



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Διπλωματική εργασία

Επικοινωνία καρπών με σμήνος ρομποτικών μελισσών

Μάμης Κωνσταντίνος

Επιβλέπων καθηγητής
Γεώργιος Σταυρουλάκης

Διπλωματική Εργασία υποβληθείσα στο τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανικού Παραγωγής και Διοίκησης.

Χανιά, Μήνας, 2020



Technical University of Crete

Production and Management Engineering

Diploma thesis

Robotic bee swarm crop pollination

Mamis Konstantinos

Supervising professor
Georgios Stavrulakis

Master Thesis submitted to the Department Production and Management Engineering of the Technical University of Crete in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Production and Management Engineering.

Chania, Crete, Month, 2020

Στην οικογένειά μου.

Ευχαριστίες,

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Γεώργιο Ταϊρίδη για την καθοδήγηση, την βοήθεια και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Ευχαριστώ επίσης τον επιβλέποντα καθηγητή Γεώργιο Σταυρουλάκη.

Επικονίαση καρπών με σμήνος ρομποτικών μελισσών

Λέξεις κλειδιά: Ρομποτικό σμήνος, νοημοσύνη σμήνους, σύνδρομο κατάρρευσης μελισσιού, αλγόριθμος βελτιστοποίησης μυρμηγκιών, πρόβλημα πλανόδιου πωλητή, ρομποτικές μέλισσες

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική έχει στόχο να εξετάσει σε ποιο βαθμό είναι εφικτή η δημιουργία ενός αλγορίθμου σμήνους ρομποτικών μελισσών, το οποίο θα μπορεί να προσφέρει μια λύση στο πρόβλημα της επικονίασης που δημιουργεί η μείωση των φυσικών επικονιαστών. Σκοπός της εργασίας επίσης είναι να καλύψει ένα κενό στη βιβλιογραφία και να αποτελέσει αρωγό για περαιτέρω έρευνα.

Η ρομποτική σμήνους είναι μια προέκταση της ρομποτικής, εμπνευσμένη από τη συλλογική συμπεριφορά αποικιών εντόμων, αγέλης ζώων και στοχεύει στη δημιουργία και το συντονισμό απλών σε λειτουργία ρομπότ, τα οποία δρώντας συλλογικά μπορούν να αναλάβουν και να φέρουν εις πέρας προβλήματα άνω των μεμονωμένων δυνατοτήτων τους. Ένας τέτοιος αλγόριθμος είναι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών.

Στη διπλωματική αυτή επιλέχθηκε η χρήση του περιβάλλοντος της Matlab λόγω της ευκολίας που αυτή προσφέρει. Στο περιβάλλον αυτό, δημιουργείται ένα γράφημα σε άξονες x και y με τυχαία σημεία, το οποίο έχει βασιστεί σε καλλιέργειες ηλιανθού. Το εμβαδόν του γραφήματος αναπαριστά τη περιοχή/χωράφι και τα σημεία τα προς επικονίαση λουλούδια ηλιανθού. Επιλέγεται τυχαία ένα σημείο ως σημείο εκκίνησης των μελισσών, με άλλα λόγια η ηλεκτρονική κυψέλη τους. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών προκειμένου να βρεθούν τα προς επικονίαση λουλούδια και μια βέλτιστη διαδρομή προσπέλασης τους. Κάθε μέλισσα ρομπότ της αποικίας πλέον, διαθέτει περιορισμένο χρόνο πτήσης (μπαταρία), συγκεκριμένη ταχύτητα και στην κάθε επίσκεψή της προσλαμβάνει τυχαίο ποσό γύρης. Με το πέρας του αλγορίθμου κάθε λουλούδι έχει επισκεφθεί και έχει λίγη ως καθόλου εναπομείνουσα γύρη και όλες οι μέλισσες έχουν επιστρέψει στην κυψέλη.

Προκειμένου να εξακριβωθεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων, στις μεταβλητές του αλγορίθμου έχουν εισαχθεί τιμές για πραγματικές μέλισσες. Με το πέρας του αλγορίθμου, τα αποτελέσματα του της επισκεψιμότητας ανά 100 λουλούδια και του μέσου αριθμού επισκεψιμότητας συγκρίθηκαν με δυο διαφορετικές, ανεξάρτητες έρευνες για καλλιέργειες ηλιανθού. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ κοντά στις έρευνες αυτές.

Robotic bee swarm crop pollination

Keywords: Robotic swarm, swarm intelligence, colony collapse disorder (CCD), Ant colony optimization algorithm (ACO), traveling salesman problem (TSP), robotic bees

Abstract

This thesis aims to determine the feasibility of a robotic bee swarm algorithm, which could pollinate a crop field effectively. This endeavor will provide a solution to the pollinator decline issue. Moreover, this thesis fills the gap in the literature about robotic bee swarms and whenever they can exist in the near future.

Swarm robotics is a field of multi-robotics, inspired by the collective behavior of bug colonies, animal packs and social insects. The swarm consists of simple robots which cooperate in order to perform a complex task. Inspired by ant colonies, the Ant Colony Optimization algorithm uses a number of robot agents in order to find a good path through a graph.

The algorithm was developed with Matlab. In the Matlab environment, a graph in x and y axes with random nodes is created. The graph's acreage represents the crop field's acreage. Nodes in the graph represent florets of *Helianthus annuus*. A random node gets chosen as a starting point (this node represents the e-hyve). The robot bees/ agents, perform the ACO algorithm in order to locate the open florets in the field, and find a good path in the graph. Robot bees of the colony have limited fly time (battery), the same fly speed and they collect a random amount of pollen from each flower. The algorithm ends if the majority of florets have been visited, have no pollen left and all bees are back to the e-hyve).

In order to verify the accuracy of the results, the variables of the algorithm have been filled with data collected from real bees. After the completion of the process of the algorithm, its results regarding the footfall per 100 flowers and the average traffic, were compared with 2 different, independent studies for sunflower cultures. The algorithm's results were found to be really similar to those of the studies

Περιεχόμενα

Περίληψη

Abstract

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ρομποτικά σμήνη

1.1 Εισαγωγή	16
1.2 Ρομποτική	16
1.2.1 Ιστορική αναδρομή	16
1.2.2 Τα χαρακτηριστικά της ρομποτικής	16
1.2.3 Εφαρμογές	17
1.3 Θεωρία σμήνους	17
1.4 Ρομποτικά συστήματα	18
1.5 Επίλογος	20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Επικοινωνία

2.1 Εισαγωγή	21
2.2 Η διαδικασία της επικοινωνίας	21
2.3 Επικοινωνιστές και η σημασία τους	22
2.4 Μείωση επικοινωνιακών και αίτια	22
2.4.1 Σύνδρομο κατάρρευσης μελισσιού – Colony Collapse Disorder (CCD)	23
2.5 Επίλογος	24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (ACO)

3.1 Εισαγωγή	25
3.2 Η αρχή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης μυρμηγκιών	25
3.3 Το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή	26
3.3.1 Εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης μυρμηγκιών στο πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή	24
3.4 Αντί επιλόγου	28

Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή και επίλυση

4.1 Εισαγωγή	29
--------------	----

4.1.1 Επιλογή περιβάλλοντος προγραμματισμού	29
4.1.2 Παραδοχές	29
4.1.3 Δεδομένα	29
4.1.4 Δομή προγράμματος	30
4.2 Συναρτήσεις	31
4.2.1 main.m	31
4.2.2 createGraph.m	31
4.2.3 createColony.m	32
4.2.4 fitnessFunction.m	32
4.2.5 updatePhromone.m	32
4.2.6 drawBestTour.m , drawGraph.m , drawPhromone.m	32
4.2.7 pollPath.m	32
4.3 Επαλήθευση αποτελεσμάτων	32
4.3.1 Τρόπος 1	33
4.3.2 Τρόπος 2	35
4.4 Αποτελέσματα	36
4.5 Εφαρμογή αλγορίθμου σε χωράφι μισού στρέμματος	43

Κεφάλαιο 5: Συζήτηση

5.1 Συμπεράσματα και μελλοντικές εφαρμογές	47
--	----

Εισαγωγή

Η διαδικασία της επικονίασης είναι μια από τις σημαντικότερες διαδικασίες, αν όχι η σημαντικότερη, στη φύση τόσο για τις ανθρώπινες κοινωνίες όσο και για αρκετούς πληθυσμούς του ζωικού βασιλείου. Χωρίς τους επικονιαστές πολλά φυτά δεν θα μπορούσαν να παράξουν καρπούς η/και να αναπαραχθούν και χωρίς τα φυτά αυτά να παρέχουν γύρη, νέκταρ η ακόμα και τροφή αρκετοί πληθυσμοί στο ζωικό βασίλειο θα ελαττωνόντουσαν διαταράσσοντας με τον τρόπο αυτό την τροφική αλυσίδα (Ollerton et.al,2011).

Στις σύγχρονες κοινωνίες ο ρόλος της επικονίασης και κατ' επέκτασης των επικονιαστών είναι τόσο ζωτικής σημασίας, καθώς το 70% περίπου των καλλιεργειών για ανθρώπινη κατανάλωση ήτοι το 35% της συνολικής κατανάλωσης τροφίμων εξαρτάται από τους επικονιαστές (Klein et.al, 2007), όσο και οικονομικής. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας (FAO) τα κέρδη ετησίως από γεωργικά τρόφιμα τα οποία βασίζονται στην επικονίαση είναι μεταξύ 235 και 577 δισεκατομμυρίων δολαρίων.

Οι μέλισσες αποτελούν τον πιο αποτελεσματικό επικονιαστή στη φύση, το 80% του συνόλου της επικονίασης επιτελείται από αυτές με το είδος *Apis mellifera* να έχει πρωταρχικό ρόλο. Για το λόγο αυτό οι συγκεκριμένες μέλισσες εκτρέφονται και πωλούνται είτε ενοικιάζονται για να εκτελέσουν την επικονίαση.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια μείωση του αριθμού των μελισσών και σε συνδυασμό με την αύξηση παραγωγής στις καλλιεργείες που χρειάζονται επικονίαση η εύρεση μιας λύσης είναι αναγκαία. Υπάρχουν αρκετές προσεγγίσεις επίλυσης του προβλήματος αυτού. Στην παρούσα διπλωματική μελετάται ο προγραμματισμός και η χρήση ενός σμήνους ρομποτικών μελισσών το οποίο με τη χρήση πιθανολογικών αλγορίθμων και τη μελέτη του τρόπου συνύπαρξης και επικοινωνίας της αποικίας των μελισσών, να είναι σε θέση να κάνει την επικονίαση πλήρως αυτοματοποιημένα, αυτόνομα και αποτελεσματικά, χωρίς να διαταράσσει το φυσικό περιβάλλον, και να αποτελέσει σκαλοπάτι για την περαιτέρω μελέτη και έρευνα.

Η παρούσα διπλωματική εξετάζει την δυνατότητα δημιουργίας ενός αλγορίθμου σμήνους ρομποτικών μελισσών, το οποίο θα μπορεί να προσφέρει μια λύση στο προβλήματα της επικονίασης που δημιουργεί η μείωση των φυσικών επικονιαστών. Η διάρθρωση της εργασίας είναι η εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στη θεωρία ρομποτικών σμηνών, τους παράγοντες που καθορίζουν το βαθμό θεώρησης ενός ρομποτικού σμήνους και παρουσιάζονται διάφορα ρομποτικά σμήνη που έχουν αναπτυχθεί ως προς τα τεχνικά του χαρακτηριστικά, το κόστος, τους αισθητήρες που φέρουν κ.α.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφεται συνοπτικά η διαδικασία της επικονίασης, η αναγκαιότητά της για το φυσικό περιβάλλον και τα μέσα με τα οποία αυτή επιτυγχάνεται – με ιδιαίτερη έμφαση στους επικονιαστές. Εισάγεται το πρόβλημα μείωσης των επικονιαστών τα τελευταία χρόνια, οι επιπτώσεις της μείωσης αυτής που δύναται να επιφέρει σε όλες της πτυχές του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος (οικονομικό και κοινωνικό).

Στο τρίτο εν συνεχεία κεφάλαιο, εισάγεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (ACO). Γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή του αλγορίθμου. Παρουσιάζεται ο αρχικός αλγόριθμος, η εφαρμογή ως θεώρηση ενός προβλήματος πλανόδιου πωλητή, οι βασικές λειτουργίες του, και ο τρόπος με τον οποίο εντάσσεται στο ρομποτικό σμήνος μελισσών της παρούσας εργασίας.

