση.	Χρωμόσωμα1	110101110010
	Χρωμόσωμα2	110101110010
(ii) Οκταδική Κωδικοποίηση: Το χρωμόσωμα αναπαρίσταται χρησιμοποιώντας οκταδικούς ακέραιους αριθμούς (0-7).	Χρωμόσωμα1	06254524
	Χρωμόσωμα2	63726425
(iii) Δεκαεξαδική Κωδικοποίηση: Οι δεκαεξαδικοί αριθμοί αναπαριστούν το χρωμόσωμα στη μορφή (0-9, A-F).	Χρωμόσωμα1	97AE
	Χρωμόσωμα2	A2C6
(iv) Κωδικοποίηση Μετάθεσης: Κάθε χρωμόσωμα αντιπροσωπεύει μία θέση σε μία σειρά (π.χ. στο ΠΠΠ ή συμβολοσειρά των αριθμών αντιπροσωπεύει την ακολουθία των πόλεων που επισκέφτηκε ο πωλητής).	Χρωμόσωμα1	1 5 2 3 5 2 6 4 6 9 8
	Χρωμόσωμα2	8 6 3 6 3 9 6 3 1 5 8
(v) Κωδικοποίηση Τιμής: Ένα χρωμόσωμα αναπαρίσταται ως συμβολοσειρά χρησιμοποιώντας Κωδικοποίηση τιμής, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει ακέραιους, πραγματικούς αριθμούς, χαρακτήρες ή αντικείμενα. Ο τελεστής Διασταύρωσης για ακέραιες τιμές είναι ίδιος με τη Δυαδική Κωδικοποίηση, οι οποίες μπορεί να είναι οτιδήποτε σχετικό με το πρόβλημα, τους αριθμούς ή χαρακτήρες.	Χρωμόσωμα1	1.23, 2.12, 3.14, 0.34, 4.62
	Χρωμόσωμα2	ABDJEIFJDHDDLDFLFEGT
(vi) Κωδικοποίηση Δέντρου: Χρησιμοποιείται κυρίως στον γενετικό προγραμματισμό για την εξέλιξη προγραμμάτων ή εκφράσεων.	Χρωμόσωμα1	
	Χρωμόσωμα2	



Η δυαδική αναπαράσταση σε έναν ΓΑ είναι αποτελεσματική και απλή για διακριτά προβλήματα βελτιστοποίησης, παρουσιάζοντας ωστόσο περιορισμούς τόσο στην ακρίβεια, όσο και στην έκφραση και την εξερεύνηση.

Επιπλέον είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά του προβλήματος πριν από την επιλογή της αναπαράστασης καθώς μία υβριδική προσέγγιση μπορεί να είναι επωφέλης για να συνδυάσει τα δυνατά του σημεία (Isa *et al.*, 2024). Ο παρακάτω πίνακας (Πίν. 3) παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε σχήματος Κωδικοποίησης.

**Πίνακας 3.3.** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σχημάτων κωδικοποίησης τις ΓΑ (Isa *et al.*, 2024).

Σχήματα κωδικοποίησης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Δυαδική	Εύκολο στην εφαρμογή	Δεν υπάρχει υποστήριξη για τελεστή αναστροφής
Οκταδική	Εύκολο στην εφαρμογή	Δεν υπάρχει υποστήριξη για τελεστή αναστροφής
Δεκαεξαδική	Εύκολο στην εφαρμογή	Δεν υπάρχει υποστήριξη για τελεστή αναστροφής
Μετάθεση	Υποστηρίζει τελεστή αναστροφής	Δεν υπάρχει υποστήριξη για δυαδικό τελεστή
Τιμή	Δεν χρειάζεται μετατροπή τιμής	Απαιτεί συγκεκριμένη διασταύρωση και μετάλλαξη
Δέντρου	Οι χειριστές μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα	Δύσκολο να σχεδιαστεί δέντρο για ορισμένα προβλήματα

### 3.3.4.2.2 Επιλογή

Η επιλογή αποτελεί ένα σημαντικό βήμα σε έναν ΓΑ για να καθοριστεί εάν μία συγκεκριμένη συμβολοσειρά θα συμμετάσχει στην αναπαραγωγική διαδικασία ή όχι. Οι τελεστές αναπαραγωγής είναι τις γνωστοί ως βήματα επιλογής (Jebari & Madiafi, 2013, Isa *et al.*, 2024).

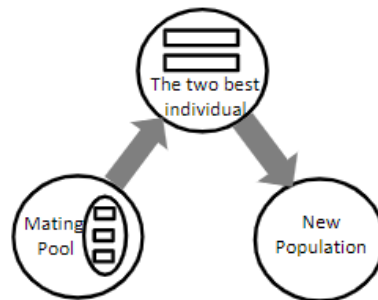
Η επιλογή είναι μία σημαντική πτυχή για τον προσδιορισμό του ρυθμού συγκέντρωσης τις ΓΑ. Η ικανότητα τις ΓΑ να κάνει προοδευτικά καλύτερα χρωμοσώματα καθορίζεται από την επιλογή του πληθυσμού. Η επιλεκτική έμφαση μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους: με την παραγωγή περισσότερων χρωμοσωμάτων στον πληθυσμό και στη συνέχεια επιλέγοντας μόνο τα καλύτερα χρωμοσώματα για την επόμενη γενιά ή επιλέγοντας μόνο τα καλύτερα χρωμοσώματα για την επόμενη γενιά, με την δεύτερη προσέγγιση να αποδίδει χρωμοσώματα υψηλότερης ποιότητας (Lee, 2018, Isa *et al.*, 2024).

Ακολουθώντας, το επόμενο βήμα στην επιλεκτική έμφαση είναι η επιλογή του καλύτερου γονέα για τα χρωμοσώματα. Αυτή η στρατηγική οδηγεί σε έναν πληθυσμό με περιορισμένο αριθμό χρωμοσωμάτων για τις μελλοντικές γενιές (Isa *et al.*, 2024).

Η Επιλογή Τροχού Ρουλέτας, η Επιλογή Κατάταξης, η Επιλογή Τουρνουά, η Επιλογή Boltzmann, η στοχαστική Καθολική Δειγματοληψία και ο Ελιτισμός αποτελούν τις κοινές στρατηγικές επιλογής χρωμο-



σωμάτων. Στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 3.6) παρουσιάζεται η βασική διαδικασία επιλογής σε έναν ΓΑ (Isa *et al.*, 2024).



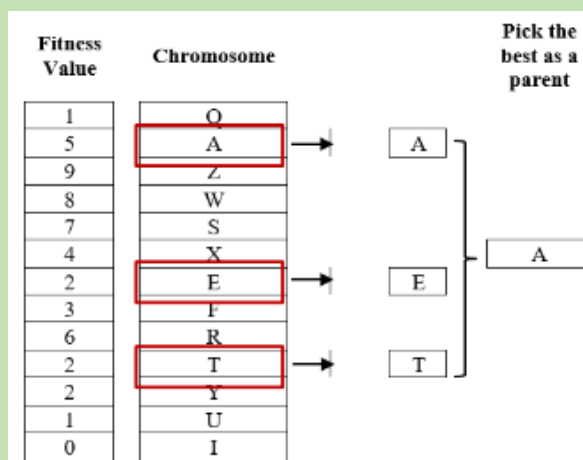
**Εικόνα 3.6.** Βασική διαδικασία επιλογής σε έναν ΓΑ (Isa *et al.*, 2024).

Ο πίνακας που ακολουθεί (Πίν. 3.4) δείχνει τις διάφορες καθιερωμένες προσεγγίσεις επιλογής, δηλαδή Τροχός Ρουλέτας, Κατάταξη, Τουρνουά, Boltzmann, Στοχαστική Καθολική Δειγματοληψία και Ελιτισμός.

**Πίνακας 3.4.** Τύπος και παράδειγμα της επιλογής (Isa *et al.*, 2024).

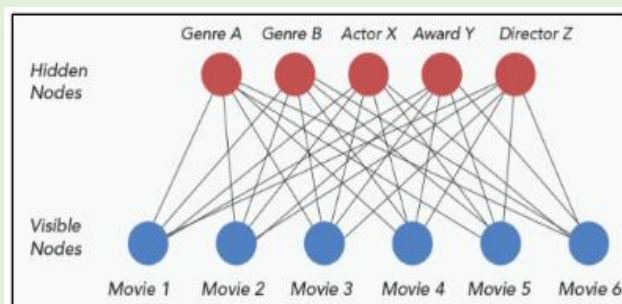
Τύπος επιλογής	Παράδειγμα														
<p><b>(i) Επιλογή Τροχού Ρουλέτας:</b> Σε κάθε άτομο εκχωρείται ένα κομμάτι του τροχού της ρουλέτας, το μέγεθος του οποίου είναι ακριβώς ανάλογο με το ατομικό επίπεδο φυσικής κατάστασης (Εικ. 3.7). Ως αποτέλεσμα, μία μεγάλη τιμή μεγέθους τμήματος θα οδηγήσει σε υψηλό επίπεδο της φυσικής κατάστασης. Αυτή η διαδικασία θα συνεχιστεί μέχρι να επιλεγεί ο επιθυμητός αριθμός ατόμων (Abdulal &amp; Ramachandram, 2011).</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Chromosome</th> <th>Fitness Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>8.2</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>3.2</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>1.4</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>1.2</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>4.2</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>0.3</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Εικόνα 3.7.</b> Επιλογή Τροχού Ρουλέτας.</p>	Chromosome	Fitness Value	A	8.2	B	3.2	C	1.4	D	1.2	E	4.2	F	0.3
Chromosome	Fitness Value														
A	8.2														
B	3.2														
C	1.4														
D	1.2														
E	4.2														
F	0.3														
<p><b>(ii) Επιλογή Κατάταξης:</b> Επιτρέπει σε κάθε χρωμόσωμα να αποκτήσει καταλληλότητα από τη θέση του και χρησιμοποιείται για την κατανομή της θέσης σε έναν πληθυσμό (Εικ. 3.8). Οι θέσεις κατατάσσονται από την καλύτερη προς τη χειρότερη, με το κάθε άτομο στον πληθυσμό να λαμβάνει μία αριθμητική κατάταξη με βάση την καταλληλότητά του, με την επιλογή να εξαρτάται από τη θέση του.</p>	<p><b>Εικόνα 3.8.</b> Επιλογή Κατάταξης.</p>														

(iii) **Επιλογή Τουρνουά:** Πολλά άτομα επιλέγονται τυχαία από τον πληθυσμό (Εικ. 3.9). Η καλύτερη φυσική κατάσταση στο τουρνουά καθορίζει τον νικητή, με την πίεση επιλογής να μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί καθώς αλλάζει το μέγεθος του διαγωνισμού. Σύμφωνα με τους Miller και Goldberg (Miller & Goldberg, 1995), η αυξημένη πίεση επιλογής μπορεί να επιτευχθεί αυξάνοντας απλώς το μέγεθος του διαγωνισμού, καθώς οι νικητές μεγαλύτερων τουρνουά θα είναι, κατά μέσο όρο, καλύτεροι από τους νικητές μικρότερων τουρνουά. Η επιλογή τουρνουά είναι επίσης εξαιρετικά δημοφιλής καθώς μπορεί να λειτουργήσει ακόμη και με αρνητικές τιμές φυσικής κατάστασης.



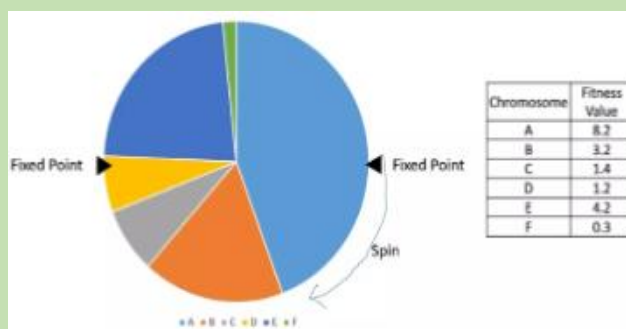
Εικόνα 3.9. Διαδικασία Επιλογής τουρνουά.

(iv) **Επιλογή Boltzmann:** Ο ρυθμός επιλογής ελέγχεται από τη συνεχώς μεταβαλλόμενη "θερμοκρασία" (Εικ. 3.10). Η θερμοκρασία αυξάνεται γρήγορα, υποδηλώνοντας χαμηλή πίεση επιλογής. Εν συνεχεία, η πίεση επιλογής θα αυξηθεί καθώς η θερμοκρασία πέφτει σταδιακά, επιτρέποντας στον ΓΑ να περιορίζεται πιο κοντά στο καλύτερο τμήμα της περιοχής αναζήτησης, διατηρώντας παράλληλα ένα κατάλληλο επίπεδο ποικιλομορφίας.



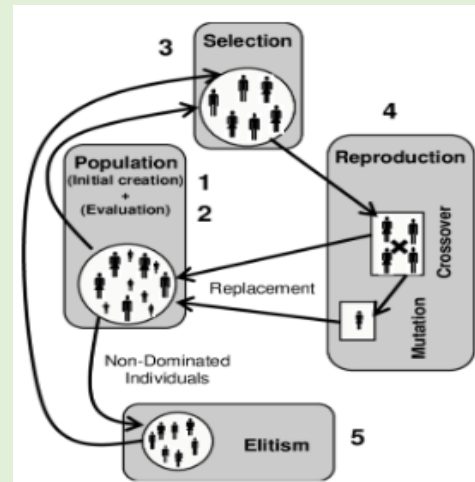
Εικόνα 3.10. Διαδικασία Επιλογής Boltzmann.

(v) **Στοχαστική Καθολική Δειγματοληψία:** Είναι παρόμοια με την Επιλογή Τροχού Ρουλέτας, με τη διαφορά ότι αντί να έχει μόνο ένα σταθερό σημείο, έχει πολλά σταθερά σημεία (Εικ. 3.11). Ως αποτέλεσμα, όλοι οι γονείς επιλέγονται σε μία περιστροφή ενός τροχού. Επιπρόσθετα, ένα τέτοιο σύστημα ενθαρρύνει άτομα με υψηλή ικανότητα να επιλέγονται τουλάχιστον μία φορά.



Εικόνα 3.11. Διαδικασία Στοχαστικής Καθολικής Δειγματοληψίας.

(vi) **Ελιτισμός:** Αποτελεί μία επαναλαμβανόμενη διαδικασία επιλογής που χρησιμοποιείται για να αποτρέψει την επιδείνωση των ατόμων με τις μεγαλύτερες τιμές φυσικής κατάστασης κατά τη διάρκεια της Εξέλιξης (Εικ. 3.12). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν εκτελούνται διασταυρώσεις, είναι πολύ πιθανό όσοι έχουν υψηλά επίπεδα φυσικής κατάστασης να χάσουν τη φυσική τους κατάσταση. Δεν πραγματοποιούνται αλλαγές με αυτήν την τεχνική διότι τα καλύτερα άτομα μπορούν να περάσουν στην επόμενη γενιά (Saha *et al.*, 2015).



Εικόνα 3.12. Ελιτισμός

Ο παρακάτω πίνακας (Πίν. 3.5) παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυριότερων τεχνικών Επιλογής που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο ενός ΓΑ.

**Πίνακας 3.5.** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κυριότερων τεχνικών επιλογής σε έναν ΓΑ (Isa *et al.*, 2024).

Σχήματα Επιλογής	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Τροχός Ρουλέτας	Εύκολο στην εφαρμογή	Κίνδυνος πρόωρης σύγκλισης Εξαρτάται από τη διακύμανση
Κατάταξη	Διατήρηση της διαφορετικότητας Χωρίς προκατάληψη	Αργή σύγκλιση Απαιτείται ταξινόμηση
Τουρνουά	Διατήρηση της διαφορετικότητας	Απώλεια διαφορετικότητας όταν το μέγεθος του τουρνουά είναι μεγάλο
Boltzmann	Επίτευξη του παγκόσμιου βέλτιστου	Υπολογιστικά ακριβό
Στοχαστική Καθολική Δειγματοληψία	Γρήγορη μέθοδος	Πρόωρη σύγκλιση
Ελιτισμός	Διατήρηση του καλύτερου ατόμου στον πληθυσμό	Το καλύτερο άτομο μπορεί να χαθεί λόγω τελεστών Διασταύρωσης και Μετάλλαξης

Οι Hasan και Hussein (2016) περιέγραψαν και συνέκριναν την απόδοση 3 τύπων στρατηγικών επιλογής ΓΑ για την επίλυση του ΠΠΠ. Η Επιλογή Τροχού Ρουλέτας χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση προβλημάτων μεγάλου μεγέθους ενώ η Επιλογή Τουρνουά για προβλήματα μικρού μεγέθους (Hasan & Hussein, 2016, Isa *et al.*, 2024).

Η καλύτερη επιλογή είναι η εφαρμογή ενός συστήματος κατάταξης. Οι Poornam, Dutta & Aggarwal (2016) πέτυχαν το καλύτερο αποτέλεσμα κατά την εφαρμογή της Επιλογής Τροχού Ρουλέτας με

Διασταύρωση Δύο Σημείων και της Επιλογής Τουρνουά με Διασταύρωση Ενός Σημείου (Poonam, Dutta & Aggarwal, 2016, Isa *et al.*, 2024).

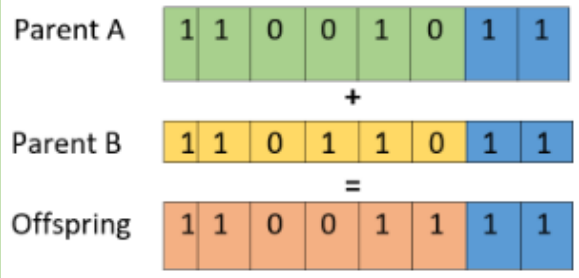
### 3.3.4.2.3 Διασταύρωση

Διασταύρωση είναι η διαδικασία διασταύρωσης μεταξύ γονιδίων και δύο γονέων. Ο τελεστής Διασταύρωσης είναι ένας γενετικός τελεστής που συνδυάζει (ζευγάρια) δύο χρωμοσώματα (γονείς) για να παράγει ένα νέο χρωμόσωμα (απόγονο) (Isa *et al.*, 2024).

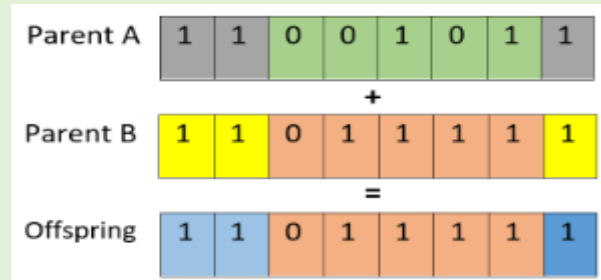
Η διαδικασία αυτή συμβαίνει κατά τη διάρκεια της εξέλιξης σύμφωνα με μία πιθανότητα διασταύρωσης που ορίζεται από το χρήστη. Οι πιο γνωστοί τελεστές Διασταύρωσης είναι η Διασταύρωση Ενός Σημείου, η Διασταύρωση Δύο Σημείων και η Ομοιόμορφη Διασταύρωση, με τη Διασταύρωση Ενός Σημείου, τη Διασταύρωση Κ-Σημείων, την Ομοιόμορφη διασταύρωση και την Αριθμητική διασταύρωση να αποτελούν όλες πιθανές διαδικασίες διασταύρωσης στη Δυναμική Κωδικοποίηση (Kaya & Uyar, 2011, Isa *et al.*, 2024).

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τύποι της Διασταύρωσης σε έναν ΓΑ με παραδείγματα (Πίν. 6).

**Πίνακας 3.6.** Τύπος και παράδειγμα διασταύρωσης (Isa *et al.*, 2024).

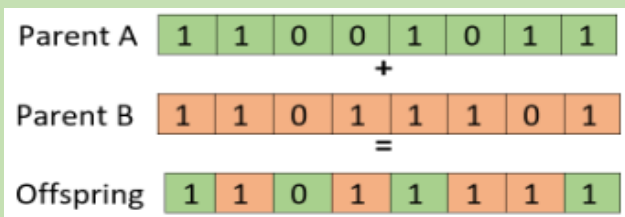
Τύπος διασταύρωσης	Παράδειγμα
<b>(i) Διασταύρωση Ενός Σημείου:</b> Αρχικά γίνεται επιλογή ενός τυχαίου σημείου διασταύρωσης σε μία διασταύρωση ενός σημείου. Ακολούθως πραγματοποιείται ανταλλαγή γενετικών πληροφοριών μεταξύ των 2 γονέων οι οποίοι έχουν προχωρήσει πέρα από αυτό το σημείο (Soon <i>et al.</i> , 2013). Για να δημιουργηθεί ο νέος απόγονος, θα πρέπει να γίνει αντικατάσταση των κομματιών της ουράς και των δύο γονέων (Εικ. 3.13). Όταν γίνεται μία διασταύρωση ενός μόνο σημείου, η κεφαλή και η ουρά ενός χρωμοσώματος χωρίζονται και αν και τα δύο έχουν καλό γενετικό υλικό, κανέννας από τους απογόνους δεν θα κληρονομήσει και τα δύο καλά χαρακτηριστικά (Kora & Yadlapalli, 2017).	 <p><b>Εικόνα 3.13.</b> Διασταύρωση Ενός Σημείου.</p>

(ii) **Διασταύρωση Δύο Σημείων:** Δύο ή περισσότερα τυχαία σημεία διασταύρωσης επιλέγονται σε μία διασταύρωση δύο σημείων, με τις γενετικές πληροφορίες των γονέων να ανταλλάσσονται σύμφωνα με τα τμήματα που σχηματίζονται (Εικ. 3.14) (Soon *et al.*, 2013). Αξίζει να σημειωθεί ότι για την παραγωγή νέων απογόνων, αντικαθίσταται το μεσαίο τμήμα των γονέων.