Το τέταρτο κεφάλαιο αποτελείται από τον αλγόριθμο της διπλωματικής. Για την αρχικοποίηση των μεταβλητών του προγράμματος, οι οποίες παρατίθενται στο κεφάλαιο αυτό, έχουν γίνει ορισμένες παραδοχές με βάση την βιβλιογραφία. Παρουσιάζονται οι βασικές συναρτήσεις που συνθέτουν τον αλγόριθμο, με μια σύντομη επεξήγηση της λειτουργίας τους. Στη

συνέχεια, εισάγονται πραγματικά δεδομένα στις μεταβλητές του αλγορίθμου (λόγου χάριν η μέση ταχύτητα μιας μέλισσας) τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίνονται με πραγματικές τιμές, προκειμένου να επαληθευθεί ότι ο αλγόριθμος λειτουργεί ορθά. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα περάτωσης του αλγορίθμου.

Το πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο, αφορά μελλοντικές εφαρμογές του αλγορίθμου και πιθανές προεκτάσεις του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Ρομποτική και Ρομποτικά Σμήνη.

1.1 Εισαγωγή.

Η φύση πάντα έδινε έμπνευση στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Μέσω καταμερισμού εργασιών ή δημιουργίας σχηματισμών, έντομα όπως οι μέλισσες ή τα μυρμήγκια είναι ικανά να μεταφέρουν αντικείμενα βαρύτερα από τα ίδια και να εκτελούνε εργασίες που μεμονωμένα τα μέλη των αποικιών δεν θα μπορούσαν, να γεφυρώνουν χάσματα που θα εμπόδιζαν τη κίνησή τους κ.α.

Η νοημοσύνη του σμήνους των συνεργαζόμενων αυτών εντόμων έχει ενταχθεί τα τελευταία χρόνια στην επιστήμη της ρομποτικής δημιουργώντας ένα νέο πολλά υποσχόμενο θέμα στην επιστημονική κοινότητα.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μνεία στα βασικά σημεία της θεωρίας του ρομποτικού σμήνους, την αλληλεπίδραση των μελών του συστήματος με το περιβάλλον και στα κριτήρια με βάση τα οποία κρίνεται ο βαθμός νοημοσύνης του σμήνους. Εν συνεχεία αναφέρονται διάφορες προσπάθειες και καινοτομίες, ένα status quo, ρομποτικών συστημάτων και πλατφορμών με τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, τους αισθητήρες που φέρουν και το κόστος τους.

1.2 Ρομποτική

Η ρομποτική είναι ένας κλάδος της μηχανικής που περιλαμβάνει στοιχεία από τη μηχανολογία, την ηλεκτρολογία και την επιστήμη των υπολογιστών. Η ρομποτική ασχολείται με τον σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και τις εφαρμογές των ρομπότ και των ηλεκτρονικών συστημάτων χειρισμού τους, της ανάδρασης των αισθητήρων και των πληροφοριών που επεξεργάζονται.

1.2.1 Ιστορική αναδρομή

Η ιδέα των αυτόνομων μηχανών γοήτευε το ανθρώπινο γένος από αρχαιοτάτων χρόνων, με το πρώτο καταγεγραμμένο ρομπότ να εμφανίζεται στην ελληνική μυθολογία με το όνομα Τάλως, φτιαγμένο από το θεό Ήφαιστο, ως δώρο στον βασιλιά Μίνωα με σκοπό τη φύλαξη της Κρήτης και τη διασφάλιση της τήρησης των νόμων. Κατά τον μεσαίωνα ο Άραβας μηχανικός Ισμαήλ Αλ Τζαζάρι (1336-1206) στο βιβλίο του “Το βιβλίο της γνώσης περί έξυπνων μηχανικών συσκευών”, περιλαμβάνει διαγράμματα και σχέδια για αρκετούς μηχανισμούς, συμπεριλαμβανομένου ενός ελέφαντα που κινείται και σημαίνει την ώρα. Ο Λεονάρντο Νταβίντσι είχε σχεδιάσει αρκετά παρόμοια συστήματα, όπως αυτό ενός πολεμιστή με πανοπλία, το οποίο μπορούσε να κινεί τα χέρια και το κεφάλι με περιορισμένες κινήσεις .

Ο όρος ρομπότ πρωτοεμφανίζεται το 1920 από τον Τσέχο μυθιστοριογράφο Κάρελ Τσάπεκ στο έργο του “ Διεθνικά Ρομπότ του Ρόσσομ” όπου έθιγε το κίνδυνο του μηχανοποιημένου πολιτισμού. Ο όρος ρομπότ αποτελεί νεολογισμό της τσεχικής λέξης “robota” (που σημαίνει εργασία).

1.2.2 Τα χαρακτηριστικά της ρομποτικής

Υπάρχουν αρκετά είδη ρομπότ που χρησιμοποιούνται με ποικίλους τρόπους σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Πάρολα αυτά έχουν τρία βασικά χαρακτηριστικά όσον αφορά στην κατασκευή τους.

- Έχουν ένα είδος μηχανικού σκελετού, μορφής ή σχήματος προκειμένου να περατώσουν ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Παραδείγματος χάριν, ένα ρομπότ σχεδιασμένο να διασχίζει λάσπη,

πιθανώς να έχει ερπύστριες. Ο μηχανικός σχεδιασμός, αφορά τη λύση του μηχανικού προκειμένου να προσαρμόσει τη λειτουργία του ρομπότ στο εκάστοτε περιβάλλον.

- Έχουν ηλεκτρονικά εξαρτήματα που τροφοδοτούν και χειρίζονται το μηχάνημα. Στο προηγούμενο παράδειγμα ρομπότ που φέρει ερπύστριες, μια ηλεκτρική πηγή τροφοδοτεί τις ερπύστριες. Τα ρομπότ χρειάζονται κάποια μορφή τροφοδοσίας προκειμένου να κινηθούν και να λειτουργήσουν οι αισθητήρες τους (το ηλεκτρικό σήμα χρησιμοποιείται προκειμένου να ανιχνεύσουν θερμότητα, ήχο, θέση και άλλα).

- Όλα τα ρομπότ έχουν ένα είδος κώδικα προγραμματισμού. Το πρόγραμμα καθορίζει πότε ή πώς ένα ρομπότ θα κάνει κάτι. Στο παράδειγμα με το ρομπότ που έχει ερπύστριες και πρέπει να διασχίσει μια περιοχή με λάσπη ακόμα και αν έχει τον κατάλληλο μηχανικό σχεδιασμό, και λάβει την απαραίτητη ενέργεια προκειμένου να κινηθεί, δεν θα κινηθεί αν δεν έχει λάβει το σωστό προγραμματισμό (πχ τις κατάλληλες κατευθυντήριες οδηγίες). Υπάρχουν τριών ειδών προγραμματισμοί: ο απομακρυσμένος χειρισμός, ο χειρισμός τεχνητής νοημοσύνης και ο υβριδικός. Ένα ρομπότ με αυτοματοποιημένο χειρισμό θα πραγματοποιήσει μια κίνηση, αφού λάβει την απαραίτητη οδηγία, συνήθως από έναν άνθρωπο χειριστή και εμπίπτει περισσότερο στην αυτοματοποίηση παρά στον τομέα της ρομποτικής. Τα ρομπότ με τεχνητή νοημοσύνη μπορούν να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον και να λαμβάνουν αποφάσεις σύμφωνα με τον προϋπάρχον προγραμματισμό. Τα υβριδικά, χρησιμοποιούν και απομακρυσμένο χειρισμό και τεχνητή νοημοσύνη ταυτόχρονα.

1.2.3 Εφαρμογές

Η αυξημένη έρευνα και κατασκευή νέων ρομπότ για τη διεκπεραίωση προβλημάτων οδηγεί στη δημιουργία ολοένα και πιο εξειδικευμένων ρομποτικών συστημάτων (τόσο από πλευράς μηχανικής κατασκευής και ηλεκτρικών συνάψεων όσο και από πλευράς προγραμματισμού). Για παράδειγμα, αρκετά ρομπότ σχεδιάζονται για τη συναρμολόγηση κομματιών σε βιομηχανίες, αναλαμβάνοντας ολόκληρους κύκλους συναρμολόγησης ενός προϊόντος. Τα ρομπότ αυτά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα για άλλες εφαρμογές. Κατατάσσονται ως ρομπότ συναρμολογήσεων. Δημιουργούνται δηλαδή συγκεκριμένοι κλάδοι τα ρομπότ των οποίων έχουν κοινά γνωρίσματα. Μερικές ενδεικτικές εφαρμογές των ρομπότ είναι μεταξύ άλλων:

- για στρατιωτική χρήση.
- στη βιομηχανία (χρησιμοποιούνται εκτενώς από το 1960)
- στην ιατρική
- για οικιακή χρήση
- ρομπότ που δρουν συλλογικά (τα λεγόμενα cobots)
- αυτόνομα drones
- ρομπότ σε σμήνη

1.3 Θεωρία σμήνους.

Τα ρομποτικά σμήνη αποτελούνται από απλές σε λειτουργίες οντότητες οι οποίες συνεργάζονται με τέτοιο τρόπο που δημιουργούν μια οντότητα για την επίτευξη ενός κοινού στόχου. Η κάθε οντότητα λειτουργεί αυτόνομα και προκύπτει μια συλλογική συμπεριφορά-αποτέλεσμα. Με τον τρόπο αυτό το σμήνος είναι ικανό να επιτύχει στόχους εκτός των δυνατοτήτων των μεμονωμένων οντοτήτων του, πιο αποδοτικά από ένα υψηλών δυνατοτήτων ρομπότ, ακόμα και αν κάποιο μέλος υποστεί βλάβη ή δυσλειτουργεί.

Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός τα μέλη-οντότητες του ρομποτικού σμήνους πρέπει να είναι σε θέση να επικοινωνούν μεταξύ τους. Η επικοινωνία αυτή γίνεται είτε τοπικά μέσω ενός

καναλιού επικοινωνίας, ήτοι ένα κεντρικό σύστημα επικοινωνίας, είτε άμεσα με το κάθε μέλος να είναι σε θέση να αντιληφθεί μια μεταβολή των άλλων μελών στο περιβάλλον (Dudek, G. et.al. 1996). Η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των μελών του σμήνους και η αξιοποίηση τους ονομάζεται νοημοσύνη του σμήνους και είναι απαραίτητη για την επίτευξη του κοινού στόχου. Το σμήνος εμφανίζει μια ευφυΐα υψηλότερη από τα μέλη του μεμονωμένα.

Το κατά πόσο ένα σύστημα θεωρείται ρομποτικό σμήνος εξαρτάται από τα παρακάτω κριτήρια:

- *Αυτονομία* - Τα μέλη του σμήνους πρέπει να είναι αυτόνομα ρομπότ και να μπορούν να αλληλεπιδράσουν το περιβάλλον στο οποίο δρουν.
- *Μεγάλος αριθμός* – Ένας μεγάλος αριθμός από ρομπότ είναι αναγκαίος προκειμένου να αναπτυχθεί η συνέργεια του σμήνους (νοημοσύνη σμήνους). Ο αριθμός αυτός είναι δύσκολο να ορισθεί και να δικαιολογηθεί. Το σμήνος μπορεί να αποτελείται από διαφορετικού τύπου ρομπότ τα οποία αλληλεπιδρούν, ωστόσο πολύ ετερογενή ρομπότ είναι αρκετά πιθανό να μην δημιουργήσουν σμήνος.
- *Περιορισμένες δυνατότητες* – Τα μέλη του σμήνους πρέπει να είναι σχετικά απλά χωρίς τη δυνατότητα επίτευξης του στόχου μόνα τους
- *Επεκτασιμότητα και ανθεκτικότητα* – Η προσθήκη μιας νέας μονάδας στο σύστημα πρέπει να βελτιώνει την επίδοσή του ενώ η καταστροφή ή αφαίρεση μιας μονάδας να μην οδηγεί σε αδυναμία επίτευξης του στόχου.
- *Κατανομημένος συντονισμός* – Τα ρομπότ του σμήνους πρέπει να έχουν μόνο τοπικές και περιορισμένες δυνατότητες επικοινωνίας και αισθητήρων. Ο συντονισμός μεταξύ των ρομπότ είναι κατανομημένος. Η χρήση καθολικού διαύλου επικοινωνίας για τον συντονισμό επηρεάζει την αυτονομία των μελών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω κριτήρια καθορίζουν όχι αν ένα σύστημα είναι ή δεν είναι ρομποτικό σμήνος, αλλά τον βαθμό στον οποίο το σύστημα θεωρείται τέτοιο (JEVTIC, A. and ANDINA, D. (n.d.) 2007).

1.4 Ρομποτικά συστήματα.

Αρκετά συστήματα έχουν κατασκευαστεί κατά την μελέτη της ρομποτικής σμήνους, κυρίως για εκπαιδευτικούς σκοπούς, μερικά από τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 1.

Robot Name	Κόστος	Αισθητήρες	Κίνηση/Ταχύτητα	Μέγεθος	Αυτονομία
Colias	£25	distance, light, bump, bearing, range	Wheel, 35 cm/s	4 cm	1-3 h
AMiR	£65	distance, light, bearing	Wheel, 10 cm/s	6,5 cm	2 h
Jasmine	£80	light, IR, gyro, bump, accelerometer	Wheel, N/A	3 cm	1-2 h
E-puck	£580	distance, camera, bearing, accele, mic	Wheel, 13 cm/s	7,5 cm	1-10 h
Kobot	£800	distance, bearing, vision, compass	Wheel, N/A	12 cm	10 h
Kilobot	£75	distance, light	Wheel, 1 cm/s	3,3 cm	3-24 h
R-one	£220	light, IR, gyro, bump, accelerometer	Wheel, 30 cm/s	10 cm	6 h
SwarmBot	N/A	range, bearing, camera, bump	Wheel, 50 cm/s	12,7 cm	3 h
Alice	N/A	distance, camera	Wheel, 4 cm/s	2,2 cm	10 h
Crazyflie 2.1 (Bitcraze Store. (n.d.). Crazyflie 2.1. [online])	£155	3 axes accelerometer/ gyro, pressure	Flight, N/A	9,2 cm	7 min

Πίνακας 1: Σύγκριση μερικών ρομποτικών συστημάτων. Το κόστος αναφέρεται στη μονάδα. (Arvin F. et.al 2014)



Εικόνα 1: Σμήνος Kilobots (M. Rubenstein 2012)

Το Kilobot (M. Rubenstein 2012) είναι ένα μικρό και φθηνό robot το οποίο κατασκευάστηκε στο πανεπιστήμιο του Harvard, με σκοπό την έρευνα για τη νοημοσύνη του σμήνους. Οι κύριες εφαρμογές του είναι η μεταφορά βαρύτερων – σε σχέση με τα μέλη του- αντικειμένων και ο σχηματισμός σχημάτων και γραμμμάτων. Η κίνησή του γίνεται στο έδαφος και η χρήση του είναι κυρίως ακαδημαϊκή.



Εικόνα 2: ενός Kibot αριστερά και σμήνους αποτελούμενου από 7 Kibots δεξιά. Τα Kibots είναι σχεδιασμένα από το ερευνητικό κέντρο KOVAN για τη μελέτη της συμπεριφοράς ρομποτικού σμήνους. (Northwestern.edu. (2020). [online])

Το Kibot αποτελεί ένα από τα πιο εμπορικά robot της κατηγορίας, το οποίο ως μονάδα με μερικές προσθήκες αισθητήρων και λειτουργιών λειτουργεί ως οικιακή συσκευή (kobotusa. (n.d.). KOBOT | Support. [online]). Στη ρομποτική σμήνους τα σμήνη Kibot είναι κατάλληλα για τη μελέτη της συμπεριφοράς που λέγεται flocking (συρροή), η κίνηση του σμήνους στο περιβάλλον σαν μια ενιαία οντότητα αποφεύγοντας σαν ένα σύνολο μεγάλα εμπόδια.

Το Crazyflie (Bitcraze Store. (n.d.). Crazyflie 2.1. [online]) είναι ένα ιπτάμενο drone open source ιδανικό για εκπαιδευτικούς σκοπούς, έρευνα και μπορεί να ενταχθεί σε σμήνος. Έχοντας την ικανότητα να πετάξει είναι αξιοσημείωτη η διαφορά αυτονομίας σε σχέση με τα αντίστοιχα επίγεια αντίστοιχα.



Εικόνα 3: Crazyflie 2.1 (Bitcraze Store, (n.d.). Crazyflie 2.1. [online])

1.5 Επίλογος

Με βάση τα παραπάνω έχουν γίνει μερικές παραδοχές όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ρομποτικών μελισσών που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Οι παραδοχές αυτές αφορούν στην ταχύτητα της κάθε μέλισσας/ρομπότ και στην αυτονομία της μπαταρίας τους και θα αναλυθούν παρακάτω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Επικονίαση

2.1 Εισαγωγή.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της επικονίασης, ο λόγος που έχει εξέχουσα σημασία στη διατήρηση της ζωής στη γη και οι τρόποι με τους οποίους επιτυγχάνεται.

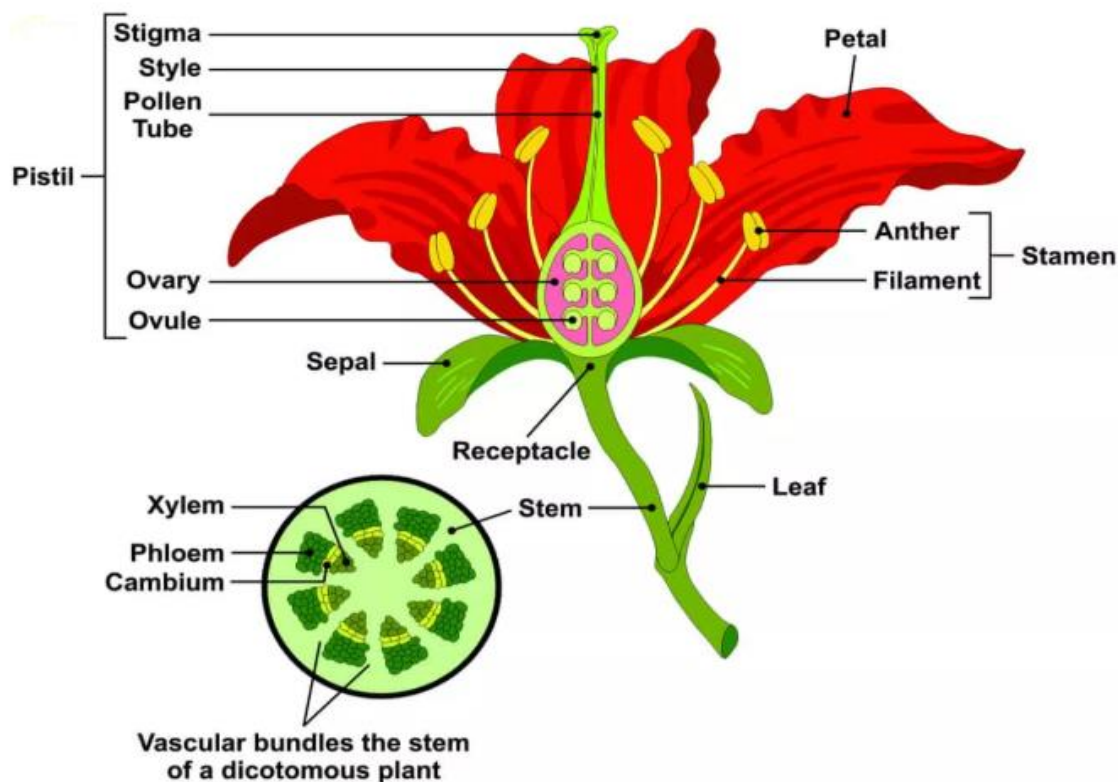
Στη συνέχεια το παρουσιάζεται το πρόβλημα της μείωσης των επικονιαστών και ειδικότερα των μελισσών, οι επιπτώσεις που θα επιφέρει σε κοινωνικό, οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο.

Τέλος στη παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε η μελέτη μιας καλλιέργειας ηλιανθού (πιο συγκεκριμένα η ποικιλία *Helianthus annuus*) δεδομένα από την οποία έχουν εξαχθεί και ενσωματωθεί στον κώδικα της ρομποτικής κυνέλης, όπως ο μέσος αριθμός λουλουδιών ανά στρέμμα καλλιέργειας, η περίοδος επικονίασης κ.α.

2.2 Η διαδικασία της επικονίασης.

Η επικονίαση είναι η μέθοδος μεταφοράς κόκκων γύρης (γυρεόκοκκων) από τους στήμονες, οι οποίοι είναι τα αρσενικά μέλη των άνθεων, στο στίγμα, τα θηλυκά. Σκοπός κάθε ζωντανού οργανισμού, συμπεριλαμβανομένου των φυτών, είναι η δημιουργία απογόνων και η διαίωσιση του είδους. Ένας τρόπος των φυτών να περάσουν κομμάτι τους στην επόμενη γενιά είναι με τη δημιουργία σπόρων. Οι σπόροι αυτοί περιλαμβάνουν την απαραίτητη γενετική πληροφορία για τη δημιουργία νέου φυτού.

Τα λουλούδια είναι το μέσο για τη δημιουργία σπόρων. Τα βασικά μέρη ενός λουλουδιού φαίνονται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4: Μέρη φυτού.

Οι σπόροι μπορούν να παραχθούν μόνο κατά τη μεταφορά γυρεόκοκκων μεταξύ λουλουδιών του ίδιου είδους.

Για να γίνει η επικονίαση τα λουλούδια πρέπει να βασιστούν σε κάποιο μεσολαβητή προκειμένου να μεταφέρει τη γύρη. Το ρόλο αυτό του διαμεσολαβητή αναλαμβάνει ο αέρας, το νερό, ή διάφορα ζώα, όπως πεταλούδες, νυχτερίδες, μέλισσες και άλλα. Τα ζώα τα οποία αναλαμβάνουν το έργο αυτό τα ονομάζουμε επικονιαστές.

Οι επικονιαστές επιτελούν το έργο αυτό άθελά τους, καθώς μεταφέρουν τη γύρη που έχει κολλήσει στα πόδια ή τα φτερά τους μεταξύ των λουλουδιών, ενώ συλλέγουν τροφή από αυτά, το νέκταρ.

2.3 Επικονιαστές και η σημασία τους

Περίπου το 35% των καλλιεργειών που αφορούν φαγητό και ίνες χρήσιμες για ρουχισμό, κατασκευή σχοινιών κλπ, παγκοσμίως εξαρτώνται αποκλειστικά στους επικονιαστές για αναπαραγωγή. Το ίδιο ισχύει και για το 15% – 30% των φρούτων που καταναλώνονται παγκοσμίως ως τρόφιμα ή ποτά. Επεκτείνοντας τη παραπάνω πρόταση, μπορούμε να πούμε ότι μια στις τέσσερις μπουκιές φαγητού ή μια στις τέσσερις γουλιές ποτού είναι άμεσα συνδεδεμένη και εξαρτώμενη από τους επικονιαστές (University of California – Berkeley, 2006).

Οι επικονιαστές επιπλέον βελτιώνουν και την ποιότητα των καρπών (ιδιαίτερα στα φρούτα), τη διάρκεια ζωής και την εμπορική τους αξία (παραδείγματος χάριν, κακώς επικονιασμένες φράουλες θα είναι παραμορφωμένες γεγονός που τις κάνει λιγότερο ελκυστικές στον καταναλωτή). Ως εκ τούτου οι επικονιαστές αποκτούν και σημαντική οικονομική αξία. Η ετήσια αξία τους για το έτος 2005 εκτιμάται στα 183 δις δολάρια. (Gallai et al. 2009). Οι γεωργικές καλλιέργειες πέραν τις εξασφάλισης τροφής, αποτελούν και μέσο βιοπορισμού για το 40% του παγκόσμιου πληθυσμού.

Επιπλέον η επικονίαση είναι σημαντική για τη διατήρηση της διατροφής του ζωικού βασιλείου. Πολλά πτηνά και θηλαστικά τρέφονται με με άγρια φρούτα (τα πουλιά παραδείγματος χάριν τρέφονται με όλων των ειδών τα άγρια μούρα στα δάση) και άγριους καρπούς. Στην περίπτωση εξάλειψης όλων των επικονιαστών, θα παρατηρούνταν μια απότομη μείωση στα φρούτα και τους καρπούς αυτούς, ενώ ταυτοχρόνως θα επηρεάζονταν και τα φυτοφάγα ζώα από την εξάντληση αυτή καθώς τα φυτά από τα οποία τρέφονται δεν θα μπορούσαν να αναπαραχθούν και θα εξέλειπαν.

Η επικονίαση εκτελείται από μια ευρεία γκάμα ζώων, κυρίως εντόμων, όπως μέλισσες, βομβίνους, συρφίδες, πεταλούδες, σφήκες και άλλα ασπόνδυλα, επιπλέον μερικά σπονδηλωτά γνωστά για την επικονίαση είναι οι νυχτερίδες, οι σκίουροι, παπαγάλοι, μερικά πρωτεύοντα θηλαστικά και ο άνθρωπος (επικονίαση με τα χέρια). Στις γεωργικές καλλιέργειες οι μέλισσες είναι οι σημαντικότεροι επικονιαστές (UNEP 2010), καθώς επιτελούν πάνω από το 80% της επικονίασης σε καλλιεργήσιμους καρπούς.

2.4 Μείωση επικονιαστών και αίτια

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι επικονιαστές τόσο οι οικόσιτοι όσο και οι άγριοι, παρουσιάζουν δραματική πτώση στον πληθυσμό τους (Potts et al. 2010). Οι Biesmeijer et al. (2006) παρατήρησαν ταυτόχρονη μείωση στον αριθμό των επικονιαστών (κυρίως μέλισσες και συρφίδες) και των φυτών των οποίων η επικονίαση εξαρτάται από αυτούς, στη Μεγάλη Βρετανία και την Ολλανδία. Στις Η.Π.Α, παρατηρήθηκε μια εκτεταμένη μείωση στους βομβίνους, όπου τα τέσσερα συνηθέστερα είδη μειώθηκαν κατά 96%, ενώ το εύρος της περιοχής που δρούσαν μειώθηκε κατά 23-87%. Όλα αυτά τα τελευταία 20 χρόνια (Cameron et al. 2011). Ο αριθμός των μελισσών βρέθηκε ότι μειώνεται σε Η.Π.Α (Allen- Wardel et al. 1998) και στην Ευρώπη (Potts et al. 2010).