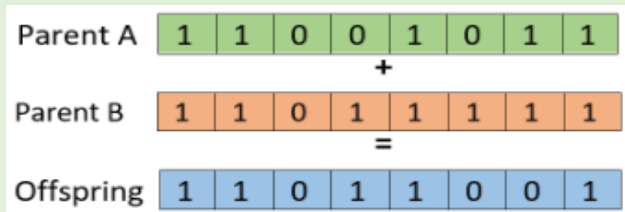
Εικόνα 3.14. Διασταύρωση Δύο Σημείων.

(iii) **Ομοιόμορφη Διασταύρωση:** Ένας γονέας δεν μπορεί να αποσυντεθεί σε τμήματα σε μία ομοιόμορφη διασταύρωση (Εικ. 3.15). Κάθε γονίδιο στον γονέα μπορεί να αντιμετωπιστεί ξεχωριστά. Έτσι, ένας ερευνητής μπορεί να επιλέξει αν θα αλλάξει τυχαία το γονίδιο με την ίδια θέση σε άλλο χρωμόσωμα (Soon *et al.*, 2013).



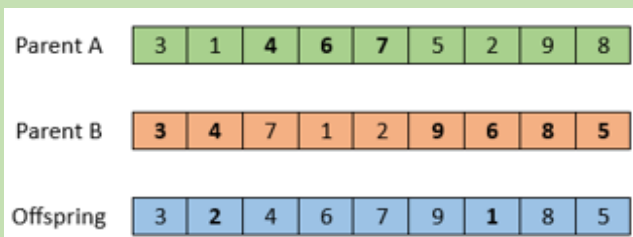
Εικόνα 3.15. Ομοιόμορφη Διασταύρωση.

(iv) **Αριθμητική Διασταύρωση:** Ο συγκεκριμένος τελεστής διασταύρωσης ενώνει τα δύο μητρικά χρωμοσώματα με γραμμικό τρόπο (Εικ. 3.16). Ειδικότερα, δύο χρωμοσώματα επιλέγονται τυχαία για διασταύρωση, με αποτέλεσμα να προκύπτουν δύο παιδιά τα οποία αποτελούν ένα γραμμικό μείγμα των γονιών τους (Kora & Yadlapalli, 2017).



Εικόνα 3.16. Αριθμητική Διασταύρωση.

(v) **Μερικώς Χαρτογραφημένη Διασταύρωση:** Ο συγκεκριμένος τελεστής Διασταύρωσης συνδέει δύο χρωμοσώματα καθώς και δύο θέσεις διασταύρωσης επιλέγονται αυθαίρετα (Εικ. 3.17). Το κλάσμα των χρωμοσωμάτων μεταξύ των δύο σημείων διασταύρωσης δίνει μία αντίστοιχη επιλογή που υφίσταται τη διαδικασία διασταύρωσης μέσω λειτουργιών ανταλλαγής θέσης προς θέση (Kora & Yadlapalli, 2017).



Εικόνα 3.17. Μερικώς Χαρτογραφημένη Διασταύρωση.

Ακολουθεί ο πίνακας (Πίν. 7) με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων τεχνικών διασταύρωσης.

Πίνακας 3.7. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαφόρων τεχνικών Διασταύρωσης (Isa *et al.*, 2024).

Τεχνικές Διασταύρωσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1-σημείου	Εύκολη στην εφαρμογή Απλή	Λιγότερο διαφορετικές λύσεις
2-σημείων	Εύκολη στην εφαρμογή	Λιγότερο διαφορετικές λύσεις Εφαρμόζεται σε μικρά υποσύνολα
Ομοιόμορφη	Αμερόληπτη εξερεύνηση Ισχύει για μεγάλα υποσύνολα Καλύτερη δυνατότητα ανασυνδυασμού	Λιγότερο διαφορετικές λύσεις
Αριθμητική	Δυνατότητα μεγαλύτερης πιθανότητας επί- τευξης του παγκόσμιου βέλτιστου Πραγματοποίηση πολύ καλής αναζήτησης όταν ο πληθυσμός είναι συγκεντρωμένος σε μία οικολογική θέση, βελτιώνοντας την δια- δικασία εξερεύνησης	Δεν εξερευνά ολόκληρο τον χώρο ανα- ζήτησης
Μερικώς Χαρτογραφημένη	Εξαιρετική καθώς φαίνεται να είναι ανώτερη από τους υπόλοιπους τελεστές Διασταύρω- σης, τόσο σε τυχαίες όσο και σε πραγματι- κές περιπτώσεις	Αναποτελεσματική για μη επαναλαμβα- νόμενες μεταθέσεις

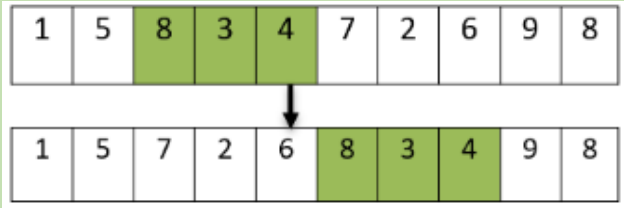

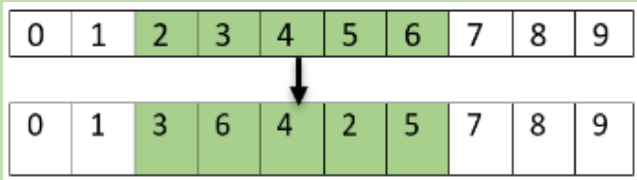

3.3.4.2.4 Μετάλλαξη

Η Μετάλλαξη αποτελεί μία διαδικασία αντικατάστασης επίσης από τα επιλεγμένα γονίδια με μία συ-  
γκεκριμένη τιμή. Οι μεταλλάξεις είναι φορείς που διατηρούν τη γενετική ποικιλότητα από τον έναν πληθυ-  
σμό στον άλλο. Οι μετατοπίσεις, οι απλές αναστροφές καθώς και οι κρυπτογραφημένες μεταλλάξεις είναι  
ελεγκτές μεταλλάξεων (Isa *et al.*, 2024).

Η επιστημονική κοινότητα που ασχολείται με τους Εξελικτικούς Αλγόριθμους (ΕΑ) συνειδητοποιεί  
επίσης τη σημασία της μετάλλαξης και υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την πιο προσεκτική εξέταση των  
χαρακτηριστικών επίσης (De Falco, Della Cioppa & Tarantino, 2002, Isa *et al.*, 2024).

Οι κυριότεροι τύποι μετάλλαξης σε έναν ΓΑ μαζί με παράδειγμα παρουσιάζονται στον επόμενο πί-  
νακα (Πίν. 8).

Πίνακας 3.8. Τύπος και παράδειγμα μετάλλαξης (Isa *et al.*, 2024).

Τύπος Μετάλλαξης	Παράδειγμα
<p><b>(i) Μετάλλαξη με Μετατόπιση:</b> Σε μεμονωμένες λύσεις, χρησιμοποιείται για τη μετατόπιση των υποσυμβολοσειρών (Εικ. 3.18). Οι θέσεις μετατόπισης επιλέγονται τυχαία από επίσης υποσυμβολοσειρές που υπολογίστηκαν, με αποτέλεσμα τόσο σωστές λύσεις όσο και μεταλλάξεις τυχαίας μετατόπισης (Bisen, Mishra &amp; Saurabh, 2021). Οι μεταλλάξεις με Ανταλλαγή και Μεταλλάξεις με Εισαγωγή είναι δύο τύποι μετάλλαξης μετατόπισης (Jebari &amp; Madiafi, 2013).</p>	 <p>Εικόνα 3.18. Μετάλλαξη με Μετατόπιση.</p>
<p><b>(ii) Μετάλλαξη Απλής Αναστροφής:</b> Μοιάζει με τη Μετάλλαξη Scramble στο μέρος όπου γίνεται η επιλογή επίσης υποσυνόλου γονιδίων, ωστόσο αντί να ανακατεύει την επιλογή, απλώς αντιστρέφει ολόκληρη τη συμβολοσειρά στο υποσύνολο (Εικ. 3.19).</p>	 <p>Εικόνα 3.19. Μετάλλαξη Απλής Αναστροφής.</p>
<p><b>(iii) Μετάλλαξη Scramble:</b> Αποτελεί έναν κοινώς χρησιμοποιούμενο τελεστή Μετάλλαξης όπου επιλέγεται ένα τυχαίο υποσύνολο γονιδίων σε ένα χρωμόσωμα, με τις τιμές επίσης να ανακατεύονται τυχαία (Εικ. 3.20).</p>	 <p>Εικόνα 3.20. Μετάλλαξη Scramble.</p>
<p><b>(iii) Μετάλλαξη Swap:</b> Πραγματοποιεί μία εναλλαγή των γονιδίων (Εικ. 3.21). Ειδικότερα, λειτουργεί επιλέγοντας τυχαία δύο γονίδια στον γονότυπο και ανταλλάσσει τα επιλεγμένα γονίδια του γονέα (Pavai &amp; Geetha, 2016).</p>	 <p>Εικόνα 3.21. Μετάλλαξη Swap.</p>

Η διαδικασία μετάλλαξης βοηθά επίσης στην πρόληψη της καθόδου του ΓΑ προς τοπικά άκρα (Selvanathan & Tee, 2003, Isa *et al.*, 2024). Αυτή η δήλωση υποστηρίζεται επίσης από τους Sivanandam *et al.* (2008) όπου οι μεταλλάξεις λειτουργούν για τη βελτίωση των ευεργετικών γονιδίων που έχουν χαθεί λόγω γενετικών διεργασιών, αλλά επίσης βλέπουν υπάρχουσες γενετικές πληροφορίες (Sivanandam *et al.*, 2008). Εν συνεχεία ο αριθμός των αντιγράφων του επιλεγμένου γονιδίου θα υπολογιστεί για να καθοριστεί σε ποια χρωμοσώματα και γονίδια βρίσκεται (Isa *et al.*, 2024).



Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας (Πίν. 9) με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων τεχνικών Μετάλλαξης.

**Πίνακας 3.9.** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαφόρων τεχνικών μετάλλαξης (Isa *et al.*, 2024).

Τεχνικές Μετάλλαξης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Με Μετατόπιση	Εύκολη στην εφαρμογή Ισχύει για περιπτώσεις μικρών προβλημάτων	Κίνδυνος πρόωρης σύγκλισης
Αναστροφής	Εύκολη στην εφαρμογή	Πρόωρη σύγκλιση
Scramble	Επηρεάζει μεγάλο αριθμό γονιδίων Ισχύει σε περιπτώσεις μεγάλων προβλημάτων	Αναστάτωση στον πληθυσμό Επιδείνωση της ποιότητας λύσης σε ορισμένα προβλήματα
Swap	Διατηρεί τις περισσότερες από τις πληροφορίες γειννίας	Οι σπασμένοι σύνδεσμοι διακόπτουν την τάξη περισσότερο

### 3.3.5. Συνάρτηση καταλληλότητας

Η ανάπτυξη μίας βιώσιμης συνάρτησης καταλληλότητας αποτελεί ένα σημαντικό στάδιο ενός ΓΑ, επειδή η απόδοσή του καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την προσπάθεια που απαιτείται για την ανάπτυξη μίας λειτουργικής συνάρτησης καταλληλότητας (Razavi *et al.*, 2015, Isa *et al.*, 2024).

Επιπλέον, καθορίζει πόσο κοντά είναι μία δεδομένη λύση στην ιδανική απάντηση για το πρόβλημα, καθορίζοντας την καταλληλότητα μίας λύσης. Κάθε χρωμόσωμα στον πληθυσμό θα υπολογίζεται για την καταλληλότητα στον ΓΑ για να βρεθεί το χρωμόσωμα με την υψηλότερη τιμή καταλληλότητας.

Η βασική συνάρτηση καταλληλότητας είναι η συνάρτηση Rosenbrock, μία κοινή συνάρτηση δοκιμής για βελτιστοποιητές. Η συνάρτηση είναι ένα άθροισμα τετραγώνων (Εξ. 7):

$$f(x) = 100(x_1^2 - x_2)^2 + (1 - x_1)^2 \quad (7)$$

όπου  $x_1$  και  $x_2$  αποτελούν τις τιμές των γονιδίων (Bashir & Hasan, 2015).

Όσον αφορά τον ΓΑ, είναι πολύ ευαίσθητος στις τιμές φυσικής κατάστασης, επομένως είναι σημαντικό να παρακολουθείται η καταλληλότητα όχι μόνο για να αποφευχθεί η έγκαιρη συγκέντρωση αλλά και για να διατηρηθεί η διαφορετικότητα του πληθυσμού. Οποιαδήποτε συνάρτηση καταλληλότητας θα πρέπει να μπορεί να πληροί τα ακόλουθα κριτήρια (Kanduč, 2017, Isa *et al.*, 2024):

- 1) Η συνάρτηση καταλληλότητας πρέπει να ορίζεται επακριβώς.
- 2) Ένας αναγνώστης θα πρέπει να είναι σε θέση να κατανοήσει ακριβώς πώς καθορίζεται η βαθμολογία της καταλληλότητας.



3) Η συνάρτηση καταλληλότητας θα πρέπει να είναι καλὰ εφαρμοσμένη. Η συνολική απόδοση του ΓΑ θα μειωθεί εάν η συνάρτηση καταλληλότητας γίνει το σημείο συμφόρησης του αλγορίθμου.

4) Η συνάρτηση καταλληλότητας θα πρέπει να είναι σε θέση να ποσοτικοποιήσει το πόσο καλὰ ταιριάζει μία δεδομένη λύση στο πρόβλημα.

5) Η συνάρτηση καταλληλότητας θα πρέπει να παράγει κατανοητά αποτελέσματα. Επιπλέον, σύμφωνα με τον Helshani (2015), η συνάρτηση φυσικής κατάστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της συνολικής απόδοσης της επέμβασης και όχι μεμονωμένους κανόνες (Helshani, 2015, Isa *et al.*, 2024).

Όσον αφορά τη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διατριβή, η συνάρτηση καταλληλότητας που θα χρησιμοποιηθεί είναι η εξής (Εξ. 8):

$$J = \min \left( w_1 * \frac{J1 - J1^*}{J1_{nad} - J1^*} + w_2 * \frac{J2 - J2^*}{J2_{nad} - J2^*} \right) \quad (8)$$

όπου:

$w_1, w_2$  = κανονικοποιημένα βάρη που επηρεάζουν τη λύση,

$J1$  = η μετρική της Ευκλείδειας απόστασης,

$J2$  = η μετρική του ΔΚΔΒ,

$J1^*, J2^*$  = οι βέλτιστες τιμές για τις μετρικές Ευκλείδεια απόσταση και ΔΚΔΒ αντίστοιχα,

$J1_{nad}, J2_{nad}$  = οι εκτιμήσεις των χειρότερων τιμών για τις μετρικές Ευκλείδεια απόσταση και ΔΚΔΒ αντίστοιχα, έτσι όπως προκύπτουν από τον πίνακα payoff.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο τύπος του ΔΚΔΒ αναλύθηκε εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο, ενώ ο τύπος της Ευκλείδειας απόστασης είναι ο εξής (Εξ. 9):

$$d(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2} \quad (9)$$

όπου:

$(x_1, x_2, \dots, x_n)$  και  $(y_1, y_2, \dots, y_n)$  = οποιαδήποτε στοιχεία στο  $\mathbb{R}^n$ .

### 3.3.6 Τελεστές ΓΑ για την Επίλυση του ΠΠΠ

Στον τομέα του ΠΠΠ, ένας ΓΑ εξυπηρετεί εργαλεία επίλυσης προβλημάτων. Ένας ΓΑ, εμπνευσμένος από τη διαδικασία εξέλιξης της φύσης, χρησιμοποιεί ένα σύνολο τελεστών όπως Επιλογή, Διασταύρωση και Μετάλλαξη για να οδηγηθεί σε έναν τεράστιο χώρο λύσεων. Αυτοί οι χειριστές καθοδηγούν τους ΓΑ στην εύρεση βέλτιστων ή σχεδόν βέλτιστων λύσεων για πολύπλοκες προκλήσεις προγραμματισμού (Isa *et al.*, 2024).

Οι παρακάτω αποτελούν τους κυριότερους τελεστές ενός ΓΑ που χρησιμοποιούνται στο ΠΠΠ (Isa *et al.*, 2024):

**(i) Επιλογή:** Η επιλογή χρωμοσωμάτων πραγματοποιείται έτσι ώστε μόνο τα ποιοτικά χρωμοσώματα να μπορούν να προχωρήσουν στην επόμενη διαδικασία του ΓΑ. Στη διαδικασία επιλογής, χρησιμοποιούνται παράμετροι φυσικής κατάστασης για να καθοριστεί πόσο καιρό θα επιβιώσει ένα χρωμόσωμα. Αποτελεί ένα κρίσιμο στάδιο στους ΓΑ που καθορίζει εάν μία συγκεκριμένη συμβολοσειρά θα εμπλακεί στη διαδικασία αναπαραγωγής ή όχι (Katoch, Chauhan & Kumar, 2021). Η ικανότητα του ΓΑ να παράγει προοδευτικά καλύτερα χρωμοσώματα εξαρτάται από την επιλεκτική πίεση που εφαρμόζεται στον πληθυσμό. Οι μέθοδοι επιλογής που χρησιμοποιούνται συχνά περιλαμβάνουν την επιλογή τροχού ρουλέτας, την επιλογή κατάταξης, τον ελιτισμό και την επιλογή τουρνουά.

**(ii) Διασταύρωση:** Η διαδικασία υβριδισμού περιλαμβάνει το ζευγάρωμα δύο επιλεγμένων γονέων για τη δημιουργία απογόνων. Οι απόγονοι κληρονομούν γονίδια και από τους δύο γονείς. Για να διασφαλιστεί ότι η διάταξη των τιμών στο χρωμόσωμα παραμένει συνεπής, χρησιμοποιείται μία Διασταύρωση Ενός Σημείου σε συνδυασμό με τον χειριστή Διασταύρωση Σειράς (ΔΣ). Η διασταύρωση χρωμοσωμάτων πραγματοποιείται σε ζεύγη και εάν επιλεγεί μονός αριθμός χρωμοσωμάτων για διασταύρωση, ορισμένα θα εξαιρεθούν.

**(iii) Μετάλλαξη:** Η Μετάλλαξη Swap χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση επειδή χρησιμοποιείται Κωδικοποίηση Μετάθεσης, η οποία περιλαμβάνει αλλαγή των τιμών δύο γονιδίων μέσα σε ένα χρωμόσωμα. Ο αριθμός των γονιδίων που θα μεταλλαχθούν πρέπει να καθοριστεί εκ των προτέρων για να προσδιοριστεί το μήκος του χρωμοσώματος. Η θέση ενός μεταλλαγμένου γονιδίου προσδιορίζεται με τη δημιουργία ενός τυχαίου αριθμού με βάση τον αριθμό των γονιδίων που πρόκειται να μεταλλαχθούν.

### 3.4. Σύνοψη κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο, πραγματοποιήσαμε εκτενή ανάλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης με σκοπό της επίλυση του ΠΠΠ μέσω της χρήσης ΓΑ. Ξεκινήσαμε με την εισαγωγή και τις βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, εξετάσαμε το ΠΠΠ μέσω ενός παραδείγματος ενώ τέλος, έγινε αναφορά στους κυριότερους αλγορίθμους που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς στη ΓΑΚΡ σχετικά με τον σχεδιασμό διαδρομής με έμφαση στους ΓΑ. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, πραγματοποιείται η προσομοίωση του σεναρίου με σκοπό την εύρεση βέλτιστης τροχιάς της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διατριβής μέσω της χρήσης Ντάικιστρα, Floyd-Warshall και ΓΑ για εφαρμογές ΓΑΚΡ.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Παράδειγμα Εύρεσης Βέλτιστου Μονοπατιού για Εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας

Οι ΓΑ αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται στη ΓΑΚΡ για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της διαχείρισης των πόρων. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα εξετάσουμε τους ΓΑ, ξεκινώντας με εισαγωγικά στοιχεία και βιβλιογραφικές αναφορές που περιγράφουν την εξέλιξή τους και τις εφαρμογές τους. Στη συνέχεια, θα επεξηγήσουμε τη λειτουργία του ΓΑ και θα παρουσιάσουμε τη διαδικασία που ακολουθήθηκε στο πειραματικό μέρος της έρευνας. Τέλος, θα αναλυθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν και θα γίνει συζήτηση γύρω από τα ευρήματα.

#### 4.1. Δημιουργία ΓΑ

##### 4.1.1. Εισαγωγή-Βιβλιογραφικές αναφορές

Οι ΓΑ αποτελούν μία οικογένεια εξελικτικών υπολογιστικών μοντέλων εμπνευσμένων από τη θεωρία του Δαρβίνου για την Εξέλιξη (Entezari-Maleki & Movaghar, 2011, Adewole, Akinwale & Otunbanowo, 2011, Lambora, Gupta & Chopra, 2019). Είναι γενικά αλγόριθμοι που βασίζονται στην αναζήτηση και στηρίζονται στις έννοιες της φυσικής επιλογής και της κληρονομικότητας (Lambora, Gupta & Chopra, 2019).

Δεδομένου ότι οι ΓΑ είναι ένας τύπος αλγορίθμων αναζήτησης, αναζητούν έναν χώρο λύσεων για μία βέλτιστη λύση σε ένα πρόβλημα (Entezari-Maleki & Movaghar, 2011).