Σε άλλα μέρη του κόσμου όπως η Κίνα και η Αργεντινή, παρατηρείται το αντίστροφο φαινόμενο, το πλήθος μελισσιών που καταρρέουν (σύνδρομο κατάρρευσης μελισσιού- CCD Colony Collapse Disorder) είναι μικρότερο από τα νέα οικόσιτα μελίσσια (Goulson et al. 2015). Η μείωση των άγριων (μη οικόσιτων) επικονιαστών από το 1990 έχει αναγκάσει τους γεωργούς στη νοτιοδυτική Κίνα να κάνουν δια χειρός επικονίαση, η οποία είναι λιγότερο αποδοτική και οικονομικά ασύμφορη (Partrap and Ya 2012), με την εξαίρεση ορισμένων ποικιλιών οπωροκηπευτικών όπου η δια χειρός επικονίαση έχει οικονομικά πλεονεκτήματα. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι μια ποικιλία αχλαδιού όπου το αρσενικό και θηλυκό δέντρο δεν ανθοφορούν ταυτόχρονα. Στην Αυστραλία υπάρχει ένα καθεστώς καραντίνας προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι επιβλαβή είδη, ανταγωνιστικά ως προς τις μέλισσες (παθογόνα ή παρασιτικά) δεν θα διαταράζουν τους ήδη υπάρχοντες πληθυσμούς μελισσών, και προς το παρόν δεν υπάρχουν επιβεβαιωμένα κρούσματα που να υποδεικνύουν σε αύξηση του συνδρόμου κατάρρευσης μελισσιού (CCD). Στην Αφρική έχουν αναφερθεί συμβάντα κατάρρευσης μελισσιών από αιγύπτιους μελισσοκόμους (UNEP 2010), παρόλα αυτά στις περιοχές αυτές υπάρχουν λίγα δεδομένα, όσων αφορά τα άγρια είδη.

Η παγκόσμια μείωση των μη οικόσιτων επικονιαστών είναι μέρος μιας ευρύτερης παγκόσμιας καταστροφικής μείωσης των εντόμων και αρθρόποδων γενικότερα (Bijleveld van Lexmond et al. 2015). Προς το παρόν δεν υπάρχουν στοιχεία που να υποδεικνύουν μείωση στις καλλιέργειες καρπών εξαιτίας της μειωμένης επικονίασης σε παγκόσμια κλίμακα, ωστόσο κατι τέτοιο υποδεικνύεται από τοπικές μελέτες, κυρίως στην Ευρώπη και τις Η.Π.Α. Ως κύρια αίτια της πτώσης του αριθμού των επικονιαστών θεωρούνται η εντατικοποίηση της γεωργίας σε συνδυασμό με την απώλεια του φυσικού περιβάλλοντος τους που οδηγεί σε απώλεια τροφής και αδυναμία δημιουργίας φωλιών, η εκτεταμένη χρήση χημικών στις καλλιέργειες (μυοκτόνα, παρασιτοκτόνα και λιπάσματα), η κλιματική αλλαγή, η εξάπλωση παθογενειών, η αύξηση της κυκλοφορίας στους αυτοκινητοδρόμους, και η φωτορύπανση (Bijleveld van Lexmond et al. 2015).

2.4.1 Σύνδρομο Κατάρρευσης Μελισσιού - Colony Collapse Disorder (CCD)

Το σύνδρομο κατάρρευσης Μελισσιού σύμφωνα με τους Tarpy, D.R. and Pettis, J.S. (2019) είναι ένα περίεργο φαινόμενο κατά το οποίο οι εργάτριες μέλισσες μιας αποικίας εξαφανίζονται ή πεθαίνουν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε και περιγράφηκε πρώτη φορά στην Καλιφόρνια από τον συνεταιρισμό μελισσοκόμων οι οποίοι παρατήρησαν μια ανεξήγητη μείωση στον αριθμό των μελισσών.

Τα χαρακτηριστικά του συνδρόμου είναι: (Tarpy, D.R. and Pettis, J.S. 2019)

- Οι ενήλικες μέλισσες ξαφνικά εξαφανίζονται, χωρίς να υπάρχει συσσώρευση νεκρών μελισσών στα πέριξ του μελισσιού.
- Υπάρχουν αρκετές μικρές μέλισσες οι οποίες μόλις έχουν εκκολαφτεί, γεγονός που υποδεικνύει ότι οι μέλισσες εξαφανίστηκαν πολύ γρήγορα (διάστημα βδομάδων, και όχι μήνα).
- Καθώς οι μέλισσες που έχουν μείνει δεν μπορούν ακόμα να πετάξουν αποκλείεται ως εξήγηση η μετανάστευση της αποικίας.
- Υπάρχει επαρκής γύρη, φαγητό και μέλι στην κυψέλη, οπότε η πιθανότητα της πείνας ως αιτιολόγηση αποκλείεται.
- Χαμηλά επίπεδα σημαντικών παρασίτων, μυκήτων σε συνδυασμό με την απουσία ζώων, (όπως αντίπαλες μέλισσες, σκαθάρια κ.α) που θα ερχόντουσαν υπό φυσιολογικές συνθήκες να τραφούν με το μέλι της κυψέλης αυτής.

Έχουν προταθεί αρκετοί λόγοι ως αίτια του φαινομένου αυτού με τους πιο πιθανούς να είναι α) μερικά παράσιτα ή παθογένειες, μετάλλαξη κάποιας ασθένειας, ή ακόμα και μια νέα άγνωστη

ασθένεια, β) περιβαλλοντικοί λόγοι, ιδίως τα παρασιτοκτόνα και γ) διατροφικοί στρεσογόνοι παράγοντες όπως π.χ η έλλειψη ποικιλίας τροφής.

2.5 Επίλογος

Είναι φανερό ότι η μείωση των επικονιαστών θα επηρεάσει όλες τις εκφάνσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας, από τα απολύτως απαραίτητα όπως είναι η τροφή μέχρι την οικονομία, αλλά θα έχει επιπτώσεις και στο ζωικό βασίλειο διαταράσσοντας την τροφική αλυσίδα. Η εύρεση μιας λύσης είναι καθόλα επιτακτική. Στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται η εφικτότητα της δημιουργίας ενός ρομποτικού σμήνους μελισσών (ουσιαστικά επικονιαστών), το οποίο θα είναι σε θέση να κάνει την επικονίαση, συνεχίζοντας με τον τρόπο αυτό τη ζωή στον πλανήτη. Για την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου έχουν εισαχθεί δεδομένα για την καλλιέργεια ηλιανθού, όπως ο μέσος αριθμός ανθών ανά τετραγωνικό, η μέση συγκέντρωση γύρης ανά ανθό κ.α. (περισσότερες λεπτομέρειες θα δοθούν σε επόμενο κεφάλαιο).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (ACO)

3.1 Εισαγωγή

Με την τοποθέτηση της ηλεκτρονικής κυψέλης που περιέχει το σμήνος μελισσών σε ένα χωράφι, οι ρομποτικές μέλισσες/πράκτορες θα πρέπει να εντοπίσουν ποια φυτά ανθοφορούν, έχουν δηλαδή γύρη, προκειμένου να τα επικονιάσουν. Η αναγνώριση των ανθών θα γίνεται με κατάλληλους αισθητήρες, π.χ κάμερες, και γίνεται η παραδοχή ότι η κάθε μέλισσα/μέλος της αποικίας είναι καταλλήλως εξοπλισμένο. Τα φυτά που ανθοφορούν όμως δεν θα είναι συνέχεια τα ίδια, η περίοδος ανθοφορίας διαρκεί στα περισσότερα φυτά αρκετούς μήνες, οπότε το σμήνος θα πρέπει να είναι σε θέση να γνωρίζει ανά κάποιο χρονικό διάστημα (εξαρτάται από το προς επικονίαση φυτό) ποια φυτά ανθοφορούν.

Για το λόγο αυτό ο κώδικας που χρησιμοποιείται στη παρούσα εργασία δουλεύει σε δύο φάσεις. Στη πρώτη φάση τα μέλη της αποικίας αναζητούν τους ανθούς, με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών και βρίσκουν τη βέλτιστη διαδρομή από την κυψέλη, η οποία τοποθετείται σε τυχαίο σημείο στο χωράφι. Στη δεύτερη φάση οι ρομποτικές μέλισσες ακολουθώντας τη βέλτιστη διαδρομή πραγματοποιούν την επικονίαση συλλέγοντας γύρη από τους ανθούς.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού παρατίθενται η βασική θεωρία του αλγορίθμου αυτού, και το πώς εντάσσεται στον συνολικό κώδικα της παρούσας διπλωματικής.

3.2 Η αρχή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης μυρμηγκιών

Ο Marco Dorigo και οι συνεργάτες του εισήγαγαν τον πρώτο ACO στις αρχές του 1990 (Dorigo, M. and Blum, C. 2005). Η υλοποίηση του αλγορίθμου αυτού εμπνεύστηκε από την παρατήρηση τη συμπεριφοράς των μυρμηγκιών στις αποικίες τους. Τα μυρμήγκια είναι κοινωνικά έντομα. Ζούνε σε αποικίες και η συμπεριφορά τους διέπεται με βάση το κοινό συμφέρον της κοινότητας και την επιβίωση της αποικίας, αντί να δρουν εγωιστικά. Η συμπεριφορά όμως που αποτέλεσε την έμπνευση του αλγορίθμου είναι ο τρόπος αναζήτησης τροφής, και πιο συγκεκριμένα το πως τα μυρμήγκια είναι σε θέση να βρίσκουν τη συντομότερη διαδρομή από την φωλιά τους προς αυτή. Κατά την αναζήτηση τροφής, τα μυρμήγκια αρχικά αναζητούν πέριξ της αποικίας με τυχαίο τρόπο. Κατά τη μετακίνησή τους τα μυρμήγκια αφήνουν πίσω τους μια χημική ουσία τη φερομόνη, δημιουργώντας μια διαδρομή. Τα μυρμήγκια μπορούν να μυρίσουν τη φερομόνη. Κατά τη διαδικασία επιλογής της διαδρομής που θα ακολουθήσουν, τείνουν να επιλέγουν, στοχαστικά, τα μονοπάτια τα οποία έχουν υψηλή συγκέντρωση σε φερομόνη. Όταν ένα μυρμήγκι βρει μια πηγή τροφής, αξιολογεί την ποσότητα και την ποιότητά της και επιστρέφει μια ποσότητά της στη φωλιά. Η ποσότητα φερομόνης που αφήνει πίσω του στο ταξίδι της επιστροφής εξαρτάται από την αξιολόγηση που έχει κάνει. Το μονοπάτι της φερομόνης θα οδηγήσει τα υπόλοιπα μυρμήγκια στη τροφή. Αυτή η έμμεση επικοινωνία των μυρμηγκιών μέσω των μονοπατιών φερομόνης, γνωστή ως στιγμετρία (P-P Grassé 1959), τους επιτρέπει να βρουν το συντομότερο μονοπάτι. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1.



Εικόνα 5: Απεικόνιση της διαδικασίας εντοπισμού της συντομότερης διαδρομής προς την τροφή. (Σαλίχου Α, 2012)

Ως πρώτο βήμα για τη δημιουργία ενός αλγορίθμου για διακριτή βελτιστοποίηση παρουσιάζεται ένα διακριτό και απλοποιημένο παράδειγμα του φαινομένου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από ένα γράφημα $G = (V, E)$, όπου το V αποτελείται από δύο κόμβους, v_n (ο κόμβος που αντιπροσωπεύει η φωλιά, nest) και v_f (ο κόμβος που αντιπροσωπεύει την πηγή τροφής, food). Επιπλέον, το E αποτελείται από τις ενώσεις e_1 και e_2 των v_n και v_f . Στο e_1 αντιστοιχίζουμε το μήκος l_1 και στο e_2 το l_2 έτσι ώστε $l_2 > l_1$. Το e_1 με άλλα λόγια αναπαριστά τη συντομότερη διαδρομή μεταξύ v_n και v_f και το e_2 τη μεγαλύτερη. Τα μυρμήγκια αφήνουν ένα μονοπάτι φερομόνης στο διάβα τους. Η φερομόνη μοντελοποιείται ως ακολούθως. Εισάγουμε την τιμή της τεχνητής φερομόνης τ_i για κάθε μια από της διαδρομές e_i , $i=1,2$. Η τιμή αυτή υποδεικνύει το πόσο ισχυρή είναι η φερομόνη στο αντίστοιχο μονοπάτι. Τέλος εισάγουμε n_a τεχνητά μυρμήγκια. Κάθε μυρμήγκι συμπεριφέρεται ως εξής:
Ξεκινώντας από το v_n , τη φωλιά, επιλέγει μια διαδρομή με πιθανότητα

$$p_i = \frac{\tau_i}{\tau_1 + \tau_2}, \quad i = 1, 2,$$

μεταξύ των μονοπατιών e_1 και e_2 μέχρι την τροφή v_f . Προφανώς αν $\tau_1 > \tau_2$, η πιθανότητα να επιλέξει την e_1 είναι μεγαλύτερη και το αντίστροφο. Για την επιστροφή στη φωλιά επιλέγεται η ίδια διαδρομή (στο συγκεκριμένο παράδειγμα συμβαίνει αυτό διότι είναι συμμετρικό, η επιλογή μετάβασης από το v_n στο v_f είναι εφάμιλλη με την επιλογή μετάβασης από το v_f στο v_n) και ανανεώνεται η τιμή της τεχνητής φερομόνης για τη διαδρομή αυτή. Πιο λεπτομερώς, επιλέγοντας την διαδρομή e_i η τιμή της τεχνητής φερομόνης αλλάζει ως εξής:

$$\tau_i \leftarrow \tau_i + \frac{Q}{l_i}, \quad i = 1, 2,$$

όπου η θετική μεταβλητή Q είναι παράμετρος του μοντέλου. Με άλλα λόγια, η ποσότητα φερομόνης στο μονοπάτι εξαρτάται από το μέγεθός του, όσο μικρότερο το μονοπάτι που επιλέγεται τόσο υψηλότερη συγκέντρωση φερομόνης θα προστεθεί.

Η αναζήτηση τροφής της αποικίας στο μοντέλο αυτό προσομοιάζεται διαδοχικά ως εξής: Σε κάθε βήμα ή επανάληψη όλα τα μυρμήγκια είναι τοποθετημένα στον κόμβο v_n . Στη συνέχεια κάθε ένα από αυτά μετακινούνται από το v_n στο v_f . Στη φύση όμως η φερομόνη που έχει εναποθετηθεί σε ένα μονοπάτι εξατμίζεται με τη πάροδο του χρόνου. Προσομοιάζουμε την εξάτμιση αυτή στο μοντέλο αυτό ως :

$$\tau_i \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_i, \quad i = 1, 2,$$

Η παράμετρος $\rho \in (0, 1]$ είναι η παράμετρος που καθορίζει το χρόνο εξάτμισης της φερομόνης.

3.3 Το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή (TSP).

Το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή έχει μελετηθεί εκτενώς και έχει προσελκύσει πολλούς ερευνητές. Το πρόβλημα αυτό παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του ACO, από τον πρώτο αλγόριθμο που ονομαζόταν Ant system (L.M. Gambardella and M. Dorigo. 1995), ενώ με τα χρόνια έχουν προταθεί πολλές παραλλαγές του. Το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή είναι τόσο διαδεδομένο για αρκετούς λόγους όπως

- είναι ένα πρόβλημα στο οποίο ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης μυρμηγκιών είναι εύκολα εφαρμόσιμος.

- Είναι NP-hard, είναι πρακτικά αδύνατο δηλαδή να μελετηθούν όλες οι πιθανές λύσεις του προβλήματος προκειμένου να επιλεγεί η καταλληλότερη (Σαλίχου Α. 2012)
- Είναι βασικό για την εξέταση της αποτελεσματικότητας νέων αλγορίθμων, και με βάση το πόσο καλή είναι η λύση του νέου προς δοκιμή αλγορίθμου στο πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή κρίνεται η χρηστικότητά του
- Είναι απλό στην κατανόησή του, οπότε η συμπεριφορά του αλγορίθμου δεν επισκιάζεται από πολλές τεχνικές λεπτομέρειες.

Το πρόβλημα μπορεί να περιγραφεί ως η προσπάθεια ενός πωλητή, ο οποίος ξεκινώντας από την πόλη που διαμένει θέλει να επισκεφτεί, με το συντομότερο δυνατό τρόπο, έναν αριθμό πόλεων και να επιστρέψει πίσω στη πόλη του, περνώντας από την κάθε πόλη μια φορά. Μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα γράφημα $G = (N, A)$, όπου N είναι οι πόλεις/ κόμβοι που πρέπει να επισκεφτεί ο πωλητής και A οι συνδέσεις/ δρόμοι μεταξύ των πόλεων. Κάθε σύνδεση/ δρόμος στο γράφημα έχει μια απόσταση d_{ij} , που δηλώνει την απόσταση από την πόλη i στη πόλη j .

3.3.1 Εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης μυρμηγκιών στο πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή.

Στην αρχή του αλγορίθμου καθένα από τα n μυρμηγκία της αποικίας επιλέγει τυχαία μια πόλη και στη συνέχεια διαδοχικά/ επαναληπτικά εφαρμόζει έναν κανόνα μετάβασης σε άλλη πόλη. Η διαδρομή του κάθε μυρμηγκιού φτιάχνεται ως εξής: όταν βρίσκεται σε μια πόλη i επιλέγει μια πόλη j που δεν έχει επισκεφτεί όντας προκατειλημμένο στην επιλογή από τη συγκέντρωση φερομόνης $\tau_{ij}(t)$ μεταξύ των πόλεων i και j και τοπικών ευρετικών πληροφοριών. Οι πληροφορίες αυτές είναι συνάρτηση του μεγέθους της απόστασης των δύο πόλεων. Τα μυρμηγκία πιθανολογικά επιλέγουν την επόμενη πόλη με βάση τη μικρότερη απόσταση και τη συγκέντρωση φερομόνης μεταξύ τους. Η πιθανότητα αυτή δίνεται από τη παρακάτω συνάρτηση:

$$p_{ij}^k(t) = \frac{\tau(t)_{ij}^\alpha \cdot n_{ij}^\beta}{\sum_{i \in N} \tau(t)_{ij}^\alpha \cdot n_{ij}^\beta}, \quad j \in N_i^k$$

Τα α και β είναι δύο παράμετροι που καθορίζουν τη σχετική επίδραση του ίχνους της φερομόνης και της ευρετικής πληροφορίας.

- Αν $\alpha=0$ οι πιθανότητες επιλογής επόμενης πόλης είναι ανάλογες του $[n_{ij}]^\beta$ και είναι πιθανότερο να επιλεγθούν πόλεις βάση της συντομότερης απόστασής τους. (Στη περίπτωση αυτή ο αλγόριθμος αντιστοιχεί σε “άπληστο” αλγόριθμο) με πολλαπλά αρχικά σημεία αφού τα μυρμηγκία αρχίζουν από τυχαίες πόλεις.
- Αν $\beta=0$ η συγκέντρωση της φερομόνης ενισχύεται γεγονός που οδηγεί σε μια στάσιμη κατάσταση, τα μυρμηγκία παράγουν και ακολουθούν το ίδιο μονοπάτι βασισμένα μόνο στη συγκέντρωση φερομόνης που έχει ενισχύοντάς την, το οποίο οδηγεί με τη σειρά του στη δημιουργία μη ποιοτικών λύσεων.

Κάθε μυρμηγκί αφού επισκεφτεί μια πόλη τη προσθέτει στη διαδρομή του, μέχρι το καθένα να κατασκευάσει μια προσωπική διαδρομή/ πιθανή αρχική λύση περνώντας από όλα τα σημεία. Στη συνέχεια τα επίπεδα φερομόνης ανανεώνονται, στην αρχή μειώνονται κατά μια σταθερή τιμή, προσομοιάζοντας με τον τρόπο αυτό την εξάτμιση της φερομόνης με την πάροδο του χρόνου, και μετά κάθε μυρμηγκί εναποθέτει φερομόνη στο μονοπάτι, μεταξύ των πόλεων, που έκανε.

$$r_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t), \quad \forall (i, j)$$

Με $0 \leq \rho < 1$ ο ρυθμός εξάτμισης της φερομόνης και m το πλήθος των μυρμηγκιών. Τα επίπεδα φερομόνης αρχικοποιούνται με μια χαμηλή τιμή στην αρχή του αλγορίθμου. (Σαλίχου Α. 2012).
Μια απλή εφαρμογή του αλγορίθμου σε ψευδογλώσσα είναι η ακόλουθη.

Συνάρτηση ACO αλγορίθμου για το πρόβλημα πλανόδιου πωλητή

 Όρισε παραμέτρους, αρχικοποίησε τα επίπεδα φερομόνης

Όσο (οι παράμετροι δεν ικανοποιούνται) **κάνε**

Φτιάξε_Λύσεις

Κάνε τοπική αναζήτηση

Ανανέωσε τα μονοπάτια

Τέλος

Τέλος ACO αλγορίθμου για το πρόβλημα πλανόδιου πωλητή

3.4 Αντί επιλόγου

Το χωράφι που θα τοποθετηθεί το σμήνος θεωρούμε ότι έχει τυχαία διασκορπισμένα λουλούδια (ηλιανθούς) εκ των οποίων μερικά ανθοφορούν. Η κάθε μέλισσα/ ρομποτικός πράκτορας θεωρείται ότι είναι εξοπλισμένη καταλλήλως με αισθητήρες για τη πλοήγηση και τον εντοπισμό των ανθών. Αφού εντοπισθούν τα προς επικοινωνία λουλούδια το πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως ένα πρόβλημα πλανόδιου πωλητή· αρχικοποιούνται τα επίπεδα φερομόνης ο ρυθμός εξάτμισης και βρίσκεται ένα βέλτιστο μονοπάτι για την επίσκεψη όλων των ανθών.

Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή και επίλυση

4.1 Εισαγωγή

4.1.1 Επιλογή περιβάλλοντος προγραμματισμού

Ως περιβάλλον προγραμματισμού επιλέχθηκε το περιβάλλον της Matlab. Το περιβάλλον αυτό χρησιμοποιείται εκτενώς σε πανεπιστημιακά μαθήματα, ερευνητικά προγράμματα και εφαρμογές με επιστημονικούς υπολογισμούς, καθώς είναι ένα διαδραστικό πρόγραμμα για αριθμητικούς υπολογισμούς και δυνατότητα οπτικοποίησης των δεδομένων. Το Matlab είναι ένα χρήσιμο και δυνατό εργαλείο για τις θετικές και φυσικές επιστήμες. Ειδικότερα, στη βιομηχανία χρησιμοποιείται κυρίως στον τομέα της έρευνας και ανάπτυξης και συμβάλει στην αύξηση του επιπέδου παραγωγικότητας είναι ειδικά σχεδιασμένο για υπολογισμούς με πίνακες, όπως η επίλυση γραμμικών συστημάτων, η εύρεση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων κ.α. Επιπλέον είναι εφοδιασμένο με πολλές επιλογές για την απεικόνιση και κατασκευή γραφικών παραστάσεων, ενώ διαθέτει έτοιμα προγράμματα και συναρτήσεις γραμμένα στη δική του γλώσσα προγραμματισμού.

Ο λόγος επιλογής του περιβάλλοντος της Matlab έγκειται στην ευκολία που παρέχει ως προς τον προγραμματισμό και την κατάστρωση προγραμμάτων καθώς διαθέτει έτοιμες συναρτήσεις στη βιβλιοθήκη του.

4.1.2 Παραδοχές

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι να εξετάσει αν και εφόσον είναι εφικτό η δημιουργία ενός ρομποτικού σμήνους το οποίο μπορεί να φέρει εις πέρας τη διαδικασία της επικοινωνίας καθώς και να αποτελέσει έναυσμα και σημείο αναφοράς για περαιτέρω έρευνα.

Η ρομποτική τεχνολογία τώρα αρχίζει να κινείται προς τη δημιουργία ρομποτικών μελισσών. Μέχρι τη στιγμή συγγραφής της διπλωματικής αυτής δεν έχει κατασκευαστεί κάποιο πρωτότυπο ρομποτικής μέλισσας ή ακόμη κι αν έχει κατασκευαστεί οι πληροφορίες και προδιαγραφές του δεν είναι δημόσιες (World Economic Forum. (n.d.)). Ως εκ τούτου έχουν γίνει κάποιες παραδοχές, μερικές από τις οποίες αναφερθήκανε πρωτύτερα, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του σμήνους. Οι παραδοχές αυτές είναι:

- i. Κάθε ρομποτική μέλισσα είναι εφοδιασμένη και φέρει κατάλληλους αισθητήρες για τον προσανατολισμό, την επικοινωνία και αναγνώριση της μορφολογίας των λουλουδιών.
- ii. Η ταχύτητα του κάθε ρομπότ είναι 5 m/s ή 500 cm/s.
- iii. Η αυτονομία της μπαταρίας κάθε ρομποτικής μέλισσας είναι 5min ή 300sec.
- iv. Η συλλογή της γύρης επιτυγχάνεται με την επαφή της μέλισσας στον ανθό, καθώς διαθέτει ειδική επιφάνεια στην οποία κολλάει και μεταφέρεται η γύρη. Το ποσό γύρης που κουβαλάει μια μέλισσα με την επαφή της με έναν ανθό δίνεται στοχαστικά $r = 0 + (28.7 - 0) \cdot \text{rand}(1,1)$ με $0 \leq r < 28,7$ (αναφερόμενο σε mg γύρης). Η διαδικασία συλλογής της διαρκεί 5 sec.