Βασικό χαρακτηριστικό ενός ΓΑ είναι ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αναζήτηση. Στην πραγματικότητα, ο αλγόριθμος δημιουργεί έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων στο πρόβλημα και τις αφήνει να εξελιχθούν σε πολλές γενιές για να βρουν καλύτερες και καλύτερες λύσεις (Entezari-Maleki & Movaghar, 2011). Ειδικότερα, οι ΓΑ ξεκινούν με έναν πληθυσμό εφικτών λύσεων σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και εφαρμόζουν επαναληπτικά διαφορετικούς τελεστές για να δημιουργήσουν καλύτερες λύσεις. Αυτοί οι τελεστές, βασισμένοι σε τυχαίες διαδικασίες, επιτρέπουν στους ΓΑ να εξερευνήσουν τον χώρο αναζήτησης προς διαφορετικές κατευθύνσεις. Ακολούθως οι ΓΑ αξιολογούν κάθε άτομο του πληθυσμού χρησιμοποιώντας μία συνάρτηση φυσικής κατάστασης. Εν συνεχεία, τα περισσότερα προσαρμοσμένα άτομα επιλέγονται για ανα-

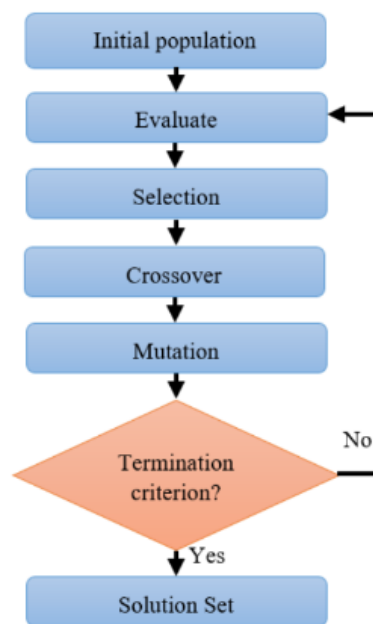
παραγωγή με στόχο την εξεύρεση καλύτερων εφικτών λύσεων. Η διαδικασία αναπαραγωγής περιλαμβάνει τελεστές Διασταύρωσης και Μετάλλαξης. Τέλος, η Αξιολόγηση, η Επιλογή και η Αναπαραγωγή επαναλαμβάνονται μέχρι να επιτευχθούν ορισμένες συνθήκες διακοπής (Kaabi & Harrath, 2019).

#### 4.1.2. Επεξήγηση ΓΑ

##### 4.1.2.1. Γενικά-Εφαρμογές

Ο ΓΑ ανήκει στις τεχνικές που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη και ειδικότερα στην οικογένεια των εξελικτικών αλγορίθμων (Basiri, 2022, Ntakolia, 2022). Αποτελεί ένα δημοφιλές εργαλείο βελτιστοποίησης το οποίο στηρίζεται στην αναζήτηση που ακολουθεί την αρχή της γενετικής και της φυσικής επιλογής που ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά από τον Bremermann το 1958, ενώ έχει χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων, συχνά θεωρείται ως βελτιστοποιητής συναρτήσεων (Patle, 2019, Santos, 2021).

Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά (Εικ. 4.1) και αναλύεται η διαδικασία υλοποίησης ενός απλού ΓΑ.



Εικόνα 4.1. Βασική διάταξη σε έναν ΓΑ (Isa *et al.*, 2024).

Αρχικά ο αρχικός πληθυσμός παράγεται τυχαία σε όλο τον χώρο αναζήτησης ή από τον χρήστη (Αρχικοποίηση).

Ακολουθώς, αφού αρχικοποιηθεί ο πληθυσμός, αξιολογούνται οι τιμές καταλληλότητας των πιθανών λύσεων (Αξιολόγηση), με τα πιο κατάλληλα χρωμοσώματα να είναι πιο πιθανό να επιλεγούν για την επόμενη

γενιά μετά από εξέταση, υπολογίζοντας πρώτα την καταλληλότητα κάθε χρωμοσώματος για να υπολογιστεί στη συνέχεια η πιθανότητα καταλληλότητας (Επιλογή).

Μετέπειτα, πραγματοποιείται η διαδικασία συνδυασμού δύο ή περισσότερων γονικών λύσεων για τη δημιουργία νέων, ίσως καλύτερων λύσεων (Διασταύρωση), η οποία μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει να επιλεγεί ένα σημείο στο γονικό χρωμόσωμα τυχαία (μονές ή περισσότερες θέσεις, ανάλογα με τη μέθοδο διασταύρωσης) πριν πραγματοποιηθεί η ανταλλαγή των υποχρωμοσωμάτων.

Τέλος, μετά και από τη διασταύρωση σε δύο ή περισσότερα γονικά χρωμοσώματα, η μετάλλαξη αλλάζει τυχαία τη λύση, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί με διάφορους τρόπους (Μετάλλαξη). Ειδικότερα, το γονίδιο αντικαθίσταται με μια νέα τιμή σε τυχαίες θέσεις κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μετάλλαξης (Mitchell, 1998, Sagar & Kumar, 2015, Hichri *et al.*, 2022).

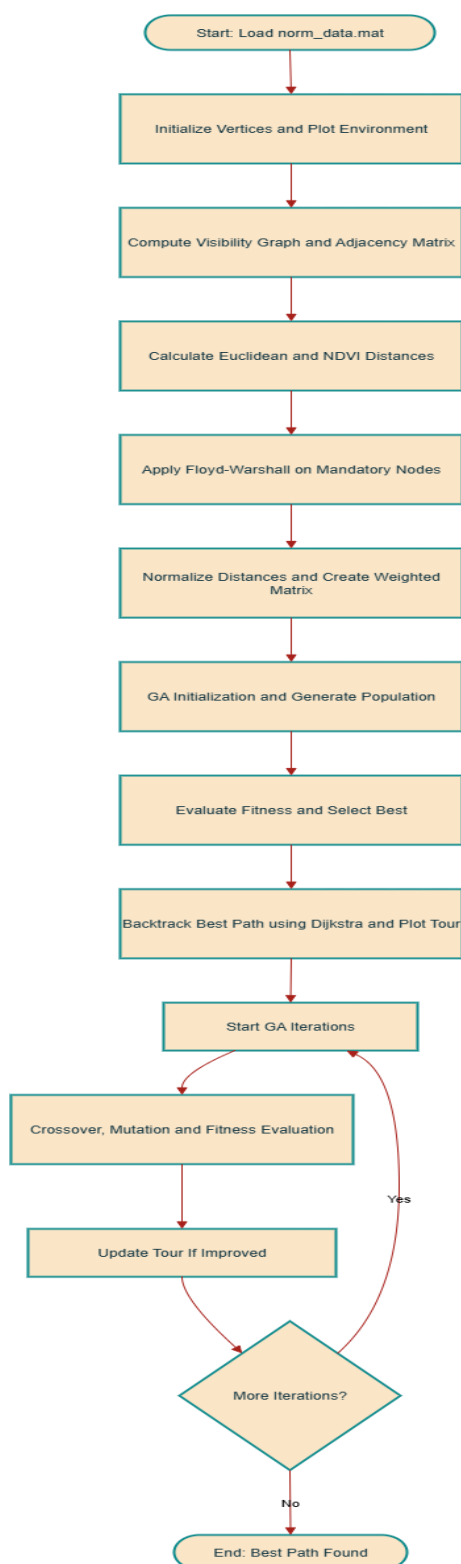
Σήμερα, έχει ευρεία εφαρμογή σε όλους τους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας, συμπεριλαμβανομένης της πλοήγησης ρομπότ (Patle, 2019, Santos, 2021). Ειδικότερα, χρησιμοποιείται για τη δημιουργία λύσεων σε προβλήματα αναζήτησης που βασίζονται σε λειτουργίες όπως αυτές της μετάλλαξης, διασταύρωσης και επιλογής. Επιπλέον βρίσκει εφαρμογή στα ΜηΕΑ και συγκεκριμένα στην ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης της περιήγησης η οποία περιλαμβάνει την κάλυψη εδάφους, την βελτιστοποίηση της τροχιάς εργασίας καθώς και την βελτίωση της απόδοσης αυτών μειώνοντας παράλληλα την κατανάλωση καυσίμου τους (Aggarwal & Kumar, 2020, Basiri, 2022, Ntakolia, 2022). Ωστόσο η ταχύτητα λειτουργίας του είναι αργή και η αποτελεσματικότητα αναζήτησης χαμηλή (Tian *et al.*, 2023).

Οι Pham *et al.* (2017) παρουσίασαν μία νέα προσέγγιση για την μεγιστοποίηση του σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα το μήκος διαδρομής ενός εναέριου ρομπότ σε αγροτικό περιβάλλον με κοίλα εμπόδια, χρησιμοποιώντας έναν ΓΑ. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτή η νέα κυτταρική αποσύνθεση λειτουργεί καλά ακόμη και με αρκετά κοίλα εμπόδια μέσα σε ένα αγροτικό περιβάλλον (Pham *et al.*, 2017).

#### 4.1.2.2. Μοντελοποίηση

Ο ΓΑ που προτείνεται από τον Vedenyov (2024) αναφέρεται στην εύρεση της βέλτιστης διαδρομής μεταξύ των σημείων ενδιαφέροντος, λαμβάνοντας υπόψη τα διάφορα εμπόδια (Vedenyov, 2024).

Παρακάτω εμφανίζεται ο ΓΑ, σε συνδυασμό με τους Ντάικστρα και Floyd-Warshall, για την επίλυση του ΠΠΠ (Εικ. 4.2):



Εικόνα 4.2. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου επίλυσης ΠΠΠ με τη χρήση Ντάικστρα, Floyd-Warshall και ΓΑ.

Γενικά, ο παραπάνω κώδικας υλοποιεί έναν ΓΑ για την επίλυση του κλασικού "Προβλήματος του Πλανόδιου Πωλητή" (ΠΠΠ), σε συνδυασμό με τους αλγόριθμους Ντάικστρα και Floyd-Warshall σε έναν χώρο με εμπόδια και σημεία ενδιαφέροντος που καθορίζονται από συντεταγμένες. Ειδικότερα, ο αλγόριθμος αυτός δημιουργεί αρχικούς τυχαίους πληθυσμούς, υπολογίζει αποστάσεις μεταξύ των σημείων, πραγματοποιεί διασταυρώσεις και μεταλλάξεις στις διαδρομές, και τελικά εμφανίζει τη βέλτιστη διαδρομή σε ένα γράφο ορατότητας με τα εμπόδια και τις συντεταγμένες των σημείων ενδιαφέροντος.

#### 4.1.2.3. Ανάλυση

Ο συνολικός κώδικας (Εικ. 4.2) αποτελεί ένα σύνθετο εργαλείο που συνδυάζει τη θεωρία γράφων, την υπολογιστική γεωμετρία και τους αλγόριθμους Ντάικστρα, Floyd-Warshall και ΓΑ για την επίλυση του ΠΠΠ σε περιβάλλον με εμπόδια.

Ο παραπάνω κώδικας (Εικ. 4.2) αποσκοπεί στην επίλυση ενός ΠΠΠ με τη χρήση των αλγορίθμων Ντάικστρα, Floyd-Warshall και ΓΑ σε ένα περιβάλλον με εμπόδια και σε συνδυασμό με την απεικόνιση ενός ΓΟ. Ειδικότερα, περιλαμβάνει τη δημιουργία γράφου, τον καθορισμό των σημείων και των εμποδίων, τη χρήση των προαναφερθέντων αλγορίθμων για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής καθώς και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

Πιο αναλυτικά, αρχικά ορίζονται οι συντεταγμένες των σημείων ενδιαφέροντος σε έναν πίνακα 'vertices', όπου κάθε γραμμή περιέχει τις συντεταγμένες 'x' και 'y' του υπό μελέτη αγροτεμαχίου καθώς επίσης και την κατηγορία του κάθε σημείου (C). Οι συντεταγμένες αυτές διαχωρίζονται και εξάγονται στη συνέχεια στους πίνακες 'citx' και 'city', με τον συνολικό αριθμό των πόλεων να αποθηκεύεται στη μεταβλητή 'cities'.

Εν συνεχεία, δημιουργούνται οι ακμές του ΓΟ μέσω της συνάρτησης RPS(vertices), λαμβάνοντας υπόψη και τα εμπόδια, με την πληροφορία αυτή να απεικονίζεται μέσω του πίνακα γειτνίασης (A), ο οποίος δείχνει τα σημεία που συνδέονται μεταξύ τους.

Ακολούθως χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Floyd-Warshall (FloydSPR) με σκοπό τον υπολογισμό όλων των συντομότερων μονοπατιών μεταξύ όλων των κόμβων του γράφου, με βάση την αντίστοιχη μετρική που θέλουμε να μελετήσουμε κάθε φορά. Ωστόσο η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται μόνο στα υποχρεωτικά σημεία (man\_loc), με τα αποτελέσματα να εξάγονται σε υποπίνακα (S\_manloc). Επίσης, υπολογίζεται και ο πίνακας με βάση την Ευκλείδεια απόσταση για όλα τα σημεία 'Adj\_dist', διατηρώντας ωστόσο τις αποστάσεις μόνο μεταξύ των συνδεδεμένων σημείων.

Έπειτα, ο κώδικας προχωρά στον υπολογισμό των συντομότερων μονοπατιών με βάση την μετρική του ΔΚΔΒ, δημιουργώντας τον πίνακα 'Adj\_ndvi\_all' ο οποίος περιέχει όλες τις ΔΚΔΒ τιμές μεταξύ των συνδέσεων, οι οποίες προσαρμόζονται ώστε τα μη συνδεδεμένα σημεία να έχουν άπειρο κόστος ενώ εξάγεται επίσης και ένας υποπίνακας ΔΚΔΒ για τα υποχρεωτικά σημεία (Adj\_ndvi). Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές '0.0' στους πίνακες αντικαθίστανται από την τιμή 'inf' (άπειρο), το οποίο υποδηλώνει ότι τα σημεία αυτά δε συνδέονται μεταξύ τους.

Για να καταστεί δυνατός ο συνδυασμός των 2 μετริกών (Ευκλείδεια απόσταση και ΔΚΔΒ), πραγματοποιείται κανονικοποίηση σε τιμές μεταξύ 0 και 1 και έπειτα συνδυάζονται σε έναν πίνακα κόστους 'AdjMax\_norm', με τη χρήση των βαρών  $w_1$  και  $w_2$ , ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί αργότερα για την εύρεση μονοπατιών με τον αλγόριθμο Ντάικστρα.

Ακολουθώντας, γίνεται προετοιμασία για χρήση του ΓΑ, όπου ορίζονται οι βασικές παράμετροι του, όπως το μέγεθος του πληθυσμού ('pop'), ο αριθμός των επαναλήψεων ('iter') καθώς και τα βάρη  $w_1$  και  $w_2$ , τα οποία καθορίζουν τη σημασία της απόστασης καθώς και του ΔΚΔΒ στη συνάρτηση κόστους. Μετά τον ορισμό των βασικών παραμέτρων πραγματοποιείται κανονικοποίηση των πινάκων 'Adj\_dist' 'Adj\_ndvi\_all' έτσι ώστε να βρίσκονται στην ίδια κλίμακα με σκοπό να είναι κατάλληλοι για τη συνδυαστική αξιολόγηση με χρήση των βαρών.

Συνεχίζοντας την ανάλυση του κώδικα, πραγματοποιείται αρχικοποίηση του ΓΑ, όπου δημιουργείται ένας αρχικός πληθυσμός από διαδρομές οι οποίες περιέχουν όλα τα υποχρεωτικά σημεία με τυχαία σειρά. Εκεί, για κάθε διαδρομή, υπολογίζεται το κόστος αυτής (σταθμισμένο άθροισμα συνολικής Ευκλείδειας απόστασης και ΔΚΔΒ), κανονικοποιημένες και σταθμισμένες με τα βάρη  $w_1$  και  $w_2$ , με την καλύτερη διαδρομή να επιλέγεται ως “γονέας” για την επόμενη γενεά.

Μετάπειτα, πραγματοποιείται η φάση στην οποία χρησιμοποιούνται οι τελεστές Διασταύρωση και Μετάλλαξη.

Ακολουθώντας, στις επόμενες επαναλήψεις ξεκινά η εξέλιξη του πληθυσμού. Ο κώδικας χρησιμοποιεί τη μέθοδο της Μερικώς Χαρτογραφημένης Διασταύρωσης (MXΔ), με σκοπό τη δημιουργία νέων διαδρομών από τις υπάρχουσες. Ειδικότερα, η ΜΧΔ δημιουργεί απογόνους από τον γονέα και τα μέλη του πληθυσμού, όπου για κάθε νέο απόγονο γίνεται επαναξιολόγηση του κόστους της διαδρομής, με την καλύτερη να παίρνει τη θέση της παλιάς λύσης, κ.ο.κ., με τα αποτελέσματα να αποτυπώνονται γραφικά και σε μορφή πίνακα κόστους διαδρομής ανά επανάληψη.



Εν συνεχεία, στις επόμενες επαναλήψεις, σε κάθε γενεά εφαρμόζονται τελεστές Μετάλλαξης, οι οποίοι επιτρέπουν την τυχαία αλλαγή της σειράς κάποιων σημείων μέσα στη διαδρομή, κάτι το οποίο προσφέρει ποικιλομορφία στον εκάστοτε πληθυσμό ενώ ταυτόχρονα μειώνει την πιθανότητα παγίδευσης σε τοπικά βέλτιστα, μέσω της τεχνικής Swap ή Flip. Μετά από κάθε επανάληψη, υπολογίζεται εκ νέου το κόστος για κάθε διαδρομή, με την καλύτερη λύση να επιλέγεται και να αποθηκεύεται στο 'cost\_iter', διαδικασία η οποία συνεχίζεται για προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονιστεί ότι στο τέλος κάθε γενεάς χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Ντάικστρα με σκοπό την ανάκτηση της πλήρους διαδρομής μεταξύ όλων των κόμβων της επιλεγμένης κάθε φορά σειράς επισκέψεων. Ειδικότερα, εφαρμόζεται, όπως προαναφέρθηκε, στον ενοποιημένο πίνακα κόστους 'AdjMax\_norm', ώστε να ληφθεί η συνολική πραγματική διαδρομή.

Τέλος, σε κάθε επανάληψη, το γράφημα ενημερώνεται για να υποδείξει την τρέχουσα καλύτερη διαδρομή, ενώ παράλληλα, το κόστος αυτής αποθηκεύεται και εμφανίζεται σε νέο γράφημα ως σημείο ('bo' ή 'ro'), επιτρέποντας την παρακολούθηση της βελτίωσης του αλγορίθμου με την πάροδο των επαναλήψεων.

## 4.2. Υλοποίηση-Αποτελέσματα

### 4.2.1. Γενικά

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι η δημιουργία και παρουσίαση ολοκληρωμένου συστήματος βέλτιστης τροχιάς ενός ΜηΕΑ σε 3 αγροτεμάχια μέσω της χρήσης ΓΑ, σε συνδυασμό με Floyd-Warshall και Ντάικστρα, για τη διασφάλιση του αποτελεσματικού ψεκασμού διαφορετικών ειδών καλλιεργειών σε περιοχές ενδιαφέροντος.

### 4.2.2. Προδιαγραφές ΜηΕΑ

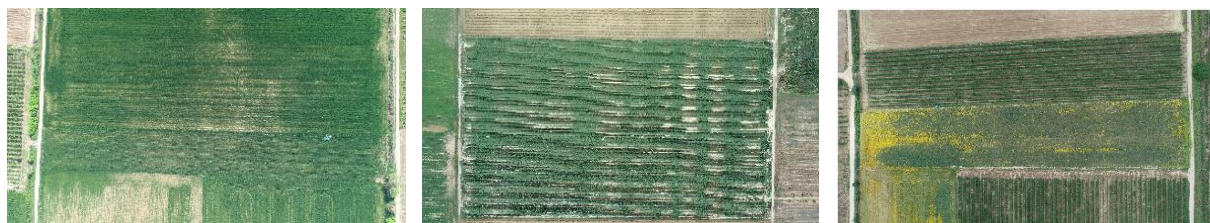
Το ΜηΕΑ που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική είναι το DJI Phantom P4, με ΚΠΜ CMOS αισθητήρα, οι προδιαγραφές του οποίου παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα (Εικ 4.3).

<b>Weight (Battery &amp; Propellers Included)</b>	1375 g	<b>Max Service Ceiling Above Sea Level</b>	19685 ft (6000 m)
<b>Diagonal Size (Propellers Excluded)</b>	350 mm	<b>Max Wind Speed Resistance</b>	10 m/s
<b>Max Ascent Speed</b>	S-mode: 6 m/s P-mode: 5 m/s	<b>Max Flight Time</b>	Approx. 30 minutes
<b>Max Descent Speed</b>	S-mode: 4 m/s P-mode: 3 m/s	<b>Operating Temperature Range</b>	32° to 104°F (0° to 40°C)
<b>Max Speed</b>	S-mode: 45 mph (72 kph) A-mode: 36 mph (58 kph) P-mode: 31 mph (50 kph)	<b>Satellite Positioning Systems</b>	GPS/GLONASS
<b>Max Pitch Angle</b>	S-mode: 42° A-mode: 35° P-mode: 25°	<b>Hover Accuracy Range</b>	Vertical: ±0.1 m (with Vision Positioning) ±0.5 m (with GPS Positioning) Horizontal: ±0.3 m (with Vision Positioning) ±1.5 m (with GPS Positioning)
<b>Max Angular Speed</b>	S-mode: 250°/s A-mode: 150°/s		

Εικόνα 4.3. Προδιαγραφές του ΜηΕΑ που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη διπλωματική (<https://ag.dji.com>).

#### 4.2.3. Επιλογή αγροτεμαχίων

Τα αγροτεμάχια που επιλέχθηκαν ήταν από την ευρύτερη περιοχή του Βόλου, στο νομό Μαγνησίας, με τρεις διαφορετικές καλλιέργειες και συγκεκριμένα σιτάρι, βαμβάκι και κτηνοτροφικό κουκί (Εικ. 4.4).



Εικόνα 4.4. Αεροφωτογραφίες των υπό επεξεργασία αγροτεμαχίων σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά).