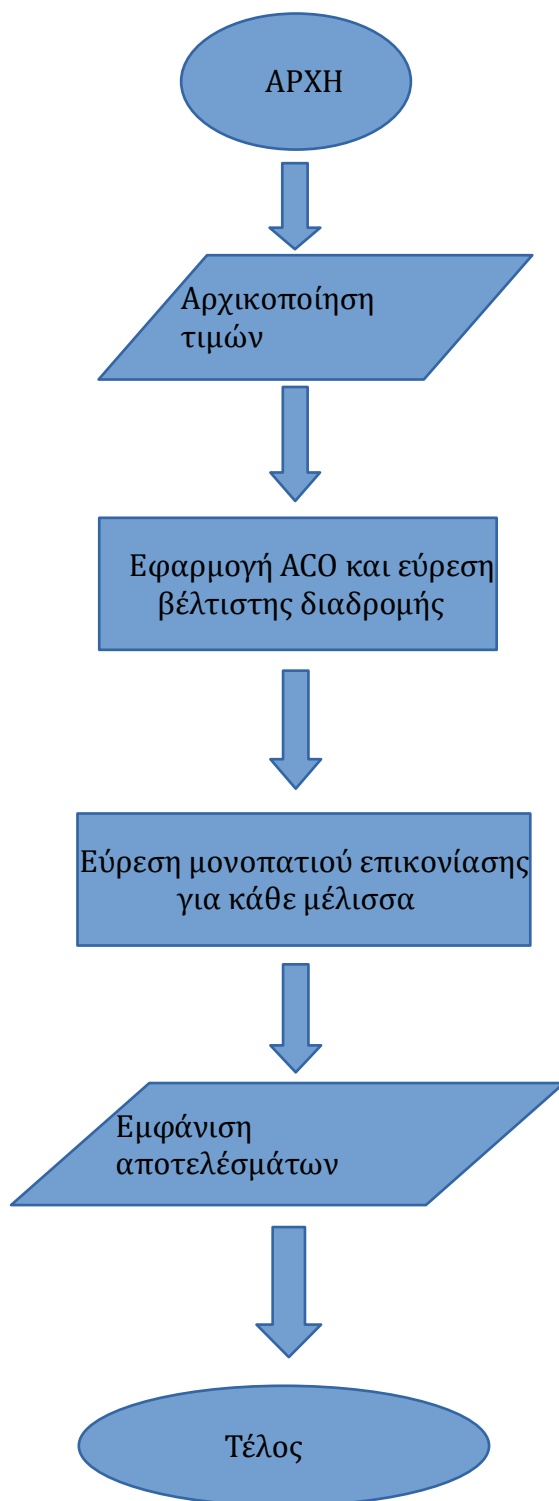
4.1.3 Δεδομένα

Για την ακριβέστερη προσέγγιση της επικοινωνίας αλλά και για την επαλήθευση ότι ο κώδικας που καταστρώθηκε δεν αποκλίνει πολύ από την πραγματικότητα, εισήχθησαν δεδομένα από έρευνες πάνω στις καλλιέργειες ηλιανθού και πιο συγκεκριμένα της ποικιλίας, *Helianthus annuus*, η ανθοφορία των οποίων είναι το πολύ δύο μήνες (τέλη Αυγούστου με αρχές Οκτώβρη). Τα δεδομένα αυτά παρατίθενται ακολούθως (Becher M.A. et al. 2016):

- i. Ο μέσος αριθμός γύρης ανά λουλούδι ανά μέρα είναι 28,7 mg. Στα δεδομένα του προγράμματος κάθε λουλούδι έχει 28,7 mg γύρης
- ii. Το μέσο πλήθος λουλουδιών σε μια καλλιέργεια είναι 3,75 ανά m^2

4.1.4 Δομή προγράμματος

Το πρόγραμμα αποτελείται από τη main και 9 υπορουτίνες οι οποίες επιτελούν κάποια λειτουργία. Στις επόμενες παραγράφους επεξηγείται η λειτουργία τους.



4.2 Συνάρτησεις

4.2.1 main.m

Η βασική συνάρτηση που υλοποιεί τον αλγόριθμο είναι η **main.m**. Σε αυτή γίνεται η αρχικοποίηση των αρχικών τιμών του προγράμματος. Αρχικά κατασκευάζεται το γράφημα το οποίο προσομοιάζει το χωράφι με τα λουλούδια με τη συνάρτηση **createGraph.m**. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το πρώτο στάδιο του αλγορίθμου είναι η εύρεση ενός βέλτιστου μονοπατιού μεταξύ των λουλουδιών. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε σαν ένα πρόβλημα πλανόδιου πωλητή. Οι αρχικές τιμές που δόθηκαν είναι:

- i. Ο αριθμός των μελισσών **beeNo=30**. Υπάρχουν 30 διαθέσιμες μέλισσες στη κυψέλη.
- ii. Η αρχική συγκέντρωση φερομόνης τέθηκε συμφωνά με τον τύπο $\tau_{00}=10 \cdot 1/(\text{graph.n} \cdot \text{mean}(\text{graph.edges}(:)))$, όπου **graph.n** ο αριθμός των κόμβων και **mean(graph.edges(:))** ο μέσος όρος των αποστάσεων μεταξύ των λουλουδιών.
- iii. Το πόσο ελκυστική είναι μια διαδρομή δόθηκε από $\eta=1/\text{graph.edges}$.
- iv. Ο ρυθμός εξάτμισης στο χρόνο **rho = 0.5**.
- v. Οι συντελεστές α και β τέθηκαν ίσοι με τη μονάδα, **alpha = 1, beta = 1**.
- vi. Η τιμή της καλύτερης διαδρομής ίση με το άπειρο, **bestFitness = inf**.
- vii. Τέλος ο αριθμός των επαναλήψεων ορίστηκε ίσος με 10, **maxIter = 10**.

Στη συνέχεια, με το πέρας του αλγορίθμου βελτιστοποίησης μυρμηγκιών η βέλτιστη διαδρομή αποθηκεύεται στην αποικία ως το μονοπάτι που ακολουθεί η βασίλισσα. Αρχικοποιούνται οι ταχύτητα των μελισσών και η αυτονομία της μπαταρίας τους, **sp=500 cm/s** και **bat=300 s** αντίστοιχα και η μεταβλητή **delay=5 s**, η οποία προσομοιάζει τα δευτερόλεπτα που χρειάζεται μια μέλισσα προκειμένου να συλλέξει τη γύρη. Η τιμή γύρης που συλλέγει όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω δίνεται από το $r = 0 + (28.7 - 0) \cdot \text{rand}(1,1)$, όπου $0 \leq r < 28,7$ (μια μέλισσα δηλαδή μπορεί να συλλέξει από καθόλου γύρη μέχρι όλη από ένα λουλούδι).

Όταν μια μέλισσα βρίσκεται σε ένα τυχαίο λουλούδι ελέγχεται, αν η μπαταρία της επαρκεί για να επισκεφτεί ένα επόμενο και μετά να επιστρέψει στη κυψέλη. Για την επιλογή του επόμενου λουλουδιού από μια τυχαία μέλισσα ελέγχεται κατά πόσο το λουλούδι αυτό έχει γύρη. Αν δεν επαρκεί η μπαταρία να πραγματοποιήσει το ταξίδι αυτό η συγκεκριμένη μέλισσα επιστρέφει πίσω και ξεκινάει η επόμενη μέχρις ότου εξαντληθεί ο αριθμός των διαθέσιμων μελισσών. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι καμία μέλισσα δεν θα βρεθεί χωρίς μπαταρία στη μέση μιας διαδρομής ή κατά την επιστροφή της στη κυψέλη.

4.2.2 createGraph.m

Ξεκινώντας τον αλγόριθμο, το πρώτο πράγμα που κάνει είναι να φτιάχνει το χωράφι στο οποίο θα δράσει ο αλγόριθμος, και να τοποθετήσει άνθη σε τυχαία σημεία. Η κυψέλη με τις ρομποτικές μέλισσες τοποθετείται επίσης τυχαία και τη συγκέντρωση της γύρης ανά λουλούδι στα 28,7 mg (μέση τιμή γύρης ανα ανθό ανά ημέρα κατά Becher M.A, 2016). Για εξεύρεση των ανθών θεωρείται ότι κάθε ρομποτική μέλισσα είναι σε θέση και εξοπλισμένη καταλλήλως, οπότε θεωρείται ως δεδομένο. Στην περίπτωση που οι μέλισσες αυτές γίνουν διαθέσιμες για μελέτη και έρευνα τη θέση της συνάρτησης αυτής θα πάρει μια συνάρτηση εντοπισμού των λουλουδιών. Υπάρχουν αρκετές επιλογές χωραφιών στη συνάρτηση, αυτή με ένα το ενεργό, με δεδομένα ότι κάθε τετραγωνικό έχει σύμφωνα με τους Becher M.A et al. (2016) 3 με τέσσερα ανθισμένα λουλούδια.

4.2.3 createColony.m

Η συνάρτηση αυτή φτιάχνει την αποικία των μελισσών αρχικοποιώντας την θέση της κυψέλης (σημείο αφετηρίας) ως τον κόμβο 1, θέτοντας την τιμή αυτονομίας της σε μπαταρία στα 300 sec ή 5 min και δημιουργώντας μια ένδειξη για τη μπαταρία κάθε μέλισσας. Στη συνέχεια αφού έχουν βρεθεί οι προς επικοινωνία ανθοί, ξεκινάει το πρώτο βήμα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης μυρμηγκιών, δηλαδή η τοποθέτηση κάθε μέλισσας σε ένα τυχαίο κόμβο/ ανθό. Η συνάρτηση αυτή περατώνεται αφού όλες οι μέλισσες έχουν επισκεφτεί όλα τα λουλούδια μια φορά, σημειώνεται με 0 κάθε φορά που κάποια μέλισσα επισκέπτεται ένα λουλούδι για κάθε μέλισσα και σχηματίζεται μια αρχική εφικτή λύση για κάθε μέλισσα. Η επιλογή του επόμενου κόμβου γίνεται καλώντας την έτοιμη συνάρτηση ρουλέτας **rouletteWheel**.

4.2.4 fitnessFunction.m

Με τη συνάρτηση αυτή αποθηκεύεται το συνολικό μήκος της διαδρομής που έχει κάνει κάθε μέλισσα. Η συνάρτηση αυτή καλείται στο **main.m** .

4.2.5 updatePhromone.m

Όπως υποδηλώνει το όνομά της η συνάρτηση αυτή ανανεώνει τη συγκέντρωση της φερομόνης στις διαδρομές μεταξύ των ανθών.

4.2.6 drawBestTour.m , drawGraph.m , drawPhromone.m

Οι τρεις συναρτήσεις αυτές καλούνται σε ένα κοινό subplot, σχεδιάζονται και ανανεώνονται παράλληλα και διαδοχικά με κάθε επανάληψη μέχρι την εύρεση μιας βέλτιστης λύσης.

4.2.7 pollPath.m

Η συνάρτηση αυτή είναι και ένας από τους λόγους που επιλέχθηκε το περιβάλλον της Matlab, καθώς είναι μια έτοιμη συνάρτηση απεικόνισης αποτελεσμάτων με τη συνάρτηση **comet** φτιαγμένη από τον Charles R. Denham, MathWorks το 1989, και έχει προσαρμοστεί στις ανάγκες του αλγορίθμου.

4.3 Επαλήθευση αποτελεσμάτων

Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου ήταν μια πρόκληση, καθώς δεν υπάρχει στη βιβλιογραφία ένα αντίστοιχο εγχείρημα. Ως εκ τούτου η παραδοσιακή οδός επαλήθευσης μέσω διασταύρωσης των αποτελεσμάτων με άλλες έρευνες, δημοσιεύσεις ή και πτυχιακές ήταν αδύνατο. Για την εξακρίβωση της ορθής λειτουργίας και λογικής του αλγορίθμου λοιπόν εισήχθησαν όσο το δυνατόν ακριβέστερα δεδομένα για τον τρόπο επικοινωνίας του ηλιανθού από πραγματικές μέλισσες.

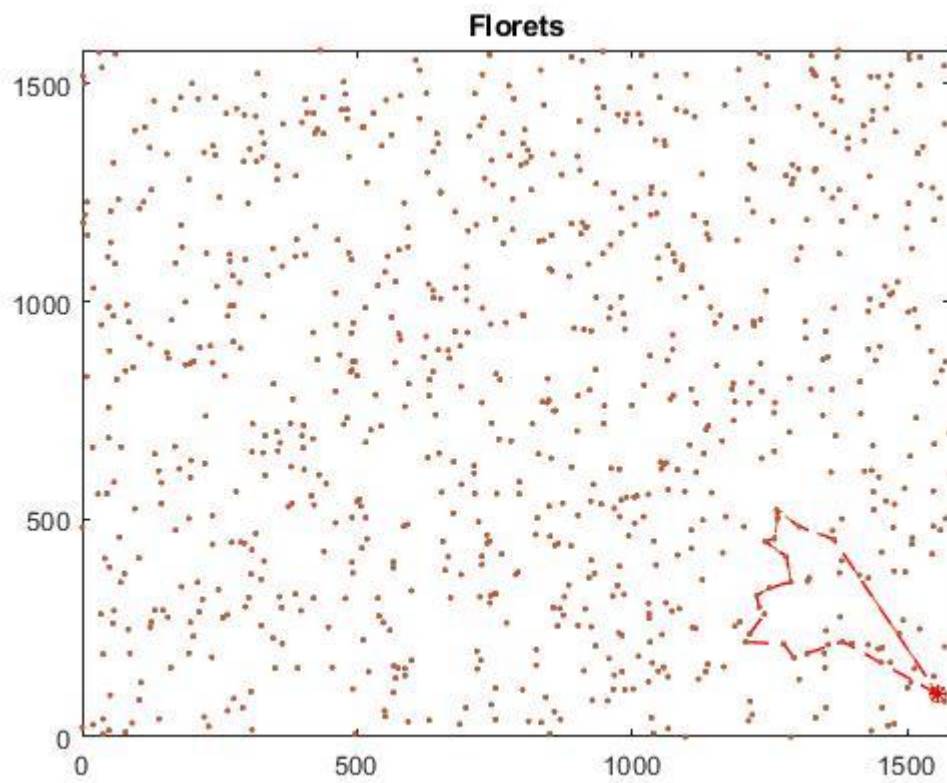
4.3.1 Τρόπος 1

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και η πηγή τους παρατίθενται παρακάτω. (σημειώνεται ότι όλα τα δεδομένα έχουν ληφθεί για την μέλισσα της οικογένειας των άπιδων και πιο συγκεκριμένα την *Apis mellifera* και τη συμπορορά της στον ηλιανθό και πιο συγκεκριμένα στο λουλούδι *Helianthus annuus*).

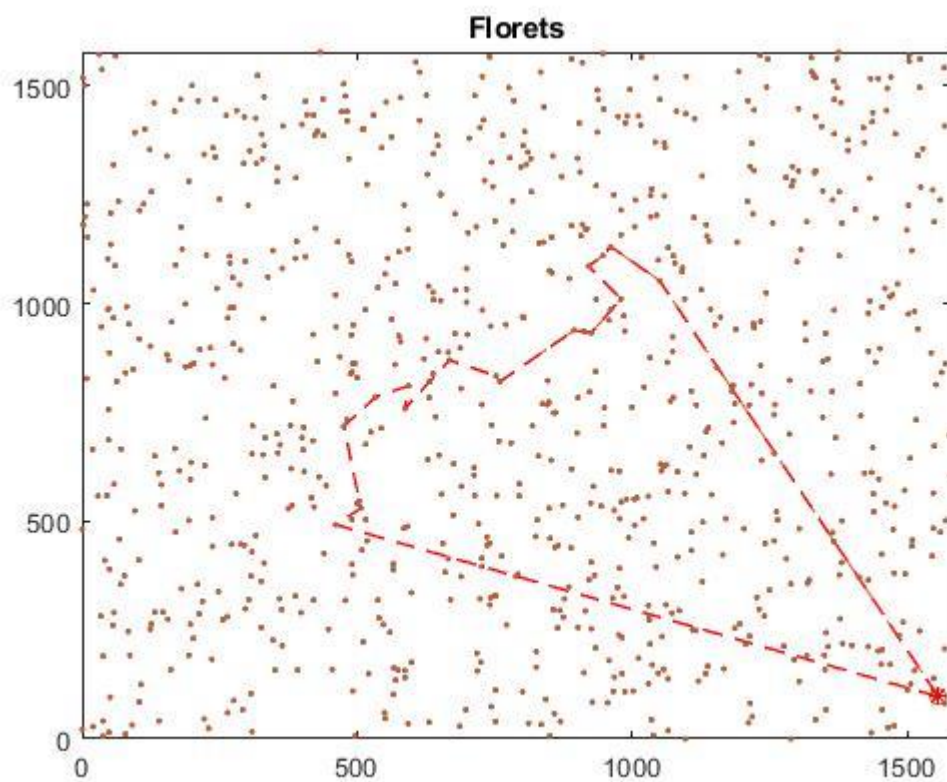
- i. Η μέση ταχύτητα μιας μέλισσας κατά τη διάρκεια επιστροφής της στη κυψέλη και ενώ είναι φορτωμένες με γύρη, πρόπολη ή νερό, σύμφωνα με τη βρετανική ένωση μελισσοκόμων (British Beekeepers Association. (n.d.)). είναι 17 km/h ή 472 cm/sec. Οπότε η τιμή της ταχύτητας κάθε μέλισσας τέθηκε τόσο.
- ii. Σύμφωνα με δια ζώσης παρατηρήσεις που έγιναν και δημοσιεύτηκαν στο *Journal of the Kansas Entomological Society* από τον Fell, R.D. et all (1986) ο μέσος χρόνος παραμονής μιας μέλισσας σε κάθε λουλούδι είναι 30 με 40 λεπτά. Η τιμή που δόθηκε στο πρόγραμμα ως η μεταβλητή delay, δηλαδή ο χρόνος παραμονής στο κάθε λουλούδι είναι 2400 sec ή 40 min.
- iii. Σύμφωνα με την ίδια δημοσίευση, η οποία χρησιμοποιεί μια παλαιότερη έρευνα από το 1979, ο ενδεδειγμένος αριθμός μελισσών (μιλάμε για κανονικές μέλισσες) για επικοινωνία ηλιανθού είναι 24 μέλισσες ανά 100 λουλούδια.
- iv. Οι ώρες που οι μέλισσες πηγαίνουν να συλλέξουν νέκταρ (και ως συνεπακόλουθο να γεμίσουν με γύρη και να επικοινωνούν) σύμφωνα με την ίδια έρευνα είναι 8 π.μ με 6 μ.μ. δηλαδή 10 ώρες ή 36000 sec. Η τιμή που δόθηκε στη μπαταρία κάθε μέλισσας (χρησιμοποιούμε το ίδιο πρόγραμμα ρομποτικού σμήνους) είναι 36000 (sec) και αναπαριστά τη διάρκεια της μέρας αναζήτησης τροφής μιας μέλισσας που είναι 10 ώρες.

Ο αλγόριθμος εφοδιασμένος με τα δεδομένα αυτά έτρεξε σε ένα χωράφι έκτασης ενός τετάρτου του στρέμματος (1580cm x1580 cm) με 845 ανθισμένα λουλούδια. Ο ενδεδειγμένος αριθμός μελισσών σύμφωνα με δια ζώσης παρατήρηση όπως αναφέρουν οι Fell, R.D. et all (1986) είναι 24 για 100 λουλούδια. Ο αλγόριθμος τροφοδοτημένος με πραγματικά δεδομένα χρησιμοποιεί 135 μέλισσες για την επικοινωνία 845 ανθών με το πέρας 10 επαναλήψεων (iteration). Με τη χρήση της απλής μεθόδου των τριών το παραπάνω αποτέλεσμα αντιστοιχεί σε 15,97 μέλισσες ανά 100 ανθούς. Η διαφορά των μελισσών μεταξύ της μελέτης και του αλγορίθμου οφείλεται σε αρκετούς εξωγενείς παράγοντες, όπως η ταχύτητα του αέρα, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η υγρασία και άλλα, οι οποίοι είναι αρκετά δύσκολο να μοντελοποιηθούν και να ληφθούν υπόψιν στο υπάρχον πρόγραμμα.

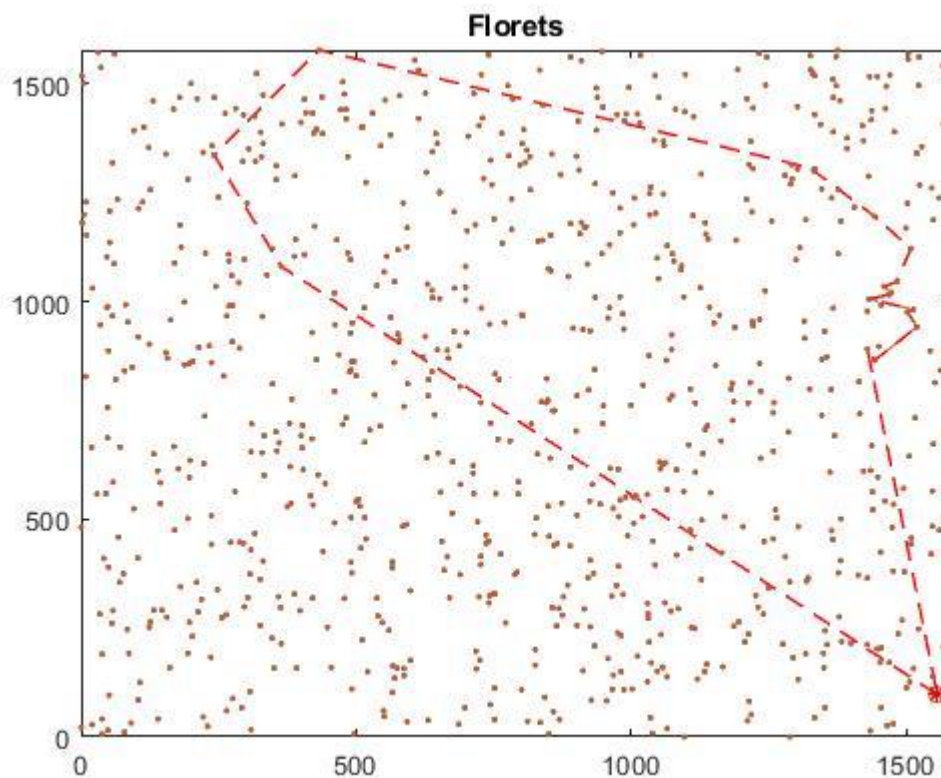
Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω οι διαδρομές επικοινωνίας τριών τυχαίων μελισσών.



Εικόνα 6: Μονοπάτι επικοινωνίας της μέλισσας υπ' αριθμόν 4.



Εικόνα 7: Μονοπάτι επικοινωνίας της μέλισσας υπ' αριθμόν 74.



Εικόνα 8: Μονοπάτι επικοινωνίας της μέλισσας υπ' αριθμόν 99

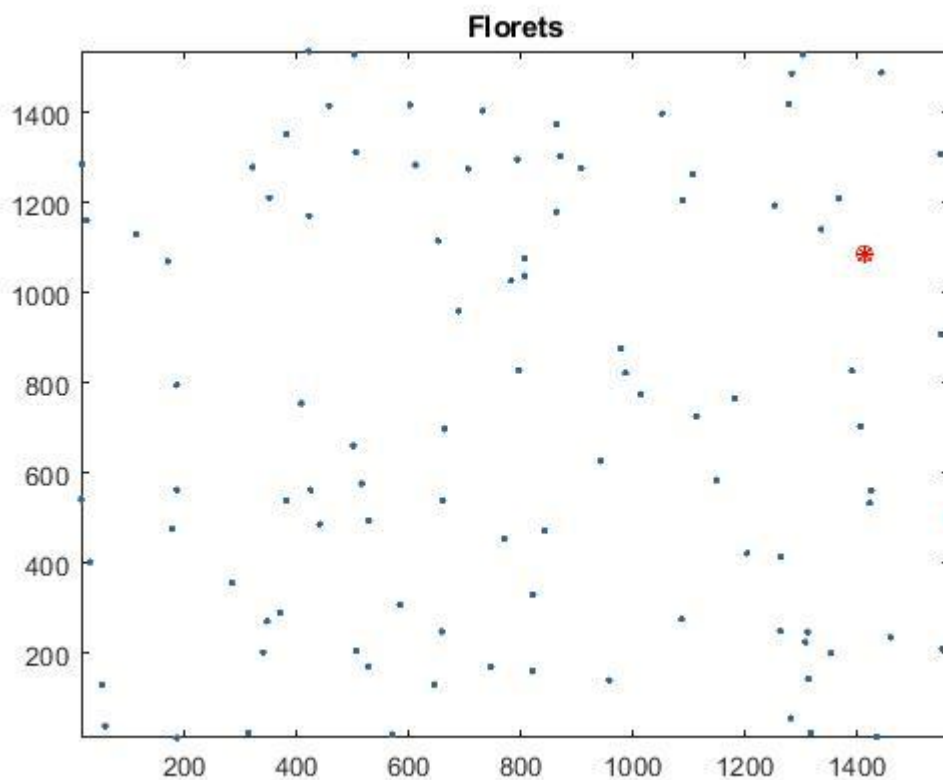
4.3.2 Τρόπος 2

Σύμφωνα με τους Chambó E.D., et al. (2011), κάθε ανθός επισκέπτεται κατά μέσο όρο από 2,27 με 2,94 μέλισσες. Καταστρώθηκε ένα γρήγορο πρόγραμμα στο τέλος του αλγορίθμου μας στο **main.m** με τα δεδομένα των πραγματικών μελισσών σε καλλιέργεια 845 λουλουδιών, το οποίο υπολογίζει το μέσο όρο μελισσών που επισκέπτονται έναν ανθό. Το πρόγραμμα αυτό μετράει πόσες φορές επισκέπτεται από μια μέλισσα κάθε λουλούδι. Στη συνέχεια αθροίζει τον αριθμό των επισκέψεων και τον διαιρεί με το πλήθος των λουλουδιών. Το αποτέλεσμα του αποθηκεύεται στη μεταβλητή `MO_visitation`. Η τιμή του λοιπόν αφού τρέξαμε τον αλγόριθμο δέκα φορές κυμαίνεται από 2,57 με 2,89 αριθμοί εντός των ορίων της έρευνας.