#### 4.2.4. Διαδικασία υλοποίησης

##### 4.2.4.1. Λήψη αεροφωτογραφιών

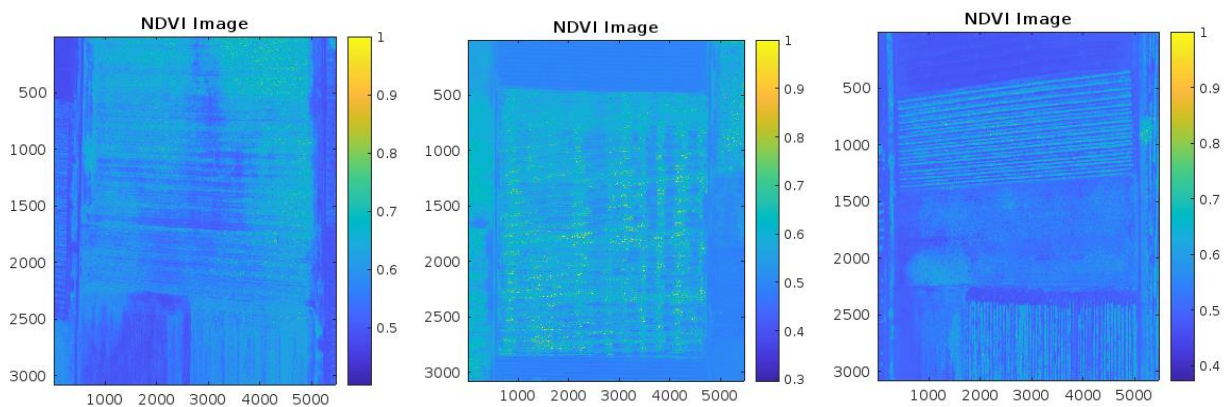
Η λήψη των αεροφωτογραφιών για τα συγκεκριμένα αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού πραγματοποιήθηκε κατά την περίοδο 2020-2023 μέσω της χρήσης του ΜηΕΑ DJI Phantom P4, με ΚΠΜ CMOS αισθητήρα (Εικ. 4.5).



Εικόνα 4.5. DJI Phantom P4, με ΚΠΜ CMOS αισθητήρα (<https://ag.dji.com>).

#### 4.2.4.2. Επεξεργασία αεροφωτογραφιών

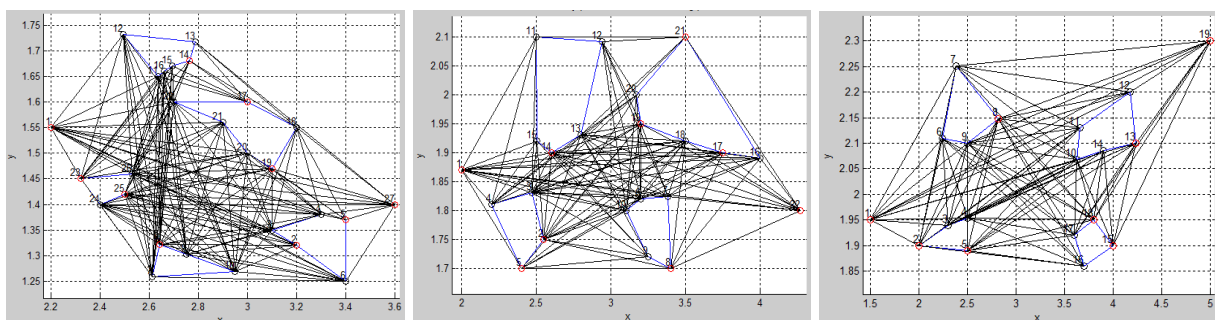
Η επεξεργασία των αεροφωτογραφιών για την μετατροπή τους από ΚΠΜ εικόνες σε ΔΚΔΒ έγινε μέσω του ανοιχτού κώδικα της MATLAB για τον υπολογισμό του ΔΚΔΒ (βλ. Κεφ. 2) με σκοπό την μετατροπή τους σε ΔΚΔΒ χάρτη (Εικ. 4.6).



Εικόνα 4.6. Χάρτης ΔΚΔΒ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουνιού (από αριστερά προς τα δεξιά).

#### 4.2.4.3. Δημιουργία ΓΟ και Υπολογισμός Βάρους

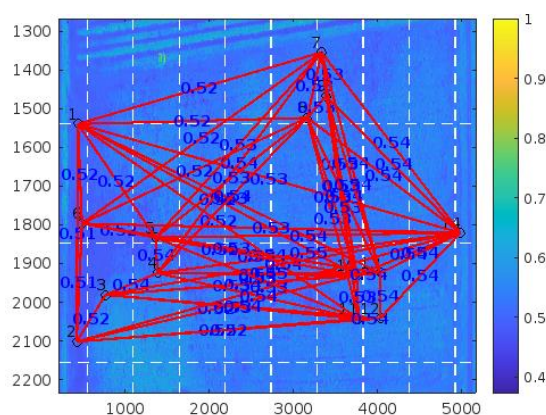
Εν συνεχεία, δημιουργήθηκε ο ΓΟ μέσω κώδικα (βλ. Κεφ. 2) με σκοπό την εύρεση του συντομότερου μονοπατιού μεταξύ ενός αρχικού και ενός τελικού σημείου με αποφυγή παράλληλα πολυγωνικών εμποδίων.



Εικόνα 4.7. Χάρτης ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουνιού (από αριστερά προς τα δεξιά).

Ειδικότερα, δημιουργήθηκε ένας ΓΟ ο οποίος αναπαριστά μόνο τις εφικτές διαδρομές, αποφεύγοντας τα εμπόδια που υπάρχουν στο εκάστοτε αγροτεμάχιο (Εικ. 4.7). Πιο συγκεκριμένα, ο γράφος αυτός παρουσιάζει τα εφικτά μονοπάτια μεταξύ των σημείων ενδιαφέροντος καθώς και τα εμπόδια που υπάρχουν στον χώρο.

Μετέπειτα, πραγματοποιήθηκε συγχώνευση του ΔΚΔΒ χάρτη με τον ΓΟ. Η συγχώνευση αυτή έγινε με την βοήθεια ενός πλέγματος το οποίο βοήθησε στον υπολογισμό του μ.ο. του ΔΚΔΒ κάθε κελιού αποσκοπώντας σε μία πιο εύκολη κατηγοριοποίηση της βλάστησης στο υπό μελέτη αγροτεμάχιο.



Εικόνα 4.8. Βάρη ακμών σε ένα από τα υπό εξέταση αγροτεμάχια.

Αιολούθως, το βάρος κάθε ακμής προέκυψε μέσω τους πλέγματος (Εικ. 4.8). Ειδικότερα, επάνω στην ΔΚΔΒ εικόνα που δημιουργήθηκε αρχικά, δημιουργήσαμε ένα πλέγμα 10x10 όπου στο κάθε ένα αντιστοιχούσε 1 βάρος με βάση το μ.ο. του ΔΚΔΒ το οποίο περικλείονταν σε κάθε ένα από αυτά τα κελιά. Εν συνεχεία, οι τιμές των κελιών οι οποίες δεν βρίσκονταν εντός του γράφου αφαιρούνταν ενώ οι υπόλοιπες μετατρέπονταν σε μ.ο. έτσι ώστε να προκύψει μία τιμή για κάθε ακμή.

Αφού ολοκληρώθηκαν τα παραπάνω βήματα, εντοπίστηκαν 6 περιοχές με τις χαμηλότερες τιμές ΔΚΔΒ, και σε συνδυασμό με το ΓΟ, δημιουργήθηκε ένας κώδικας MATLAB ο οποίος χρησιμοποιεί τους αλγορίθμους Ντάικστρα, Floyd-Warshall και ΓΑ με στόχο την επίλυση του ΠΠΠ (βλ. Κεφ. 3). Ειδικότερα, ο συγκεκριμένος κώδικας βρίσκει την βέλτιστη διαδρομή που θα πρέπει να ακολουθήσει ένα ψευδοαστικό ΜηΕΑ μεταξύ των σημείων ενδιαφέροντος, με βάση τόσο την Ευκλείδεια απόσταση που δημιουργήθηκε αρχικά, όσο και με βάση τον ΔΚΔΒ χάρτη που δημιουργήθηκε μεμονωμένα αλλά και συνδυασμό τους, στοχεύοντας στα σημεία ενδιαφέροντος, αποφεύγοντας ταυτόχρονα τα εμπόδια που έχουν αρχικά τεθεί.

Τέλος, αφού βρέθηκαν οι συντεταγμένες των σημείων ενδιαφέροντος και των κορυφών των εμποδίων, καθώς επίσης και τα βάρη που αντιστοιχούν σε κάθε ακμή, είναι η σειρά να βρεθεί η βέλτιστη διαδρομή των σημείων αυτών, μέσω της επίλυσης του ΠΠΠ.

Συγκεκριμένα, παρακάτω αναλύονται τα 3 σενάρια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης τροχιάς ενός ΜηΕΑ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού για την επίλυση του ΠΠΠ.

#### 4.2.4.4. Σενάρια

Αρχικά έχοντας δημιουργήσει τον ΔΚΔΒ χάρτη καθώς και τον ΓΟ για το κάθε ένα υπό εξέταση αγροτεμάχιο και έχοντας επιλέξει δειγματοληπτικά 5 σημεία ενδιαφέροντος, με γνωστές συντεταγμένες, κατασκευάζουμε έναν γράφο ο οποίος, μέσω της επίλυσης του ΠΠΠ, στοχεύει στο να επισκεφτεί όλα τα σημεία αυτά με τη βέλτιστη σειρά, ελαχιστοποιώντας αρχικά την Ευκλείδεια Απόσταση, ακολούθως το ΔΚΔΒ και τέλος και τις 2 μετρικές ταυτόχρονα. Παρακάτω αναλύεται το κάθε σενάριο ξεχωριστά.

##### 1<sup>ο</sup> σενάριο

Ως 1<sup>ο</sup> σενάριο χρησιμοποιούμε για μεγιστοποίηση την μετρική της Ευκλείδειας απόστασης, αποσκοπώντας στην εύρεση της βέλτιστης διαδρομής μεταξύ συγκεκριμένων σημείων ενδιαφέροντος για τα υπό εξέταση αγροτεμάχια μέσω της επίλυσης του ΠΠΠ.

Για την προετοιμασία του αλγορίθμου, γίνεται ο ορισμός του πληθυσμού και των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια. Ειδικότερα, ο αρχικός πληθυσμός ορίζεται στα 100 (αριθμός πιθανών λύσεων σε κάθε επανάληψη), ο μέγιστος αριθμός των γενεών που θα εκτελεστούν στα 200 και οι βαθμοί βαρύτητας την τιμή 0 και 1, ανάλογα με το εάν η συγκεκριμένη μετρική λαμβάνεται υπόψη στο συγκεκριμένο σενάριο ή όχι. Όσον αφορά το συγκεκριμένο σενάριο, λαμβάνεται υπόψη μόνο η μετρική της Ευκλείδειας απόστασης, οπότε θα πάρει την τιμή 1 ενώ αντίστοιχα η μετρική του ΔΚΔΒ την τιμή 0.

Ακολούθως πραγματοποιείται η δημιουργία των τυχαίων διαδρομών, η αποθήκευση των συντεταγμένων των σημείων καθώς και η αρχικοποίηση του κόστους κάθε διαδρομής. Όσον αφορά τον υπολογισμό του κόστους, αυτός γίνεται με βάση την απόσταση μεταξύ των σημείων ενδιαφέροντος όσο και τη συνδεσιμότητά τους. Εάν δύο σημεία δεν συνδέονται, η διαδρομή αποκτά άπειρο κόστος και θεωρείται μη έγκυρη, ενώ, στην περίπτωση που υπάρχει σύνδεση μεταξύ τους, υπολογίζεται το συνολικό κόστος της διαδρομής, το οποίο αποτελεί το άθροισμα των επιμέρους αποστάσεων.



Εν συνεχεία, από τον αρχικό πληθυσμό επιλέγεται ως υποψήφια λύση η διαδρομή με το μικρότερο κόστος. Η βελτίωση της λύσης γίνεται μέσω των τελεστών της Διασταύρωσης, και συγκεκριμένα της ΜΧΔ, και της Μετάλλαξης, και συγκεκριμένα της Swap, η οποία εφαρμόζεται σε τυχαία σημεία της διαδρομής με σκοπό την εισαγωγή ποικιλομορφίας καθώς και την αποτροπή σύγκλισης σε τοπικά ελάχιστα.

Μετέπειτα, για την βελτιστοποίηση της ακρίβειας της διαδρομής, χρησιμοποιείται οι αλγόριθμοι Ντάικστρα και Floyd-Warshall, οι οποίοι βρίσκουν το συντομότερο μονοπάτι μεταξύ 2 διαδοχικών σημείων ενδιαφέροντος, το οποίο εξασφαλίζει τη βελτιστοποίηση τόσο σε σχέση με την αρχική επιλογή των σημείων όσο και με την συνδεσιμότητά τους. Έτσι, ο κώδικας επαναλαμβάνεται κάθε φορά για συγκεκριμένο αριθμό γονέων, διατηρώντας με αυτό τον τρόπο την καλύτερη δυνατή διαδρομή. Με τον εντοπισμό μίας βελτιωμένης διαδρομής γίνεται αμέσως αντικατάσταση της υπάρχουσας με την νέα.

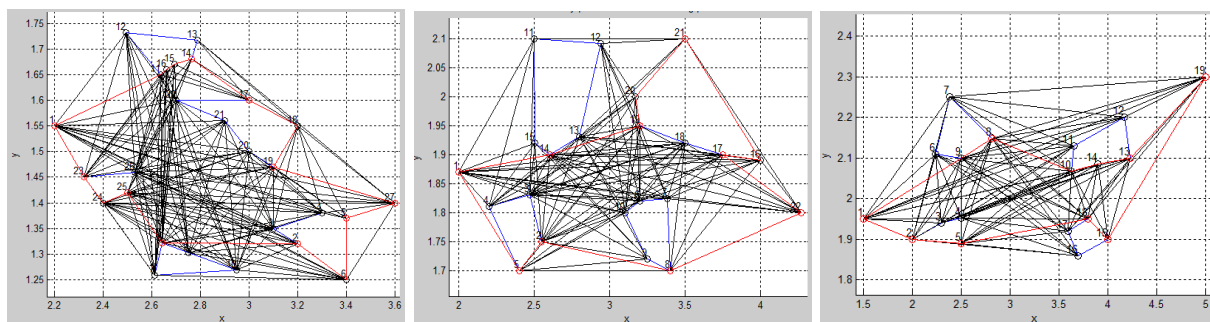
Όσον αφορά την κανονικοποίηση, αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω του πίνακα απολαβών. Ο πίνακας απολαβών αποτελεί ένα εργαλείο, αποσκοπώντας στη βελτιστοποίηση πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των ιδανικών και ελαχίστων διανυσμάτων στόχων (Miettinen, 1999).

Σχηματίζεται χρησιμοποιώντας τα διανύσματα απόφασης που λαμβάνονται κατά τον υπολογισμό του ιδανικού αντικειμενικού διανύσματος. Η σειρά  $i$  του πίνακα απολαβών εμφανίζει τις τιμές όλων των αντικειμενικών συναρτήσεων που υπολογίζονται στο σημείο όπου το  $f_i$  έλαβε την ελάχιστη τιμή του. Επομένως, το  $z_i^*$  βρίσκεται στην κύρια διαγώνιο του πίνακα (Miettinen, 1999).

Η μέγιστη τιμή της στήλης  $i$  στον πίνακα απολαβών μπορεί να επιλεγεί ως εκτίμηση του άνω ορίου του αντικειμενικού  $f_i$  για  $i = 1, \dots, k$  πάνω από το βέλτιστο σύνολο Παρέτο (Miettinen, 1999).

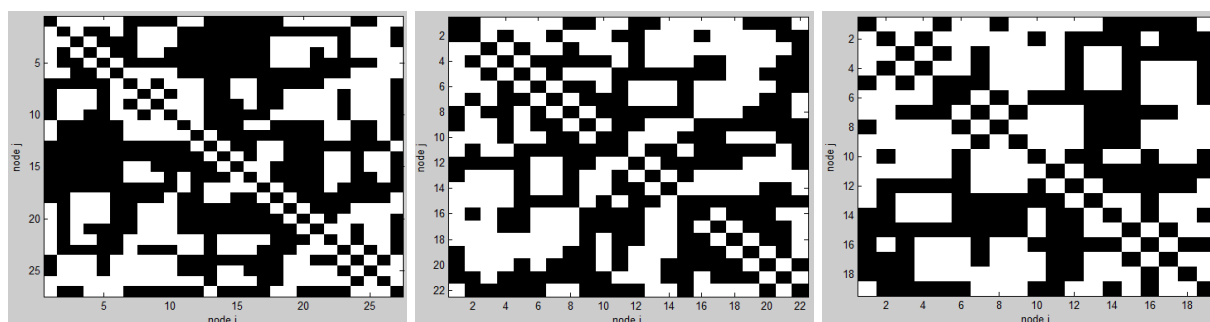
Τέλος, γίνεται αποθήκευση των πληροφοριών που αφορούν την καλύτερη λύση, συμπεριλαμβανομένου και του συνολικού κόστους της 2ης μετρικής (ΔΚΔΒ), η οποία στο συγκεκριμένο σενάριο δεν επηρέασε την βελτιστοποίηση της λύσης.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα του κώδικα του συγκεκριμένου σεναρίου για τα υπό εξέταση αγροτεμάχια.



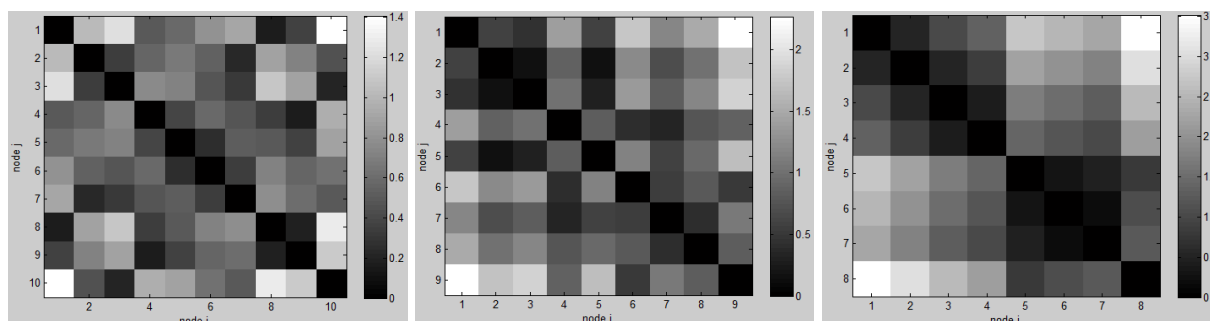
Εικόνα 4.9. Αποτελέσματα κώδικα για ΓΟ και συντομότερη διαδρομή για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.

Η παραπάνω εικόνα (Εικ. 4.9) απεικονίζει τον ΓΟ με τα σημεία ενδιαφέροντος. Ειδικότερα, εμφανίζονται τα εμπόδια (με μπλε γραμμές), τα σημεία ενδιαφέροντος (με κόκκινες κουκίδες), οι συνδέσεις μεταξύ των σημείων ενδιαφέροντος και των κορυφών των εμποδίων καθώς και η τελική διαδρομή με βάση το συνδυασμό των αλγορίθμων Floyd-Warshall, Ντάικστρα και ΓΑ.



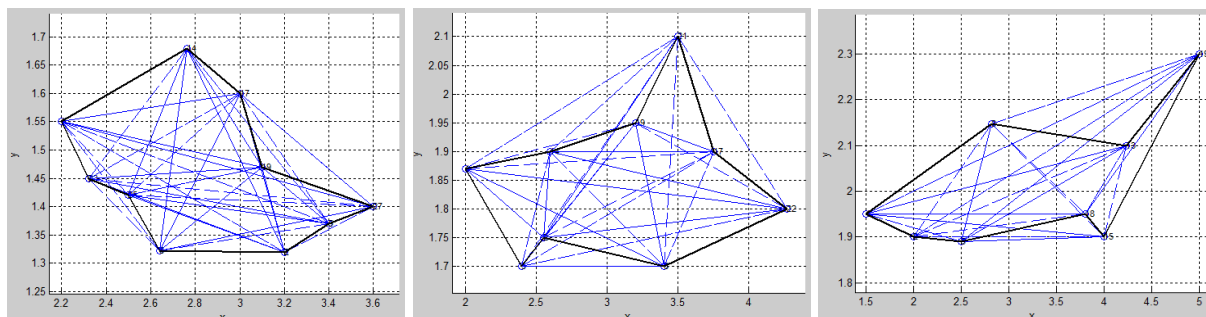
Εικόνα 4.10. Αποτελέσματα πίνακα γεινιάσης για τον ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.

Η παραπάνω εικόνα (Εικ. 4.10) απεικονίζει τη συνδεσιμότητα μεταξύ των σημείων στον ΓΟ. Ειδικότερα, τα σημεία που συνδέονται μεταξύ τους είναι με λευκό χρώμα ενώ αυτά που παρουσιάζουν μη συνδεσιμότητα με μαύρο.



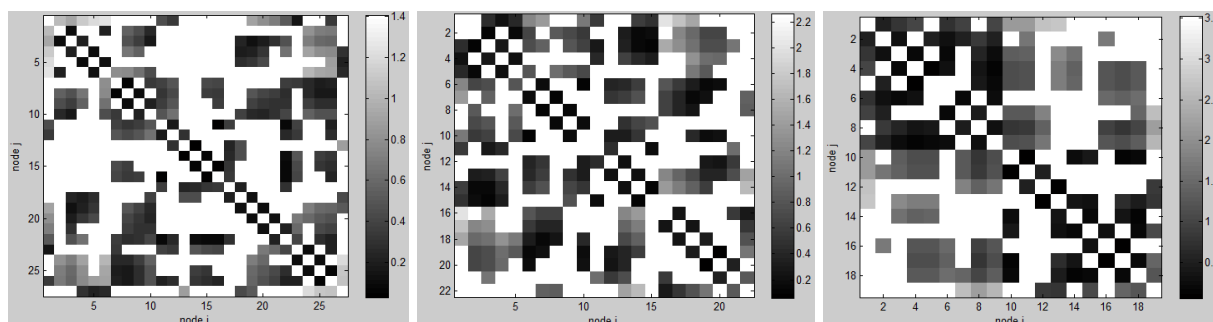
Εικόνα 4.11. Αποτελέσματα πίνακα γεινιάσης για τα σημεία ενδιαφέροντος για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.

Εδώ (Εικ. 4.11) απεικονίζεται η συνδεσιμότητα μεταξύ των σημείων ενδιαφέροντος. Συγκεκριμένα, η εικόνα είναι διαχωρισμένη σε κελιά (όσα και αυτά που δημιουργήθηκαν από το αρχικό πλέγμα), όπου το κάθε ένα αντιπροσωπεύει την μικρότερη Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των κόμβων ενδιαφέροντος, δείχνοντας ουσιαστικά ποια σημεία έχουν μικρότερη απόσταση μεταξύ τους.



**Εικόνα 4.12.** Αποτελέσματα βελτιστοποιημένης διαδρομής για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.

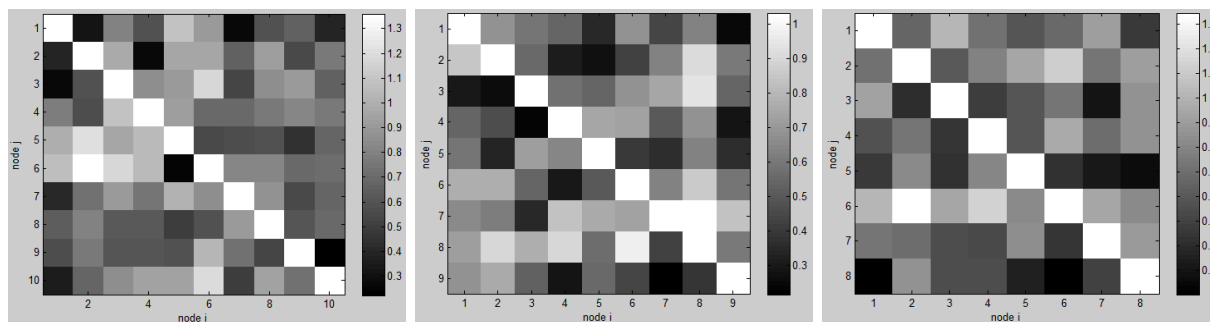
Εδώ (Εικ. 4.12) παρουσιάζεται η βελτιστοποιημένη διαδρομή που υπολογίστηκε, λαμβάνοντας υπόψη μόνο την Ευκλείδεια Απόσταση, με την βέλτιστη διαδρομή να εμφανίζεται με μαύρη γραμμή.



**Εικόνα 4.13.** Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης με αποστάσεις για τον ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.

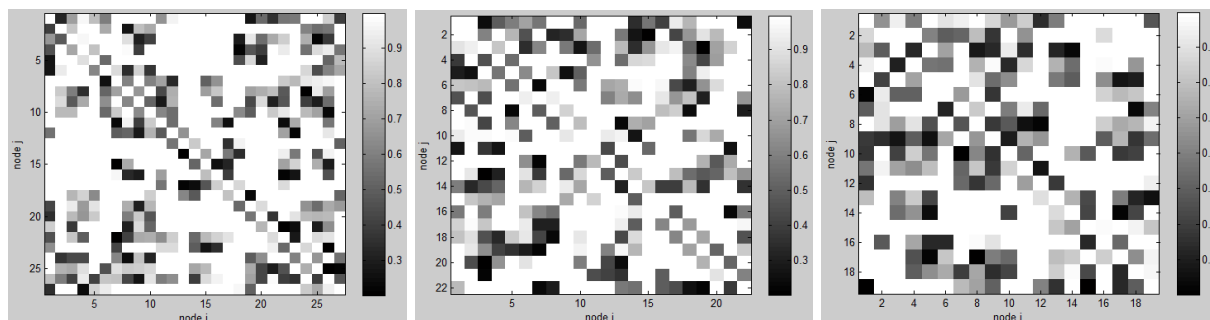
Ακολούθως, η παραπάνω εικόνα (Εικ. 4.13) παρουσιάζει τις αποστάσεις μεταξύ όλων των σημείων, εντοπίζοντας ταυτόχρονα και τα σημεία στα οποία δεν υπάρχει συνδεσιμότητα.





Εικόνα 4.14. Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για τα σημεία ενδιαφέροντος του ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβாகιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση τον ΔΚΔΒ.

Εν συνεχεία, η παραπάνω εικόνα (Εικ. 4.14) εμφανίζει το ΔΚΔΒ μεταξύ μόνο των σημείων ενδιαφέροντος σε κλίμακα του γκρι, με τις υψηλότερες τιμές να υποδεικνύουν τις διαδρομές με την μεγαλύτερη τιμή ΔΚΔΒ χωρίς να λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό της βέλτιστης διαδρομής.



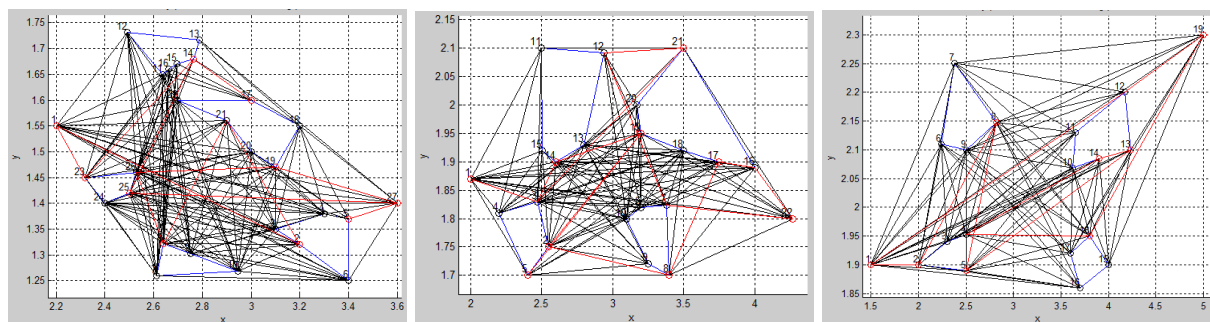
Εικόνα 4.15. Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για όλα τα σημεία του ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβாகιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση τον ΔΚΔΒ.

Τέλος, η παραπάνω εικόνα (Εικ. 4.15) εμφανίζει το ΔΚΔΒ μεταξύ όλων των σημείων σε κλίμακα του γκρι, με τις υψηλότερες τιμές να υποδεικνύουν τις διαδρομές με την μεγαλύτερη τιμή ΔΚΔΒ χωρίς να λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό της βέλτιστης διαδρομής.

## 2<sup>ο</sup> σενάριο

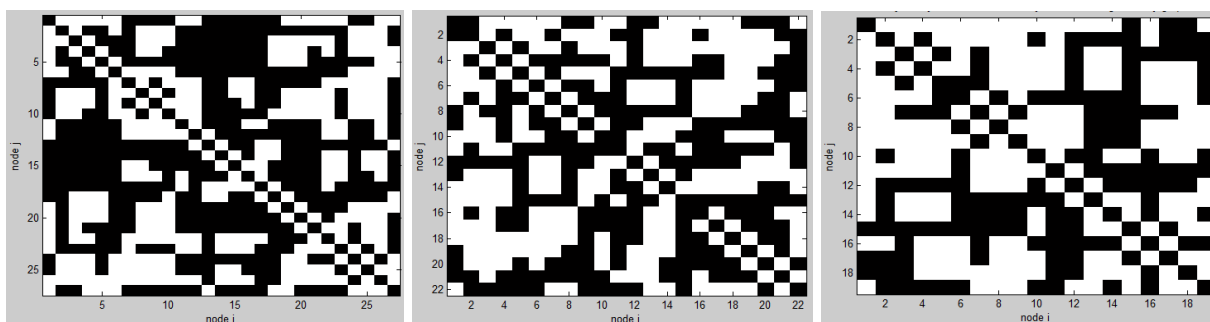
Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με αυτή του 1<sup>ου</sup> σεναρίου με τη διαφορά ότι η εύρεση της βέλτιστης διαδρομής γίνεται με βάση το ΔΚΔΒ μόνο. Ειδικότερα, αυτά που θα τροποποιηθούν είναι ο μέγιστος αριθμός των γενεών που θα εκτελεστούν από 200 στα 300 και ότι η μετρική που θα ληφθεί υπόψη στο συγκεκριμένο σενάριο είναι αυτή του ΔΚΔΒ, οπότε θα πάρει την τιμή 1 ενώ αντίστοιχα η μετρική της Ευκλείδειας απόστασης την τιμή 0.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα του κώδικα του συγκεκριμένου σεναρίου για τα υπό εξέταση αγροτεμάχια.



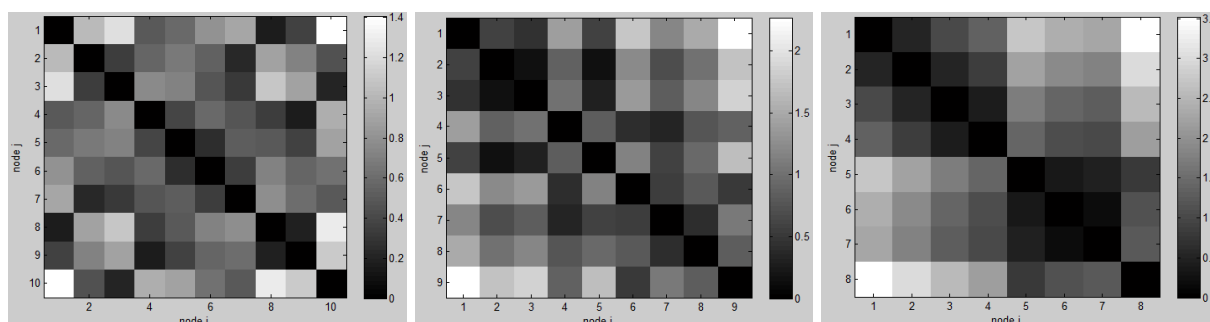
Εικόνα 4.16. Αποτελέσματα κώδικα για ΓΟ και συντομότερη διαδρομή για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση τον ΔΚΔΒ.

Η παραπάνω εικόνα (Εικ. 4.16) απεικονίζει τον ΓΟ με τα σημεία ενδιαφέροντος. Ειδικότερα, εμφανίζονται τα εμπόδια (με μπλε γραμμές), τα σημεία ενδιαφέροντος (με κόκκινες κουκίδες), οι συνδέσεις μεταξύ των σημείων ενδιαφέροντος και των κορυφών των εμποδίων καθώς και η τελική διαδρομή με βάση το συνδυασμό των αλγορίθμων Floyd-Warshall, Ντάικστρα και ΓΑ.



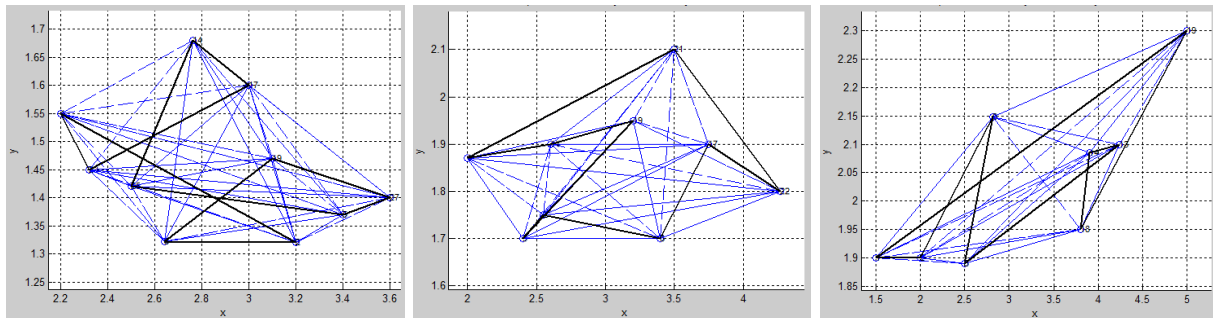
Εικόνα 4.17. Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για τον ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.

Η παραπάνω εικόνα (Εικ. 4.17) απεικονίζει τη συνδεσιμότητα μεταξύ των σημείων στον ΓΟ. Ειδικότερα, τα σημεία που συνδέονται μεταξύ τους είναι με λευκό χρώμα ενώ αυτά που παρουσιάζουν μη συνδεσιμότητα με μαύρο.



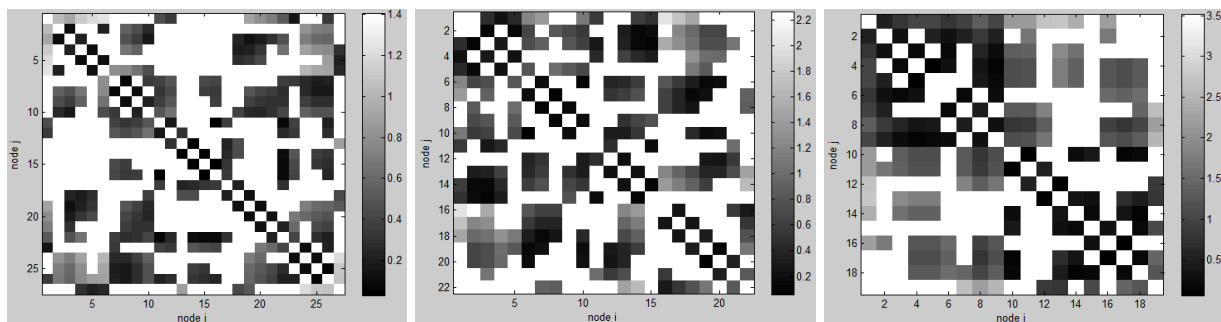
Εικόνα 4.18. Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για τα σημεία ενδιαφέροντος για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.

Εδώ (Εικ. 4.18) απεικονίζεται η συνδεσιμότητα μεταξύ των σημείων ενδιαφέροντος. Συγκεκριμένα, η εικόνα είναι διαχωρισμένη σε κελιά (όσα και αυτά που δημιουργήθηκαν από το αρχικό πλέγμα), όπου το κάθε ένα αντιπροσωπεύει την μικρότερη Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των κόμβων ενδιαφέροντος, δείχνοντας ουσιαστικά ποια σημεία έχουν μικρότερη απόσταση μεταξύ τους, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό της βέλτιστης διαδρομής.



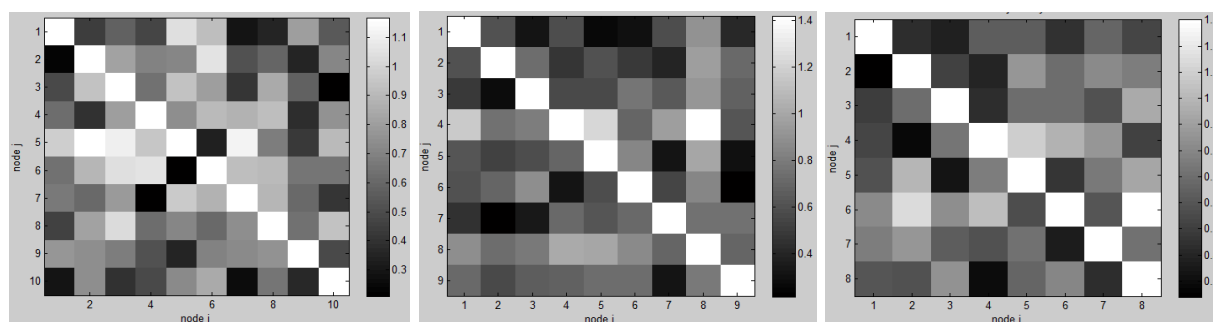
**Εικόνα 4.19.** Αποτελέσματα βελτιστοποιημένης διαδρομής για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβாகιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.

Εδώ (Εικ. 4.19) παρουσιάζεται η βελτιστοποιημένη διαδρομή που υπολογίστηκε, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τον ΔΚΔΒ, με την βέλτιστη διαδρομή να εμφανίζεται με μαύρη γραμμή.



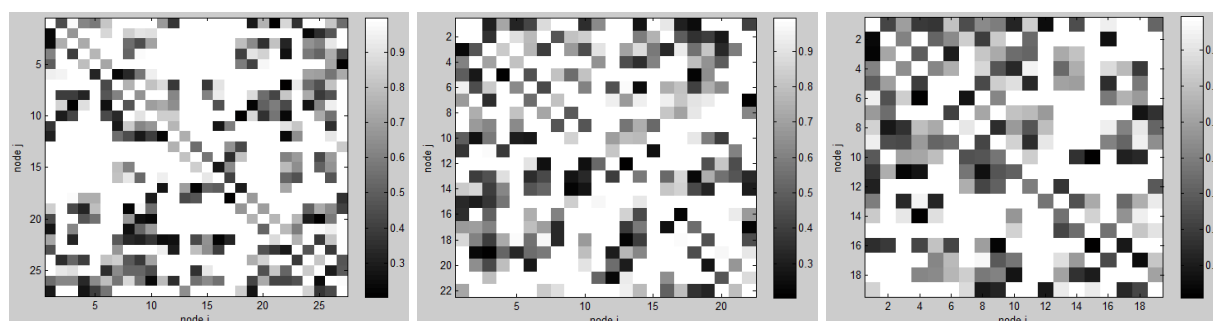
**Εικόνα 4.20.** Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης με αποστάσεις για τον ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβாகιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.

Ακολούθως, η παραπάνω εικόνα (Εικ. 4.20) παρουσιάζει τις αποστάσεις μεταξύ όλων των σημείων, εντοπίζοντας ταυτόχρονα και τα σημεία στα οποία δεν υπάρχει συνδεσιμότητα, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό της βέλτιστης διαδρομής.



**Εικόνα 4.21.** Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για τα σημεία ενδιαφέροντος του ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβாகιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση τον ΔΚΔΒ.

Εν συνεχεία, η παραπάνω εικόνα (Εικ. 4.21) εμφανίζει το ΔΚΔΒ μεταξύ μόνο των σημείων ενδιαφέροντος σε κλίμακα του γκρι, με τις υψηλότερες τιμές να υποδεικνύουν τις διαδρομές με την μεγαλύτερη τιμή ΔΚΔΒ.



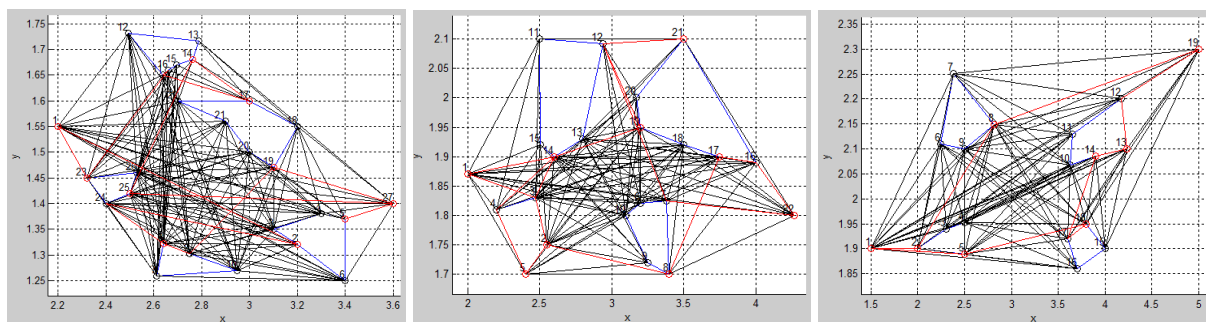
**Εικόνα 4.22.** Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για όλα τα σημεία του ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβாகιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση τον ΔΚΔΒ.

Τέλος, η παραπάνω εικόνα (Εικ. 4.22) εμφανίζει το ΔΚΔΒ μεταξύ όλων των σημείων σε κλίμακα του γκρι, με τις υψηλότερες τιμές να υποδεικνύουν τις διαδρομές με την μεγαλύτερη τιμή ΔΚΔΒ.

### 3<sup>ο</sup> σενάριο

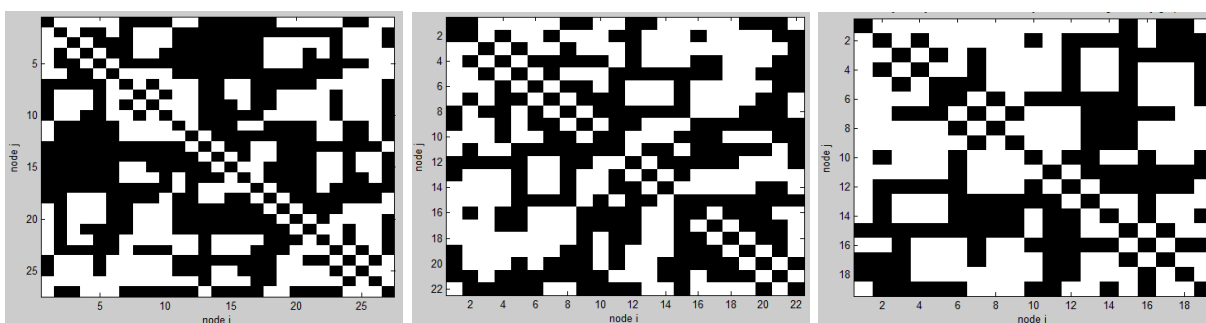
Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με αυτή των προηγούμενων 2 σεναρίων με τη διαφορά ότι η εύρεση της βέλτιστης διαδρομής γίνεται με βάση τον συνδυασμό και των 2 μετริกών, της Ευκλείδειας απόστασης και του ΔΚΔΒ. Πιο συγκεκριμένα, αυτά που θα τροποποιηθούν είναι ο μέγιστος αριθμός των γενεών που θα εκτελεστούν από 300 στα 500 και ότι θα ληφθούν υπόψη στο συγκεκριμένο σενάριο και οι 2 μετρικές, οπότε η Ευκλείδεια απόσταση θα πάρει την τιμή 0,4 ενώ αντίστοιχα η μετρική του ΔΚΔΒ την τιμή 0,6.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα του κώδικα του συγκεκριμένου σεναρίου για τα υπό εξέταση αγροτεμάχια.



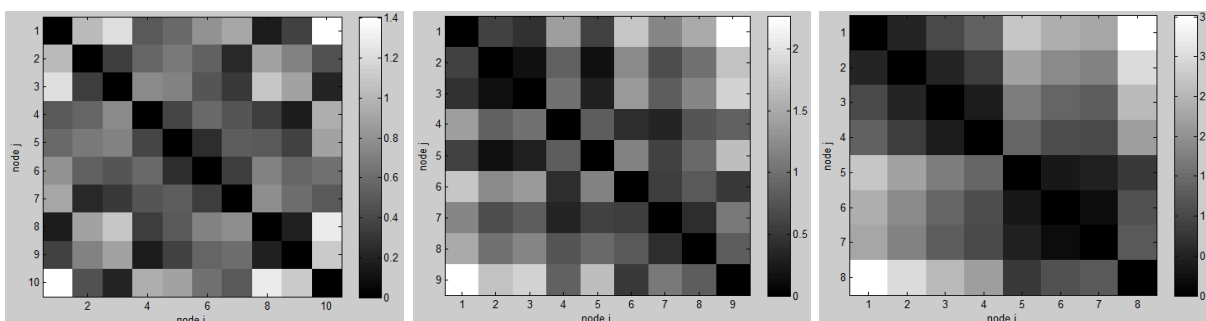
Εικόνα 4.23. Αποτελέσματα κώδικα για ΓΟ και συντομότερη διαδρομή για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση και τις 2 μετρικές.

Η παραπάνω εικόνα (Εικ. 4.23) απεικονίζει τον ΓΟ με τα σημεία ενδιαφέροντος. Ειδικότερα, εμφανίζονται τα εμπόδια (με μπλε γραμμές), τα σημεία ενδιαφέροντος (με κόκκινες κουκίδες), οι συνδέσεις μεταξύ των σημείων ενδιαφέροντος και των κορυφών των εμποδίων καθώς και η τελική διαδρομή με βάση το συνδυασμό των αλγορίθμων Ντάικστρα, Floyd-Warshall και ΓΑ.



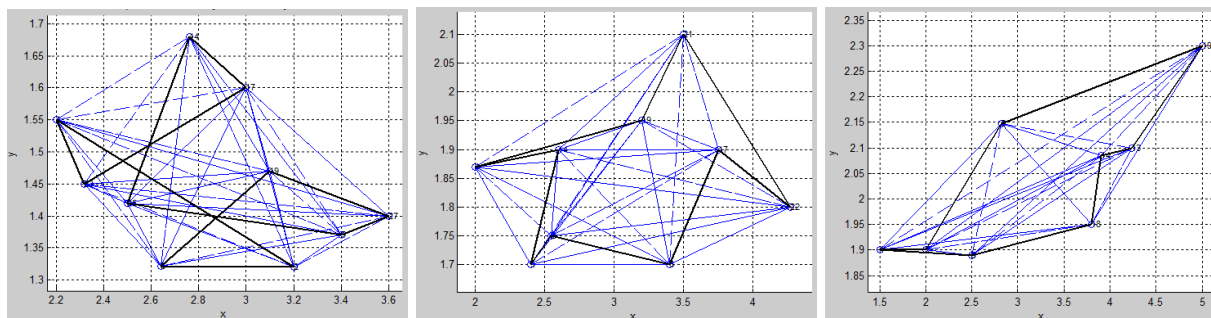
Εικόνα 4.24. Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για τον ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.

Η παραπάνω εικόνα (Εικ. 4.24) απεικονίζει τη συνδεσιμότητα μεταξύ των σημείων στον ΓΟ. Ειδικότερα, τα σημεία που συνδέονται μεταξύ τους είναι με λευκό χρώμα ενώ αυτά που παρουσιάζουν μη συνδεσιμότητα με μαύρο.



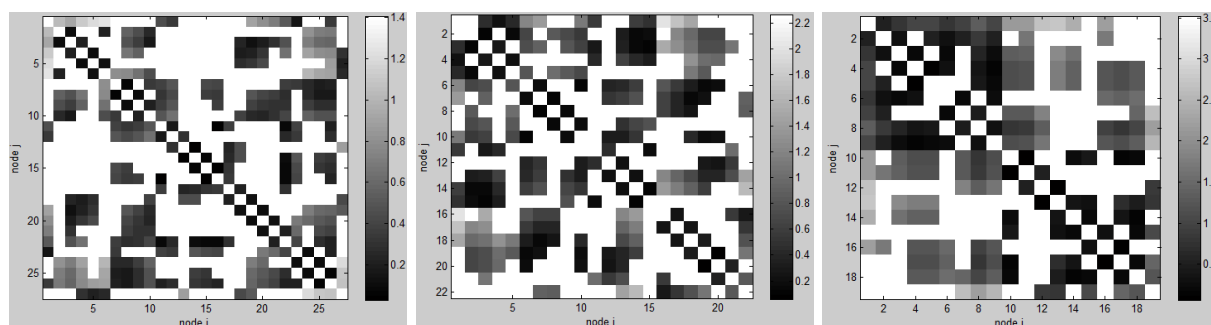
Εικόνα 4.25. Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για τα σημεία ενδιαφέροντος για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.

Εδώ (Εικ. 4.25) απεικονίζεται η συνδεσιμότητα μεταξύ των σημείων ενδιαφέροντος. Συγκεκριμένα, η εικόνα είναι διαχωρισμένη σε κελιά (όσα και αυτά που δημιουργήθηκαν από το αρχικό πλέγμα), όπου το κάθε ένα αντιπροσωπεύει την μικρότερη Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των κόμβων ενδιαφέροντος, δείχνοντας ουσιαστικά ποια σημεία έχουν μικρότερη απόσταση μεταξύ τους, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό της βέλτιστης διαδρομής.



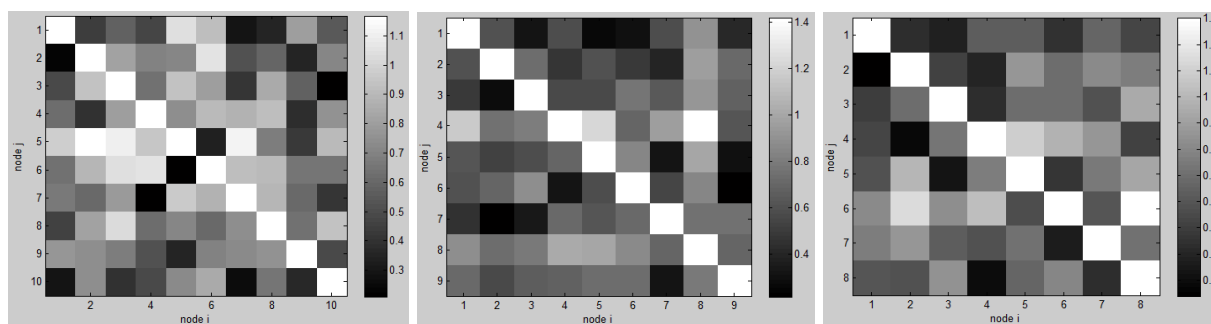
**Εικόνα 4.26.** Αποτελέσματα βελτιστοποιημένης διαδρομής για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβாகιού και κτηνοτροφικού κουνιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.

Εδώ (Εικ. 4.26) παρουσιάζεται η βελτιστοποιημένη διαδρομή που υπολογίστηκε, λαμβάνοντας υπόψη και τις 2 μετρικές, της Ευκλείδειας απόστασης και του ΔΚΔΒ.



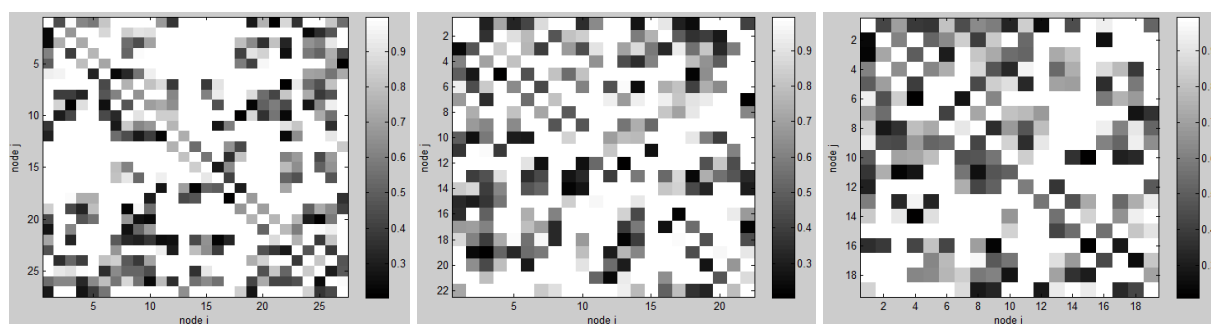
**Εικόνα 4.27.** Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης με αποστάσεις για τον ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβாகιού και κτηνοτροφικού κουνιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση την Ευκλείδεια απόσταση.

Ακολούθως, η παραπάνω εικόνα (Εικ. 4.27) παρουσιάζει τις αποστάσεις μεταξύ όλων των σημείων, εντοπίζοντας ταυτόχρονα και τα σημεία στα οποία δεν υπάρχει συνδεσιμότητα.



**Εικόνα 4.28.** Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για τα σημεία ενδιαφέροντος του ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση τον ΔΚΔΒ.

Εν συνεχεία, η παραπάνω εικόνα (Εικ. 4.28) εμφανίζει το ΔΚΔΒ μεταξύ μόνο των σημείων ενδιαφέροντος σε κλίμακα του γκρι, με τις υψηλότερες τιμές να υποδεικνύουν τις διαδρομές με την μεγαλύτερη τιμή ΔΚΔΒ.



**Εικόνα 4.29.** Αποτελέσματα πίνακα γειτνίασης για όλα τα σημεία του ΓΟ για τα 3 υπό εξέταση αγροτεμάχια σιταριού, βαμβακιού και κτηνοτροφικού κουκιού (από αριστερά προς τα δεξιά), με βάση τον ΔΚΔΒ.

Τέλος, η παραπάνω εικόνα (Εικ. 4.29) εμφανίζει το ΔΚΔΒ μεταξύ όλων των σημείων σε κλίμακα του γκρι, με τις υψηλότερες τιμές να υποδεικνύουν τις διαδρομές με την μεγαλύτερη τιμή ΔΚΔΒ.

Παρουσιάζονται 3 περιπτώσεις σύγκλισης της συνάρτησης κόστους:

- α) Ευκλείδεια απόσταση,
- β) ΔΚΔΒ και
- γ) Συνδυασμός των 2 παραπάνω.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται ότι ο συγκεκριμένος συνδυασμός Ντάικστρα, Floyd-Warshall και ΓΑ, σε συνδυασμό με τις 2 μετρικές της Ευκλείδειας απόστασης και του ΔΚΔΒ, λύνοντας το ΠΠΠ, βρίσκει την βέλτιστη διαδρομή που θα πρέπει να ακολουθήσει ένα ψευδοαστικό ΜηΕΑ, πηγαίνοντας στις περιοχές ενδιαφέροντος, δηλαδή σε αυτές με το μικρότερο ΔΚΔΒ, ξεκινώντας από το μικρότερο ΔΚΔΒ προς το μεγαλύτερο, με υψηλότερο ωστόσο κόστος διαδρομής συγκριτικά με τα άλλα δύο σενάρια.



Πιο αναλυτικά, η διαδρομή που δημιουργείται χρησιμοποιώντας μόνο την Ευκλείδεια απόσταση παρουσιάζει μεγάλη πυκνότητα συνδέσεων λόγω της συγκεκριμένης μετρικής, η διαδρομή που δημιουργείται χρησιμοποιώντας μόνο τον ΔΚΔΒ μέτρια ενώ ο συνδυασμός και των 2 χαμηλή. Επιπλέον, το υπολογιστικό κόστος χρησιμοποιώντας μόνο την Ευκλείδεια απόσταση είναι χαμηλό, η διαδρομή που δημιουργείται χρησιμοποιώντας μόνο τον ΔΚΔΒ μέτριος ενώ ο συνδυασμός και των 2 υψηλός.

Εν συνεχεία, όσον αφορά την καταλληλότητά τους για την χρήση σε πλοήγηση, η χρήση μόνο της Ευκλείδειας απόστασης δεν ενδείκνυται διότι αγνοεί τα εμπόδια, η χρήση μόνο του ΔΚΔΒ είναι καλή γιατί η διαδρομή που δημιουργείται είναι πιο ρεαλιστική λόγω της παραμέτρου της βλάστησης που λαμβάνεται υπόψη ενώ ο συνδυασμός και των 2 είναι άριστος διότι αυξάνει την εγκυρότητα της διαδρομής καθώς οι συνδέσεις μεταξύ των σημείων φιλτράρονται 2 φορές λόγω των μετρικών. Επίσης ο συνδυασμός και των 2 μετρικών καθιστά τον συγκεκριμένο κώδικα πιο αυστηρό σε σχέση με τα άλλους 2 άρα και με μεγαλύτερη ακρίβεια στο τελικό αποτέλεσμα, την διαδρομή. Τέλος, με τον συνδυασμό και των 2 μετρικών αποφεύγεται η υπερσύνδεση, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της Ευκλείδειας απόστασης, καθώς και οι απομονώσεις σημείων ενδιαφέροντος χωρίς λόγω, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του ΔΚΔΒ.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας (Πίν. 4.1) με τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των 3 σεναρίων.

**Πίνακας 4.1.** Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των 3 σεναρίων.

Κριτήριο	Μόνο Ευκλείδεια Απόσταση (w1=1, w2=0)	Μόνο NDVI (w1=0, w2=1)	Συνδυασμός (π.χ. w1=0.4, w2=0.6)
Πυκνότητα συνδέσεων	Μεγάλη	Μέτρια	Χαμηλή
Κατανάλωση Πόρων	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή
Υπολογιστικό κόστος	Υψηλό	Μέτριο	Χαμηλό
Τελική Διαδρομή	Μικρότερη απόσταση	Ίσως μεγάλη διαδρομή/χαμηλό NDVI	Εξισορρόπηση διαδρομής & NDVI
Πλεονέκτημα	Πιο σύντομη διαδρομή	Περιβαλλοντικά φιλική διαδρομή	Ευέλικτος συμβιβασμός
Μειονέκτημα	Αγνοεί περιβαλλοντικούς παράγοντες	Πιθανώς μεγάλη διαδρομή	Περίπλοκη παραμετροποίηση
Αξιοπιστία για ρομποτική/πλοήγηση	Χαμηλή (αγνοεί εμπόδια)	Καλή	Άριστη
Εφαρμογή στη Γεωργία/Περιβάλλον	Κατάλληλο για αποστολές με περιορισμένο χρόνο	Προτιμάται σε ευαίσθητες περιοχές	Ευέλικτο για πολλαπλά κριτήρια

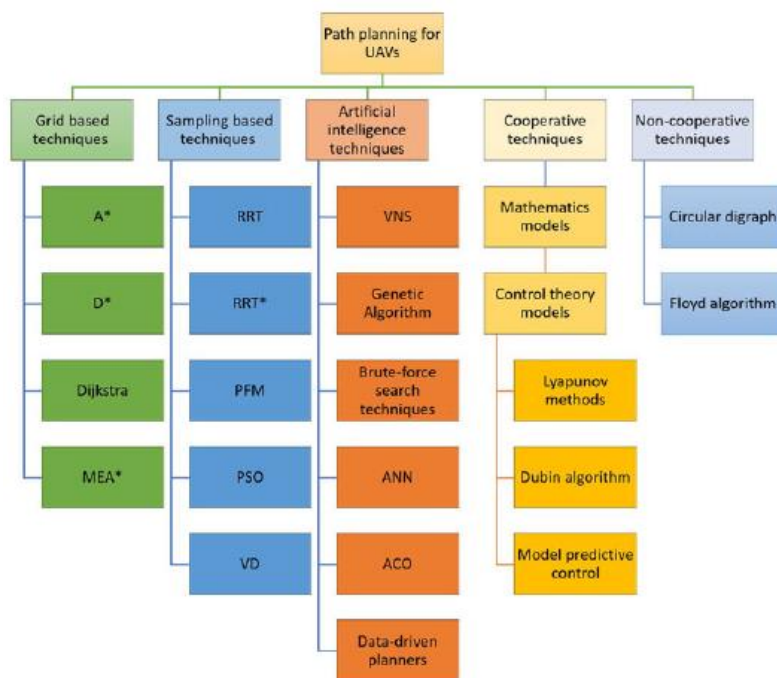
Συμπερασματικά, με την χρήση της Ευκλείδειας απόστασης και του ΔΚΔΒ το κόστος της διαδρομής είναι χαμηλό συγκριτικά με τις διαδρομές που δημιουργούνται μόνο με βάση την μετρική Ευκλείδεια απόσταση ή μόνο με βάση τον ΔΚΔΒ ενώ είναι πιο ακριβές και αξιόπιστο.



### 4.3. Συζήτηση

Στον τομέα της ΓΑΚΡ, ο σχεδιασμός διαδρομής αποτελεί ένα κρίσιμο στάδιο για την αποτελεσματική και αποδοτική λειτουργία των οχημάτων που χρησιμοποιούνται στη γεωργία. Η βελτιστοποίηση των τροχιών των οχημάτων συμβάλλει στη μείωση του χρόνου, της κατανάλωσης καυσίμων και κόστους, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει την ακρίβεια και την ομαλή εκτέλεση των γεωργικών εργασιών.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές σχεδιασμού διαδρομής που χρησιμοποιούνται ευρέως με σκοπό την βελτιστοποίηση των τροχιών (Εικ. 4.30), ωστόσο στη ΓΑΚΡ είναι αρκετά περιορισμένος ο αριθμός αυτών. Ειδικότερα, οι πιο κοινά χρησιμοποιούμενες τεχνικές σχεδιασμού διαδρομής στη ΓΑ είναι οι Ντάικστρα, ΒΣΣ, ΓΑ, ΤΝΔ, ΓΕΤΔ\*, ΒΑΜ, ΔΒ και Α\*, κάθε μία από τις οποίες παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (Πίν. 10) και επιλέγονται ανάλογα με τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου συστήματος και του περιβάλλοντος όπου θα εφαρμοστούν. Ο συνδυασμός διαφορετικών τεχνικών σχεδιασμού διαδρομής μπορεί να οδηγήσει σε ακόμη πιο βελτιστοποιημένα αποτελέσματα, κάτι το οποίο θα βοηθήσει στην επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας και παραγωγικότητας στη ΓΑΚΡ.



**Εικόνα 4.30.** Τεχνικές σχεδιασμού διαδρομής που έχουν χρησιμοποιηθεί έως σήμερα (με παραλλαγές) για τον σχεδιασμό διαδρομών μέσω ΜηΕΑ (Basiri *et al.*, 2022).

Πίνακας 4.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυριότερων τεχνικών που έχουν χρησιμοποιηθεί στον τομέα της ΓΑΚΡ.

A/A	Αλγόριθμος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Βιβλιογραφική αναφορά
1	Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (ΒΣΣ)	Εύκολος στην εφαρμογή, γρήγορη σύγκλιση	Ευκολία στην εισαγωγή τοπικού βέλτιστου για πολύπλοκα προβλήματα υψηλών διαστάσεων	Wang & Pan (2021)
2	Γενετικός Αλγόριθμος (ΓΑ)	Ικανότητα επίλυσης NP (μη ντετερμινιστικά πολύνυμα), δύσκολα και με πολλαπλά κριτήρια προβλήματα	Υψηλή χρονική πολυπλοκότητα, πρόωρη σύγκλιση	Tsai <i>et al.</i> (2006)
3	Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (ΤΝΔ)	Εξαιρετική ικανότητα εκμάθησης, καλή ισχύς	Κακή ικανότητα γενίκευσης	Fu <i>et al.</i> (2018)
4	Γρήγορη Εξερεύνηση Τυχαίου Δέντρου Άστρο (ΓΕΤΔ★)	Βέλτιστη λύση χωρίς σύγκρουση και ασυμπτωτική για πολλά προβλήματα σχεδιασμού διαδρομής, δυνατότητα απόκτησης μίας εφικτούς διαδρομής υψηλής ποιότητας σε συντομότερο χρόνο	Μη δυνατότητα γρήγορης εύρεσης αξιόπιστης διαδρομής σε ένα πολύπλοκο περιβάλλον με πολλά εμπόδια, χαμηλή αποδοτικότητα αναζήτησης, χαμηλή απόδοση δειγματοληψίας και αργός ρυθμός σύγκλισης σε περιβάλλον με μεγάλους διαδρόμους	Yang, Pan & Wan (2019), Ding <i>et al.</i> (2023)
5	Ντάικστρα	Εύκολη υλοποίηση	Υψηλή χρονική πολυπλοκότητα, μόνο για στατικό περιβάλλον	Dijkstra <i>et al.</i> (2022)
6	Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών (BAM)	Ισχυρά θετικά σχόλια, υψηλή απόδοση αναζήτησης	Μεγάλος αριθμός επαναλήψεων, αργή ταχύτητα σύγκλισης, ευκολία στο να πέσει στο τοπικό βέλτιστο	Tang & Ma (2021), Wang & Pan (2021)
7	Α Άστρο (Α★)	Δυνατότητα γρήγορης αναζήτησης	Μόνο σε στατικό περιβάλλον, μεγάλη χρονική επιβάρυνση, μη ομαλότητα	Hart, Nilsson & Raphael (1968)

Οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν έναν ΓΑ είναι αρκετοί, ορισμένοι από τους οποίους είναι το πρόβλημα του χρόνου, η αδυναμία όσον αφορά την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής. Επίσης, το μέγεθος του πληθυσμού, η μέθοδος επιλογής γονέων, το περιβάλλον, ο αριθμός των πόρων (μνήμη, επεξεργαστική ισχύς, χρόνος), αποτελούν επιπλέον παράγοντες.

Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας νέος κώδικας ΓΑ, σε συνδυασμό με Floyd-Warshall και Ντάικστρα, πλήρως λειτουργικός στο περιβάλλον της MATLAB με σκοπό τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος βέλτιστης τροχιάς ενός ΜηΕΑ σε ένα αγροτεμάχιο με εμπόδια, για την διασφάλιση του αποτελεσματικού ψεκασμού μίας καλλιέργειας σε περιοχές ενδιαφέροντος.

Προκειμένου να επικυρωθεί το αξίωμά μας, εφαρμόστηκε σε διαφορετικά περιβάλλοντα με διαφορετικές καλλιέργειες και συγκρίθηκε βιβλιογραφικά με αλγορίθμους που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον σκοπό αυτό. Ειδικότερα, στις Εικόνες 30-32 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα του ΓΑ και για τις 3 υπό εξέταση καλλιέργειες (σιτάρι, βαμβάκι, κτηνοτροφικό κουκί), τα οποία αποδεικνύουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος Ντάικστρα, Floyd-Warshall και ΓΑ, βρίσκει τη βέλτιστη διαδρομή με διαφορετικό κόστος κάθε φορά ανάλογα την συνάρτηση καταλληλότητας που θα χρησιμοποιηθεί.

Βιβλιογραφικά, η πλειονότητα των προβλημάτων σχεδιασμού διαδρομής κάνοντας επίσκεψη σε πολλαπλά σημεία ενδιαφέροντος έχουν επιλυθεί με την χρήση αλγορίθμων όπως Ντάικστρα ή  $A^*$ .

Συμπερασματικά, η βελτιστοποίηση των τροχιών των οχημάτων στη ΓΑΚΡ βασίζεται σε μία σειρά από τεχνικές σχεδιασμού διαδρομής προσαρμοσμένες στις μοναδικές απαιτήσεις πεδίου. Μέθοδοι που βασίζονται σε πλέγμα, διαγράμματα Βορονόϊ, μέθοδοι δυνητικού πεδίου, προσεγγίσεις βασισμένες σε γράφους, τεχνικές Μηχανικής μάθησης και βελτιστοποίησης, Ευφυΐα πολλαπλών παραγόντων και σμήνους, Δυναμικός και προσαρμοστικός σχεδιασμός καθώς και Υβριδικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται συνήθως για τη βελτιστοποίηση των τροχιών των οχημάτων στη ΓΑΚΡ. Με τη χρήση αυτών των τεχνικών, οι γεωργικές δραστηριότητες μπορούν να επιτύχουν αποτελεσματική κάλυψη, στοχευμένες παρεμβάσεις και βελτιωμένη κατανομή πόρων, συμβάλλοντας στη βελτίωση της διαχείρισης και της παραγωγικότητας των καλλιεργειών.

#### 4.4. Σύνοψη κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε ανάλυση της χρήσης των Ντάικστρα, Floyd-Warshall και ΓΑ στη ΓΑΚΡ, παρουσιάζοντας την εισαγωγή, τη λειτουργία τους, καθώς και τη διαδικασία υλοποίησης του πειραματικού μέρους της έρευνας, των αποτελεσμάτων που προέκυψαν και τη συζήτηση. Στο επόμενο κεφάλαιο, που αποτελεί τον επίλογο, θα συνοψιστούν τα κύρια σημεία της έρευνας και θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Επίλογος

Ο σχεδιασμός διαδρομής κάλυψης σε γεωργικές εφαρμογές είναι ένα κρίσιμο έργο για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και τη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας (Höffmann & Büskens, 2023).

Ένα από τα κύρια ζητήματα κατά την έναρξη του σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης είναι ο εντοπισμός των συγκεκριμένων στόχων που πρέπει να βελτιστοποιηθούν στη συγκεκριμένη εφαρμογή τους. Καθορίζοντας αυτούς τους στόχους, οι αγρότες και οι ερευνητές μπορούν να επικεντρώσουν τις προσπάθειές τους στην αποτελεσματική επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων (Höffmann & Büskens, 2023).

Τα ΜηΕΑ που χρησιμοποιούνται στον γεωργικό τομέα έχουν λάβει μεγάλη προσοχή τα τελευταία χρόνια, με τους ερευνητές που σχετίζονται με αυτά να έχουν επίσης πραγματοποιήσει αρκετή έρευνα, κυρίως στο κομμάτι της φυτοπροστασίας. Ωστόσο, όσον αφορά τον σχεδιασμό διαδρομής με τη χρήση ΜηΕΑ, για την ώρα η έρευνα επικεντρώνεται κατά κύριο λόγο στο ποσοστό κάλυψης και την αποτελεσματικότητα λειτουργίας του βαθμού ρύθμισης των γεωργικών εκτάσεων (Tian *et al.*, 2023).

Γενικά, η βελτιστοποίηση των τροχιών των οχημάτων στη ΓΑ βασίζεται σε μία σειρά από αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό διαδρομής, προσαρμοσμένοι στις μοναδικές απαιτήσεις του πεδίου. Ειδικότερα, οι αλγόριθμοι επιλέγονται ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος και του περιβάλλοντος όπου θα εφαρμοστούν. Ο συνδυασμός διαφορετικών αλγορίθμων ή τεχνικών σχεδιασμού διαδρομής μπορεί να οδηγήσει σε ακόμη πιο βελτιστοποιημένα αποτελέσματα κάτι το οποίο θα βοηθήσει στην επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας και παραγωγικότητας στη ΓΑΚΡ. Έτσι, με τη χρήση αυτών των τεχνικών οι γεωργικές δραστηριότητες μπορούν να επιτύχουν αποτελεσματική κάλυψη, στοχευμένες παρεμβάσεις και βελτιωμένη κατανομή πόρων, συμβάλλοντας στη βελτίωση της διαχείρισης και της παραγωγικότητας των καλλιεργειών.

Με βάση τους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται έως τώρα για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής στον τομέα της ΓΑΚΡ, ο ΓΑ θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι μία καλή επιλογή για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής, λύνοντας παράλληλα το ΠΠΠ πρόβλημα. Ωστόσο, σε συνδυασμό με άλλους αλγορίθμους όπως ο Ντάικστρα και ο Floyd-Warshall βλέπουμε ότι μπορεί να επιτύχει ακόμη καλύτερα αποτελέσματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Σύνοψη

Σε αυτή τη μεταπτυχιακή διατριβή έγινε μία προσπάθεια για δημιουργία και παρουσίαση ολοκληρωμένου συστήματος βέλτιστης τροχιάς ενός ΜηΕΑ σε 3 αγροτεμάχια μέσω της χρήσης ΓΑ, σε συνδυασμό με Floyd-Warshall και Ντάικστρα, για τη διασφάλιση του αποτελεσματικού ψεκασμού διαφορετικών ειδών καλλιεργειών σε περιοχές ενδιαφέροντος. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε μία εισαγωγή των κυριότερων εννοιών και εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν αλλά και του σκοπού αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής.

Ακολούθως έγινε εκτενή ανάλυση του δείκτη ΔΚΔΒ, του ΓΟ, της αναπαράστασης χαρτών καθώς και της συσχέτισης μεταξύ Γράφου και ΔΚΔΒ, καταδεικνύοντας πώς η συνδυασμένη χρήση αυτών των εργαλείων μπορεί να βελτιώσει τη διαχείριση και την ανάλυση της βλάστησης.

Εν συνεχεία, αναφερθήκαμε στο πρόβλημα βελτιστοποίησης με σκοπό την επίλυση του ΠΠΠ μέσω της χρήσης ΓΑ ενώ παρουσιάστηκαν οι κυριότεροι αλγόριθμοι που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς στη ΓΑΚΡ σχετικά με τον σχεδιασμό διαδρομής με έμφαση στους Ντάικστρα, Floyd-Warshall και ΓΑ που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη διατριβή.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της δημιουργίας βέλτιστου σχεδιασμού διαδρομής, παρουσιάζοντας την εισαγωγή, τη λειτουργία τους, καθώς και τη διαδικασία υλοποίησης του πειραματικού μέρους της έρευνας, των αποτελεσμάτων και της συζήτησης γύρω από αυτά που προέκυψαν ενώ στον επίλογο συνοψίστηκαν τα αποτελέσματα της έρευνας.

Με βάση όλα τα παραπάνω, θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο συγκεκριμένος τομέας χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και έτσι χρειάζεται να γίνει μεγαλύτερη έρευνα πάνω στο κομμάτι της εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής στον τομέα της ΓΑΚΡ με την χρήση κατάλληλων αλγορίθμων (Basiri *et al.*, 2022). Ειδικότερα, στην έρευνα των ΜηΕΑ με πολλαπλούς ρότορες για χρήση τους στον τομέα της φυτοπροστασίας, ο σχεδιασμός βέλτιστης διαδρομής είναι μία από τις βασικές τεχνολογίες που πρέπει να επιλυθούν επείγοντως (Lan *et al.*, 2017, Zhou *et al.*, 2017, Tian *et al.*, 2023). Επιπλέον θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί το κομμάτι της ενέργειας με παράλληλη ελαχιστοποίηση του κινδύνου σύγκρουσης μεταξύ ενός ΜηΕΑ με πολλαπλούς ρότορες με κάποιο αντικείμενο ή φυσικό εμπόδιο (Bortoff, 2000, Yang & Kapila, 2002, Basiri *et al.*, 2022).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### Βιβλιογραφία

- Abdul, W., & Ramachandram, S. (2011). Reliability-aware genetic scheduling algorithm in grid environment. In *2011 International Conference on Communication Systems and Network Technologies* (pp. 673-677). IEEE.
- Acevedo, J. J., Arrue, B. C., Maza, I., & Ollero, A. (2013, November). Cooperative perimeter surveillance with a team of mobile robots under communication constraints. In *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 5067-5072). IEEE.
- Adewole, P., Akinwale, A. T., & Otunbanowo, K. (2011). A genetic algorithm for solving travelling salesman problem.
- Aggarwal, S., & Kumar, N. (2020). Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges. *Computer Communications*, 149, 270-299.
- Ahmad, R., Yang, B., Ettlin, G., Berger, A., & Rodríguez-Bocca, P. (2023). A machine-learning based ConvLSTM architecture for NDVI forecasting. *International Transactions in Operational Research*, 30(4), 2025-2048.
- Ahvanooey, M. T., Li, Q., Wu, M., & Wang, S. (2019). A survey of genetic programming and its applications. *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, 13(4), 1765-1794.
- Amani, S., & Shafizadeh-Moghadam, H. (2023). A review of machine learning models and influential factors for estimating evapotranspiration using remote sensing and ground-based data. *Agricultural Water Management*, 284, 108324.
- Amidon, E. L., & Elsner, G. H. (1968). Delineating landscape view areas: a computer approach.
- Amjady, N., & Nasiri-Rad, H. (2009). Nonconvex economic dispatch with AC constraints by a new real coded genetic algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(3), 1489-1502.
- Aparicio, N., Villegas, D., Araus, J. L., Casadesus, J., & Royo, C. (2002). Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat. *Crop science*, 42(5), 1547-1555.
- Babel, L. (2019). Coordinated target assignment and UAV path planning with timing constraints. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 94(3), 857-869.
- Barrientos, A., Colorado, J., Cerro, J. D., Martinez, A., Rossi, C., Sanz, D., & Valente, J. (2011). Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots. *Journal of Field Robotics*, 28(5), 667-689.
- Bashir, L. Z., & Hasan, R. S. M. (2015). Solving Banana (Rosenbrock) Function based on fitness function. *World Scientific News*, 6, 41-56.

- Basiri, A., Mariani, V., Silano, G., Aatif, M., Iannelli, L., & Glielmo, L. (2022). A survey on the application of path-planning algorithms for multi-rotor UAVs in precision agriculture. *The Journal of Navigation*, 75(2), 364-383.
- Belea, R., & Beldiman, L. (2003). A new method of gene coding for a genetic algorithm designed for parametric optimization. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle III, Electrotechnics, Electronics, Automatic Control, Informatics*, 26, 61-66.
- Benedikt, M. L. (1979). To take hold of space: isovists and isovist fields. *Environment and Planning B: Planning and design*, 6(1), 47-65.
- Bhandari, A. K., Kumar, A., & Singh, G. K. (2012). Feature extraction using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): A case study of Jabalpur city. *Procedia technology*, 6, 612-621.
- Bhattacharya, D., Misra, S., Pathak, N., & Mukherjee, A. (2020). IDeA: IoT-based autonomous aerial demarcation and path planning for precision agriculture with UAVs. *ACM Transactions on Internet of Things*, 1(3), 1-21.
- Bircher, A., Kamel, M., Alexis, K., Burri, M., Oettershagen, P., Omari, S., ... & Siegwart, R. (2016). Three-dimensional coverage path planning via viewpoint resampling and tour optimization for aerial robots. *Autonomous Robots*, 40, 1059-1078.
- Bisen, D., Mishra, S., & Saurabh, P. (2021). K-means based cluster formation and head selection through artificial neural network in MANET.
- Bodaghie, M. (2024). Providing a Method for Efficient Crossover in Genetic Algorithms with X-method Coding and Its Constraints.
- Bosse, M., Nourani-Vatani, N., & Roberts, J. (2007, April). Coverage algorithms for an under-actuated car-like vehicle in an uncertain environment. In *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 698-703). IEEE.
- Boursianis, A. D., Papadopoulou, M. S., Diamantoulakis, P., Liopa-Tsakalidi, A., Barouchas, P., Salahas, G., ... & Goudos, S. K. (2022). Internet of things (IoT) and agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review. *Internet of Things*, 18, 100187.
- Braaksma, J. P., & Cook, W. J. (1980). Human orientation in transportation terminals. *Transportation Engineering Journal of ASCE*, 106(2), 189-203.
- Bryant, K. (2000). Genetic algorithms and the travelling salesman problem.
- Burrough, P. A. (1986). Principles of geographical. *Information systems for land resource assessment*. Clarendon Press, Oxford.
- Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote sensing of Environment*, 62(3), 241-252.



- Chandrasekar, K., Sesha Sai, M. V. R., Roy, P. S., & Dwevedi, R. S. (2010). Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS Vegetation Index product. *International Journal of Remote Sensing*, 31(15), 3987-4005.
- Chávez, R. O., Clevers, J. G. P. W., Decuyper, M., De Bruin, S., & Herold, M. (2016). 50 years of water extraction in the Pampa del Tamarugal basin: Can *Prosopis tamarugo* trees survive in the hyper-arid Atacama Desert (Northern Chile)? *Journal of Arid Environments*, 124, 292-303.
- Chen, M. C., & Lin, C. P. (2007). A data mining approach to product assortment and shelf space allocation. *Expert Systems with Applications*, 32(4), 976-986.
- Chen, Y., Zhang, H., & Xu, M. (2014, July). The coverage problem in UAV network: A survey. In *Fifth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT)* (pp. 1-5). IEEE.
- Choi, Y. H., Lee, T. K., Baek, S. H., & Oh, S. Y. (2009, October). Online complete coverage path planning for mobile robots based on linked spiral paths using constrained inverse distance transform. In *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 5788-5793). IEEE.
- Chouhan, R., & Rao, N. (2011). Vegetation detection in multispectral remote sensing images: Protective role-analysis of vegetation in 2004 indian ocean tsunami. *PDPM Indian Institute of Information Technology*.
- Cortes, J., Martinez, S., Karatas, T., & Bullo, F. (2004). Coverage control for mobile sensing networks. *IEEE Transactions on robotics and Automation*, 20(2), 243-255.
- Costa, L., Nunes, L., & Ampatzidis, Y. (2020). A new visible band index (vNDVI) for estimating NDVI values on RGB images utilizing genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 172, 105334.
- Curran, P. J. (1983). Multispectral remote sensing for the estimation of green leaf area index. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 309(1508), 257-270.
- Das, R., & Soylu, M. (2023). A key review on graph data science: The power of graphs in scientific studies. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 240, 104896.
- Davoodi, M., Mohammadpour Velni, J., & Li, C. (2018). Coverage control with multiple ground robots for precision agriculture. *Mechanical Engineering*, 140(06), S4-S8.
- De Falco, I., Della Cioppa, A., & Tarantino, E. (2002). Mutation-based genetic algorithm: performance evaluation. *Applied Soft Computing*, 1(4), 285-299.
- De Florian, L., Marzano, P., & Puppo, E. (1994). Line-of-sight communication on terrain models. *International journal of geographical information systems*, 8(4), 329-342.
- Dhulkefl, E. J., & Durdu, A. (2019). Path planning algorithms for unmanned aerial vehicles. *Int. J. Trend Sci. Res. Dev*, 3(4), 359-362.
- Dijkstra, E. W. (2022). A note on two problems in connexion with graphs. In *Edsger Wybe Dijkstra: His Life, Work, and Legacy* (pp. 287-290).



- Ding, J., Zhou, Y., Huang, X., Song, K., Lu, S., & Wang, L. (2023). An Improved RRT\* Algorithm for Robot Path Planning Based on Path Expansion Heuristic Sampling. *Journal of Computational Science*, 101937.
- Doherty, P. (2004, June). Advanced Research with Autonomous Unmanned Aerial Vehicles. In KR (pp. 731-732).
- Dong, W., Ran, J., & Wang, J. (2012). Effectiveness and efficiency of map symbols for dynamic geographic information visualization. *Cartography and Geographic Information Science*, 39(2), 98-106.
- Donner, R. V., & Donges, J. F. (2012). Visibility graph analysis of geophysical time series: Potentials and possible pitfalls. *Acta Geophysica*, 60, 589-623.
- Duan, H., & Li, P. (2014). *Bio-inspired computation in unmanned aerial vehicles* (p. 124). Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg.
- Dutrieux, L. P., Verbesselt, J., Kooistra, L., & Herold, M. (2015). Monitoring forest cover loss using multiple data streams, a case study of a tropical dry forest in Bolivia. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 107, 112-125.
- El-Shikha, D. M., Waller, P., Hunsaker, D., Clarke, T., & Barnes, E. (2007). Ground-based remote sensing for assessing water and nitrogen status of broccoli. *Agricultural water management*, 92(3), 183-193.
- Entezari-Maleki, R., & Movaghar, A. (2011). A genetic algorithm to increase the throughput of the computational grids. *International Journal of Grid and Distributed Computing*, 4(2), 11-24.
- Evangelides, C., & Nobajas, A. (2020). Red-Edge Normalised Difference Vegetation Index (NDVI705) from Sentinel-2 imagery to assess post-fire regeneration. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17, 100283.
- Falconer, L., Hunter, D. C., Telfer, T. C., & Ross, L. G. (2013). Visual, seascape and landscape analysis to support coastal aquaculture site selection. *Land use policy*, 34, 1-10.
- Fevgas, G., Lagkas, T., Argyriou, V., & Sarigiannidis, P. (2022). Coverage path planning methods focusing on energy efficient and cooperative strategies for unmanned aerial vehicles. *Sensors*, 22(3), 1235.
- Fu, Z., Yu, J., Xie, G., Chen, Y., & Mao, Y. (2018). A heuristic evolutionary algorithm of UAV path planning. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018.
- Fung, T., & Siu, W. (2000). Environmental quality and its changes, an analysis using NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 21(5), 1011-1024.
- Ghorbani, A., Mossivand, A. M., & Ouri, A. E. (2012). Utility of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for land/canopy cover mapping in Khalkhal County (Iran). *Annals of Biological Research*, 3(12), 5494-5503.
- Ghosh, S. K., & Mount, D. M. (1991). An output-sensitive algorithm for computing visibility graphs. *SIAM Journal on Computing*, 20(5), 888-910.
- Goodchild, M. F., & Lee, J. (1989). Coverage problems and visibility regions on topographic surfaces. *Annals of Operations Research*, 18, 175-186.

- Goward, S. N., Tucker, C. J., & Dye, D. G. (1985). North American vegetation patterns observed with the NO-AA-7 advanced very high resolution radiometer. *Vegetatio*, 64(1), 3-14.
- Guttler, F., Ienco, D., Nin, J., Teisseire, M., & Poncelet, P. (2017). A graph-based approach to detect spatiotemporal dynamics in satellite image time series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 92-107.
- Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P. J., & Strachan, I. B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote sensing of environment*, 90(3), 337-352.
- Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100-107.
- Hasan, Z. F., & Hussein, A. A. (2016). Heart Disease Classification By Genetic Algorithm. *Journal of Babylon University, Pure and Applied Sciences*, 9.
- Hassan, R., Cohanin, B., De Weck, O., & Venter, G. (2005, April). A comparison of particle swarm optimization and the genetic algorithm. In *46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference* (p. 1897).
- Hayat, S., Yanmaz, E., Brown, T. X., & Bettstetter, C. (2017, May). Multi-objective UAV path planning for search and rescue. In *2017 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)* (pp. 5569-5574). IEEE.
- Helshani, L. (2015). An android application for Google map navigation system, solving the travelling salesman problem, optimization through genetic algorithm. In *Proceedings of FIKUSZ Symposium for Young Researchers* (p. 89). Óbuda University Keleti Károly Faculty of Economics.
- Hichri, A., Hajji, M., Mansouri, M., Abodayeh, K., Bouzrara, K., Nounou, H., & Nounou, M. (2022). Genetic-algorithm-based neural network for fault detection and diagnosis: Application to grid-connected photovoltaic systems. *Sustainability*, 14(17), 10518.
- Hillier, B., & Hanson, J. (1989). *The social logic of space*. Cambridge university press.
- Höffmann, M., Patel, S., & Büskens, C. (2023). Optimal guidance track generation for precision agriculture: A review of coverage path planning techniques. *Journal of Field Robotics*.
- Holben, B. N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International journal of remote sensing*, 7(11), 1417-1434.
- Hu, Y., Ban, Y., Zhang, Q., Zhang, X., Liu, J., & Zhuang, D. (2008, June). Spatial—temporal pattern of GIMMS NDVI and its dynamics in Mongolian Plateau. In *2008 International workshop on earth observation and remote sensing applications* (pp. 1-6). IEEE.
- Huang, H. P., & Chung, S. Y. (2004, September). Dynamic visibility graph for path planning. In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566)* (Vol. 3, pp. 2813-2818). IEEE.

- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6.
- Huete, A. R., Jackson, R. D., & Post, D. F. (1985). Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote sensing of environment*, 17(1), 37-53.
- Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K. V., & Van Leeuwen, W. J. D. A. (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote sensing of environment*, 59(3), 440-451.
- Hussain, A., Muhammad, Y. S., Nauman Sajid, M., Hussain, I., Mohamd Shoukry, A., & Gani, S. (2017). Genetic algorithm for traveling salesman problem with modified cycle crossover operator. *Computational intelligence and neuroscience*, 2017(1), 7430125.
- Isa, F. M., Ariffin, W. N. M., Jusoh, M. S., & Putri, E. P. (2024). A Review of Genetic Algorithm: Operations and Applications. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 40(1), 1-34.
- Jamshidi, V., Nekoukar, V., & Refan, M. H. (2020). Analysis of parallel genetic algorithm and parallel particle swarm optimization algorithm UAV path planning on controller area network. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 31(1), 129-140.
- Jebari, K., & Madiafi, M. (2013). Selection methods for genetic algorithms. *International Journal of Emerging Sciences*, 3(4), 333-344.
- Jensen, J. R. (1996). Introductory digital image processing: a remote sensing perspective.
- Jiang, Z., Huete, A. R., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G., & Zhang, X. (2006). Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote sensing of environment*, 101(3), 366-378.
- Kaabi, J., & Harrath, Y. (2019). Permutation rules and genetic algorithm to solve the traveling salesman problem. *Arab journal of basic and applied sciences*, 26(1), 283-291.
- Kanduč, Z. (2017). Machines, humans and the question of control. In *Big data, crime and social control* (pp. 75-90). Routledge.
- Katekar, V., & Cheruku, J. K. (2022). The Application of Drone Technology for Sustainable Agriculture in India. *Current Agriculture Research Journal*, 10(3).
- Katoch, S., Chauhan, S. S., & Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia tools and applications*, 80, 8091-8126.
- Kaya, Y., & Uyar, M. (2011). A novel crossover operator for genetic algorithms: ring crossover. *arXiv preprint arXiv:1105.0355*.
- Kirkham, M. B. (2014). Stress-degree-day concept and crop water stress index. *Principles of soil and plant water relations*, 437-453.
- Kora, P., & Yadlapalli, P. (2017). Crossover operators in genetic algorithms: A review. *International Journal of Computer Applications*, 162(10).

- Korkmaz, M., & Durdu, A. (2018, February). Comparison of optimal path planning algorithms. In *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)* (pp. 255-258). IEEE.
- Kurazume, R., Oshima, S., Nagakura, S., Jeong, Y., & Iwashita, Y. (2017). Automatic large-scale three dimensional modeling using cooperative multiple robots. *Computer Vision and Image Understanding*, 157, 25-42.
- Kushwaha, M., Singh, S., Singh, V., & Dwivedi, S. (2024). Precision Farming: A Review of Methods, Technologies, and Future Prospects. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 9(2).
- Lacasa, L., Luque, B., Ballesteros, F., Luque, J., & Nuno, J. C. (2008). From time series to complex networks: The visibility graph. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(13), 4972-4975.
- Lambora, A., Gupta, K., & Chopra, K. (2019, February). Genetic algorithm-A literature review. In *2019 international conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon)* (pp. 380-384). IEEE.
- Lan, Y. (2009). Development of an integration sensor and instrumentation system for measuring crop conditions. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.
- Lee, C. K. H. (2018). A review of applications of genetic algorithms in operations management. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 76, 1-12.
- Lee, W., Choi, G. H., & Kim, T. W. (2021). Visibility graph-based path-planning algorithm with quadtree representation. *Applied Ocean Research*, 117, 102887.
- Leusen, M. V. (1999). Viewshed and cost surface analysis using GIS (cartographic modelling in a cell-based GIS II).
- Li, Y., Wu, Y., Xue, X., Liu, X., Xu, Y., & Liu, X. (2024). Efficiency-first spraying mission arrangement optimization with multiple UAVs in heterogeneous farmland with varying pesticide requirements. *Information Processing in Agriculture*, 11(2), 237-248.
- Linker, R., & Blass, T. (2008). Path-planning algorithm for vehicles operating in orchards. *Biosystems engineering*, 101(2), 152-160.
- Lozano-Pérez, T., & Wesley, M. A. (1979). An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles. *Communications of the ACM*, 22(10), 560-570.
- Lyon, J. G., Yuan, D., Lunetta, R. S., & Elvidge, C. D. (1998). A change detection experiment using vegetation indices. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 64(2), 143-150.
- Madkour, A., Aref, W. G., Rehman, F. U., Rahman, M. A., & Basalamah, S. (2017). A survey of shortest-path algorithms. *arXiv preprint arXiv:1705.02044*.
- Magzhan, K., & Jani, H. M. (2013). A review and evaluations of shortest path algorithms. *Int. J. Sci. Technol. Res*, 2(6), 99-104.

- Manganiello, G., Nicastro, N., Caputo, M., Zaccardelli, M., Cardi, T., & Pane, C. (2021). Functional hyperspectral imaging by high-related vegetation indices to track the wide-spectrum *Trichoderma* biocontrol activity against soil-borne diseases of baby-leaf vegetables. *Frontiers in Plant Science*, 12, 630059.
- McVeagh, P., Yule, I., & Grafton, M. (2012). Pasture yield mapping from your groundspread truck. *Advanced Nutrient Management: Gains from the Past—Goals for the Future. Occasional Re-port*, 25, 1-5.
- Miettinen, K. (1999). *Nonlinear multiobjective optimization* (Vol. 12). Springer Science & Business Media.
- Miller, B. L., & Goldberg, D. E. (1995). Genetic algorithms, tournament selection, and the effects of noise. *Complex systems*, 9(3), 193-212.
- Mirjalili, S., & Mirjalili, S. (2019). Genetic algorithm. *Evolutionary algorithms and neural networks: theory and applications*, 43-55.
- Mitchell, M. (1998). *An introduction to genetic algorithms*. MIT press.
- Mkhabela, M. S., Mkhabela, M. S., & Mashinini, N. N. (2005). Early maize yield forecasting in the four agro-ecological regions of Swaziland using NDVI data derived from NOAA's-AVHRR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129(1-2), 1-9.
- Moon, S. W., & Shim, D. H. C. (2009). Study on path planning algorithms for unmanned agricultural helicopters in complex environment. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 10(2), 1-11.
- Moscovini, L., Ortenzi, L., Pallottino, F., Figorilli, S., Violino, S., Pane, C., ... & Costa, C. (2024). An open-source machine-learning application for predicting pixel-to-pixel NDVI regression from RGB calibrated images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 216, 108536.
- Mukhamediev, R. I., Symagulov, A., Kuchin, Y., Zaitseva, E., Bekbotayeva, A., Yakunin, K., ... & Tabyimbaeva, L. (2021). Review of some applications of unmanned aerial vehicles technology in the resource-rich country. *Applied Sciences*, 11(21), 10171.
- Mukhamediev, R. I., Yakunin, K., Aubakirov, M., Assanov, I., Kuchin, Y., Symagulov, A., ... & Amirgaliyev, Y. (2023). Coverage path planning optimization of heterogeneous UAVs group for precision agriculture. *IEEE Access*, 11, 5789-5803.
- Myneni, R. B., Hall, F. G., Sellers, P. J., & Marshak, A. L. (1995). The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing*, 33(2), 481-486.
- Nagy, G. (1994). Terrain visibility. *Computers & graphics*, 18(6), 763-773.
- Natapov, A., & Fisher-Gewirtzman, D. (2016). Visibility of urban activities and pedestrian routes: An experiment in a virtual environment. *Computers, Environment and Urban Systems*, 58, 60-70.
- Natapov, A., Czamanski, D., & Fisher-Gewirtzman, D. (2016). Visuospatial search in urban environment simulated by random walks. *International Journal of Design Creativity and Innovation*, 4(2), 85-104.

- Niu, H., Lu, Y., Savvaris, A., & Tsourdos, A. (2018). An energy-efficient path planning algorithm for unmanned surface vehicles. *Ocean Engineering*, 161, 308-321.
- Nkeki, N. F., & Asikhia, M. O. (2014). Mapping and Geovisualizing Topographical Data Using Geographic Information System (GIS). *Journal of Geography and Geology*, 6(1), 1-13.
- Nolan, P., Paley, D. A., & Kroeger, K. (2017). Multi-UAS path planning for non-uniform data collection in precision agriculture. In *2017 IEEE Aerospace Conference* (pp. 1-12). IEEE.
- Nowak, B. (2020). *Rationale behind NDVI calculation and example of applications in agriculture*.
- Ntakolia, C., Platanitis, K. S., Kladis, G. P., Skliros, C., & Zagorianos, A. D. (2022, June). A Genetic Algorithm enhanced with Fuzzy-Logic for multi-objective Unmanned Aircraft Vehicle path planning missions. In *2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 114-123). IEEE.
- Oh, J. S., Choi, Y. H., Park, J. B., & Zheng, Y. F. (2004). Complete coverage navigation of cleaning robots using triangular-cell-based map. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(3), 718-726.
- Oksanen, T. (2007). *Path planning algorithms for agricultural field machines*. Helsinki University of Technology.
- Oksanen, T., & Visala, A. (2009). Coverage path planning algorithms for agricultural field machines. *Journal of field robotics*, 26(8), 651-668.
- Ollinger, S. V. (2011). Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. *New Phytologist*, 189(2), 375-394.
- O'rourke, J. (1987). *Art gallery theorems and algorithms*. Oxford University Press, Inc..
- O'Sullivan, D., & Turner, A. (2001). Visibility graphs and landscape visibility analysis. *International journal of geographical information science*, 15(3), 221-237.
- Overmars, M. H., & Welzl, E. (1988, January). New methods for computing visibility graphs. In *Proceedings of the fourth annual symposium on Computational geometry* (pp. 164-171).
- Pastor-Guzman, J., Atkinson, P. M., Dash, J., & Rioja-Nieto, R. (2015). Spatiotemporal variation in mangrove chlorophyll concentration using Landsat 8. *Remote sensing*, 7(11), 14530-14558.
- Patle, B. K., Pandey, A., Parhi, D. R. K., & Jagadeesh, A. J. D. T. (2019). A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot. *Defence Technology*, 15(4), 582-606.
- Paull, L., Saeedi, S., & Li, H. (2012). Path planning for autonomous underwater vehicles. In *Marine Robot Autonomy* (pp. 177-223). New York, NY: Springer New York.
- Pavai, G., & Geetha, T. V. (2016). A survey on crossover operators. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 49(4), 1-43.
- Pearson, A. L., Nutsford, D., & Thomson, G. (2014). Measuring visual exposure to smoking behaviours: a viewshed analysis of smoking at outdoor bars and cafés across a capital city's downtown area. *BMC Public Health*, 14, 1-9.



- Pham, T. H., Bestaoui, Y., & Mammar, S. (2017, October). Aerial robot coverage path planning approach with concave obstacles in precision agriculture. In *2017 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS)* (pp. 43-48). IEEE.
- Pham, T. H., Ichalal, D., & Mammar, S. (2020, October). Complete coverage path planning for pests-ridden in precision agriculture using UAV. In *2020 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (IC-NSC)* (pp. 1-6). IEEE.
- Poonam, Dutta, M., & Aggarwal, N. (2016). Meta-heuristics based approach for workflow scheduling in cloud computing: a survey. In *Artificial Intelligence and Evolutionary Computations in Engineering Systems: Proceedings of ICAIECES 2015* (pp. 1331-1345). Springer India.
- Raihan, A. (2024). A systematic review of Geographic Information Systems (GIS) in agriculture for evidence-based decision making and sustainability. *Global Sustainability Research*, 3(1), 1-24.
- Ranagalage, M., Estoque, R. C., & Murayama, Y. (2017). An urban heat island study of the Colombo metropolitan area, Sri Lanka, based on Landsat data (1997–2017). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(7), 189.
- Rane, N. L., Choudhary, S. P., Giduturi, M., & Pande, C. B. (2023). Remote Sensing (RS) and Geographical Information System (GIS) as A Powerful Tool for Agriculture Applications: Efficiency and Capability in Agricultural Crop Management. *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*, 8(4), 264-274.
- Razavi, S. H., Ebadati, E. O. M., Asadi, S., & Kaur, H. (2015). An efficient grouping genetic algorithm for data clustering and big data analysis. *Computational Intelligence for Big Data Analysis: Frontier Advances and Applications*, 119-142.
- Roberge, V., Tarbouchi, M., & Labonté, G. (2012). Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 9(1), 132-141.
- Robinson, N. P., Allred, B. W., Jones, M. O., Moreno, A., Kimball, J. S., Naugle, D. E., ... & Richardson, A. D. (2017). A dynamic Landsat derived normalized difference vegetation index (NDVI) product for the conterminous United States. *Remote sensing*, 9(8), 863.
- Sagar, V., & Kumar, K. (2015, March). A symmetric key cryptography using genetic algorithm and error back propagation neural network. In *2015 2nd International conference on computing for sustainable global development (INDIACom)* (pp. 1386-1391). IEEE.
- Saha, S., Chakraborty, R. S., Nuthakki, S. S., Anshul, & Mukhopadhyay, D. (2015). Improved test pattern generation for hardware trojan detection using genetic algorithm and boolean satisfiability. In *Cryptographic Hardware and Embedded Systems--CHES 2015: 17th International Workshop, Saint-Malo, France, September 13-16, 2015, Proceedings 17* (pp. 577-596). Springer Berlin Heidelberg.

- Santos, L. C., Santos, F. N., Pires, E. S., Valente, A., Costa, P., & Magalhães, S. (2020, April). Path planning for ground robots in agriculture: A short review. In *2020 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)* (pp. 61-66). IEEE.
- Schorcht, G., Löw, F., Fritsch, S., & Conrad, C. (2012, October). Crop classification at subfield level using RapidEye time series and graph theory algorithms. In *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIV* (Vol. 8531, pp. 354-362). SPIE.
- Selvanathan, N., & Tee, W. J. (2003). A genetic algorithm solution to solve the shortest path problem in OSPF and MPLS. *Malaysian Journal of Computer Science*, 16(1), 58-67.
- Senaratne, H., Bröring, A., & Schreck, T. (2013). Using reverse viewshed analysis to assess the location correctness of visually generated VGI. *Transactions in GIS*, 17(3), 369-386.
- Shafi, U., Mumtaz, R., García-Nieto, J., Hassan, S. A., Zaidi, S. A. R., & Iqbal, N. (2019). Precision agriculture techniques and practices: From considerations to applications. *Sensors*, 19(17), 3796.
- Sharma, S., & Gupta, K. (2011). Solving the traveling salesmen problem through genetic algorithm with new variation order crossover. In *2011 International Conference on Emerging Trends in Networks and Computer Communications (ETNCC)* (pp. 274-276). IEEE.
- Shen, Y., & Wu, Z. (2022). Functional visibility graph analysis: Quantifying visuofunctional space with social media check-in data. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 49(1), 41-57.
- Shopova, E. G., & Vaklieva-Bancheva, N. G. (2006). BASIC—A genetic algorithm for engineering problems solution. *Computers & chemical engineering*, 30(8), 1293-1309.
- Shukla, G., Tiwari, P., Dugesar, V., & Srivastava, P. K. (2021). Estimation of evapotranspiration using surface energy balance system and satellite datasets. In *Agricultural water management* (pp. 157-183). Academic Press.
- Sinha, K. (2017). *Path planning for a UAV in an agricultural environment to tour and cover multiple neighborhoods* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- Sivanandam, S. N., Deepa, S. N., Sivanandam, S. N., & Deepa, S. N. (2008). *Genetic algorithms* (pp. 15-37). Springer Berlin Heidelberg.
- Soni, N., & Kumar, T. (2014). Study of various mutation operators in genetic algorithms. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 5(3), 4519-4521.
- Soon, G. K., Guan, T. T., On, C. K., Alfred, R., & Anthony, P. (2013). A comparison on the performance of crossover techniques in video game. In *2013 IEEE international conference on control system, computing and engineering* (pp. 493-498). IEEE.
- Sozzi, M., Boscaro, D., Zanchin, A., Cogato, A., Marinello, F., & Tomasi, D. (2023). Variable-rate fertiliser application to manage spatial variability in a hilly vineyard of Prosecco PDO. In *Precision agriculture'23* (pp. 221-227). Wageningen Academic.



- Stone, K., Billman, E. D., Bauer, P. J., & Sigua, G. (2022). Using NDVI for Variable Rate Cotton Irrigation Prescriptions. *Applied Engineering in Agriculture*, 38(5), 787-795.
- Streich, G. (2019). *Graph theoretical analysis of braided rivers* (Doctoral dissertation, Queen Mary University of London).
- Stucky, J. L. D. (1998). On applying viewshed analysis for determining least-cost paths on digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(8), 891-905.
- Tang, Z., & Ma, H. (2021). An overview of path planning algorithms. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 804, No. 2, p. 022024). IOP Publishing.
- Telesca, L., & Lovullo, M. (2012). Analysis of seismic sequences by using the method of visibility graph. *Europhysics Letters*, 97(5), 50002.
- Tian, H., Mo, Z., Ma, C., Xiao, J., Jia, R., Lan, Y., & Zhang, Y. (2023). Design and validation of a multi-objective waypoint planning algorithm for UAV spraying in orchards based on improved ant colony algorithm. *Frontiers in Plant Science*, 14.
- Tian, J., Wang, L., Li, X., Gong, H., Shi, C., Zhong, R., & Liu, X. (2017). Comparison of UAV and WorldView-2 imagery for mapping leaf area index of mangrove forest. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 61, 22-31.
- Tokekar, P., Vander Hook, J., Mulla, D., & Isler, V. (2016). Sensor planning for a symbiotic UAV and UGV system for precision agriculture. *IEEE transactions on robotics*, 32(6), 1498-1511.
- Tsai, J. T., Chou, J. H., & Liu, T. K. (2006). Tuning the structure and parameters of a neural network by using hybrid Taguchi-genetic algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 17(1), 69-80.
- Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11), 349.
- Turner, A. (2001). Depthmap: a program to perform visibility graph analysis. In *Proceedings of the 3rd international symposium on space syntax* (Vol. 31, pp. 31-12). Atlanta, GA, USA: Georgia Institute of Technology.
- Turner, A., & Penn, A. (1999, March). Making isovists syntactic: isovist integration analysis. In *2nd International Symposium on Space Syntax, Brasilia* (pp. 103-121).
- Turner, A., Doxa, M., O'sullivan, D., & Penn, A. (2001). From isovists to visibility graphs: a methodology for the analysis of architectural space. *Environment and Planning B: Planning and design*, 28(1), 103-121.
- Turvey, C. G., & McLaurin, M. K. (2012). Applicability of the normalized difference vegetation index (NDVI) in index-based crop insurance design. *Weather, Climate, and Society*, 4(4), 271-284.
- Valente, J., Del Cerro, J., Barrientos, A., & Sanz, D. (2013). Aerial coverage optimization in precision agriculture management: A musical harmony inspired approach. *Computers and electronics in agriculture*, 99, 153-159.

- Vedenyov, M. (2024) Travelling salesman problem with Genetic algorithm. MATLAB Central File Exchange. Available online: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/31818-travelling-salesman-problem-with-genetic-algorithm> (Πρόσβαση στις 10 Ιουνίου 2024).
- Vicente-Serrano, S. M., Camarero, J. J., Olano, J. M., Martín-Hernández, N., Peña-Gallardo, M., Tomás-Burguera, M., ... & El Kenawy, A. (2016). Diverse relationships between forest growth and the Normalized Difference Vegetation Index at a global scale. *Remote Sensing of Environment*, 187, 14-29.
- Wang, H., & Pan, W. (2021). Research on UAV path planning algorithms. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 693, No. 1, p. 012120). IOP Publishing.
- Wang, S., Zhang, L., Huang, C., & Qiao, N. (2017). An NDVI-based vegetation phenology is improved to be more consistent with photosynthesis dynamics through applying a light use efficiency model over boreal high-latitude forests. *Remote Sensing*, 9(7), 695.
- Whitley, D. (1994). A genetic algorithm tutorial. *Statistics and computing*, 4, 65-85.
- Wilson, J. P. (1999). Local, national, and global applications of GIS in agriculture. *Geographical information systems: Principles, techniques, management, and applications*, 981-998.
- Wilson, R. (1996). J. Introduction to Graph Theory, Harlow.
- Yang, Y., Pan, J., & Wan, W. (2019). Survey of optimal motion planning. *IET Cyber-Systems and Robotics*, 1(1), 13-19.
- Yang, Y., Zhu, J., Zhao, C., Liu, S., & Tong, X. (2011). The spatial continuity study of NDVI based on Kriging and BPNN algorithm. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3-4), 1138-1144.
- Zhang, J., Khoshbakht, M., Liu, J., Gou, Z., Xiong, J., & Jiang, M. (2022). A clustering review of vegetation-indicating parameters in urban thermal environment studies towards various factors. *Journal of Thermal Biology*, 110, 103340.
- Zhang, Z., Wu, J., Dai, J., & He, C. (2022). Optimal path planning with modified A-Star algorithm for stealth unmanned aerial vehicles in 3D network radar environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 236(1), 72-81.
- Zhu, X., & Liu, D. (2015). Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 102, 222-231.