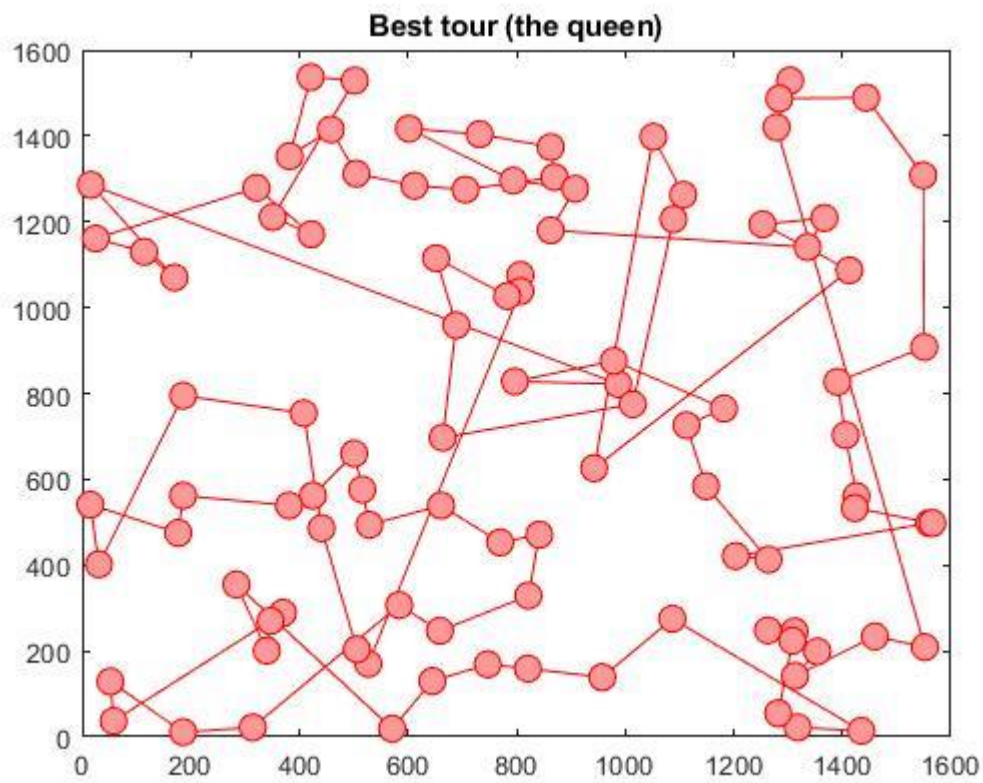
4.4 Αποτελέσματα

Στην Εικόνα 11 φαίνεται η τελική συγκέντρωση φερομόνης μετά από 10 επαναλήψεις του αλγορίθμου βελτιστοποίησης μυρμηγκιών, το χωράφι καλλιέργειας στην Εικόνα 9, $\frac{1}{4}$ στρέμματος και η καλύτερη διαδρομή στην Εικόνα 9.

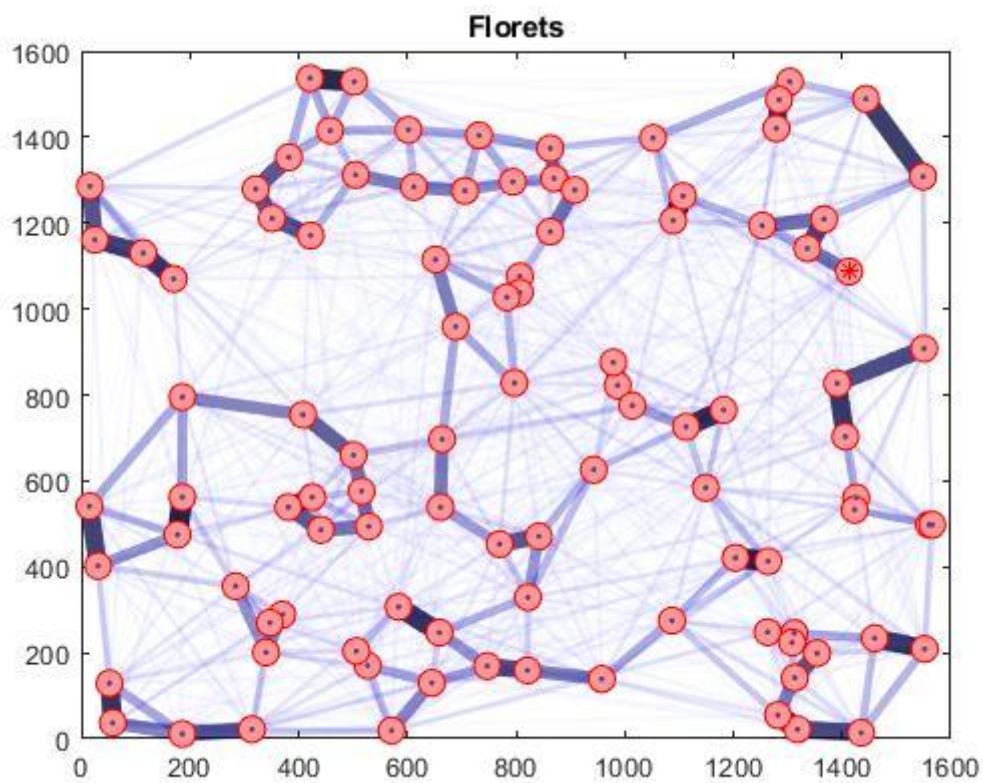
Με το πέρας του αλγορίθμου έχουμε ότι η επικονίαση καρπών με σμήνος ρομποτικών μελισσών είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί, και είναι μάλιστα πιο αποτελεσματικό, στη στήλη ρ κανένα από τα 100 λουλούδια δεν έχει μείνει με γύρη που δεν συλλέχθηκε (Εικόνες 12-16). Σημείωση το λουλούδι 1 είναι η κυψέλη). Χρειάζονται 6-7 μέλισσες αναλόγως τη μορφολογία του χωραφιού και ο μέσος όρος επισκεψιμότητας ανά ανθό γύρω στο 2,6. Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαδρομές της κάθε μέλισσας για να επικονιάσουν τα λουλούδια. Με κόκκινο έχει σημειωθεί η κυψέλη και οι κουκίδες αναπαριστούν τα λουλούδια. Ο άξονας x φτάνει μέχρι το 1580, έχει θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει cm και όλοι οι υπολογισμοί του αλγορίθμου έχουν γίνει βάση αυτού, (δηλαδή η ταχύτητα έχει μετρηθεί σε cm/s, οι αποστάσεις μεταξύ των λουλουδιών επίσης).



Εικόνα 9: Το χωράφι με τα τυχαία κατανεμημένα λουλούδια, με κόκκινο συμβολίζεται η κυψέλη.



Εικόνα 10. Η καλύτερη διαδρομή για την προσπέλαση όλων των λουλουδιών.



Εικόνα 11: Η συγκέντρωση φερομόνης μετά από 10 επαναλήψεις

graph.node				
Fields	x	y	p	
1	213	432	28.7000	
2	51	102	0	
3	182	191	0	
4	78	352	0	
5	87	6	0	
6	111	289	0	
7	171	232	0	
8	192	382	0	
9	151	121	0	
10	401	193	0	
11	176	488	0	
12	46	137	0	
13	471	323	0	
14	410	8	0	
15	344	469	0	
16	327	403	0	
17	125	137	0	
18	334	78	0	
19	2	400	0	
20	473	468	0	
21	23	158	0	

Εικόνα 12: Συγκέντρωση γύρης (στήλη p) για τα λουλούδια 1-21 με το πέρας του αλγορίθμου

graph.node				
Fields	x	y	p	
22	253	323	0	
23	500	498	0	
24	428	198	0	
25	482	279	0	
26	6	122	0	
27	159	75	0	
28	67	27	0	
29	78	497	0	
30	442	466	0	
31	195	105	0	
32	452	469	0	
33	85	184	0	
34	0	403	0	
35	376	289	0	
36	274	83	0	
37	293	158	0	
38	117	108	0	
39	63	260	0	
40	366	482	0	
41	134	253	0	
42	70	389	0	

Εικόνα 13: Συγκέντρωση γύρης (στήλη p) για τα λουλούδια 22-42 με το πέρας του αλγορίθμου

graph.node				
Fields	x	y	p	
43	271	484	0	
44	351	77	0	
45	371	334	0	
46	25	87	0	
47	431	88	0	
48	414	68	0	
49	59	207	0	
50	258	6	0	
51	123	280	0	
52	196	244	0	
53	166	357	0	
54	101	443	0	
55	164	241	0	
56	219	326	0	
57	337	487	0	
58	465	497	0	
59	384	455	0	
60	449	443	0	
61	171	238	0	
62	103	60	0	
63	433	45	0	

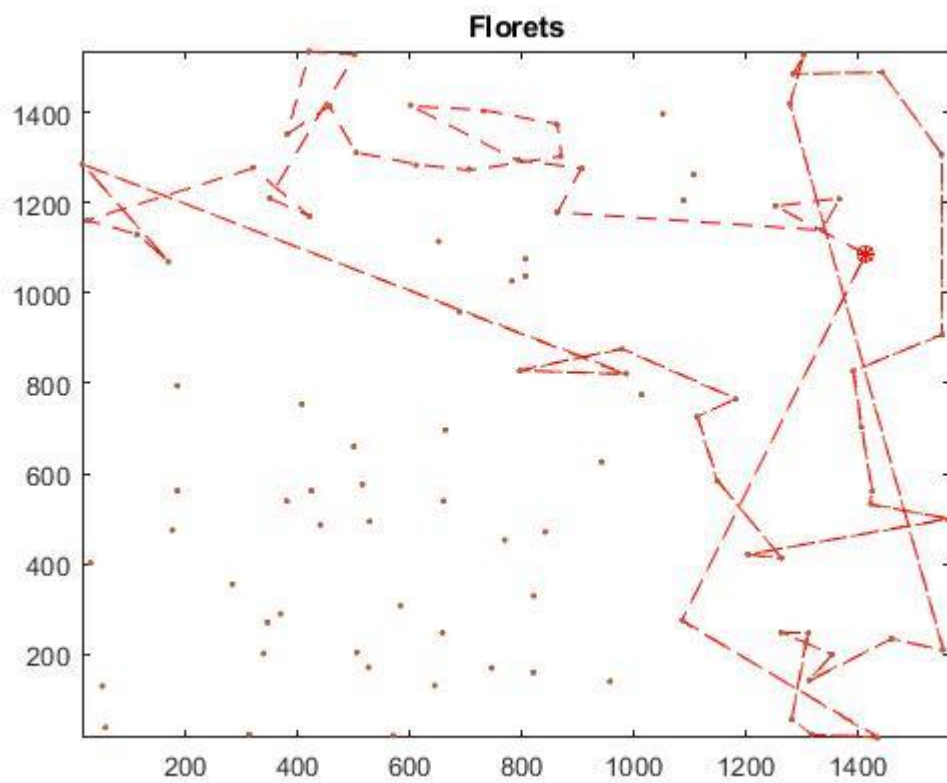
Εικόνα 14: Συγκέντρωση γύρης (στήλη p) για τα λουλούδια 49-63 με το πέρας του αλγορίθμου

graph.node				
Fields	x	y	p	
64	476	31	0	
65	81	54	0	
66	27	145	0	
67	382	235	0	
68	445	431	0	
69	255	181	0	
70	311	256	0	
71	202	154	0	
72	500	67	0	
73	272	91	0	
74	68	189	0	
75	387	145	0	
76	427	160	0	
77	104	442	0	
78	432	82	0	
79	230	82	0	
80	380	125	0	
81	54	400	0	
82	207	415	0	
83	187	213	0	
84	146	26	0	

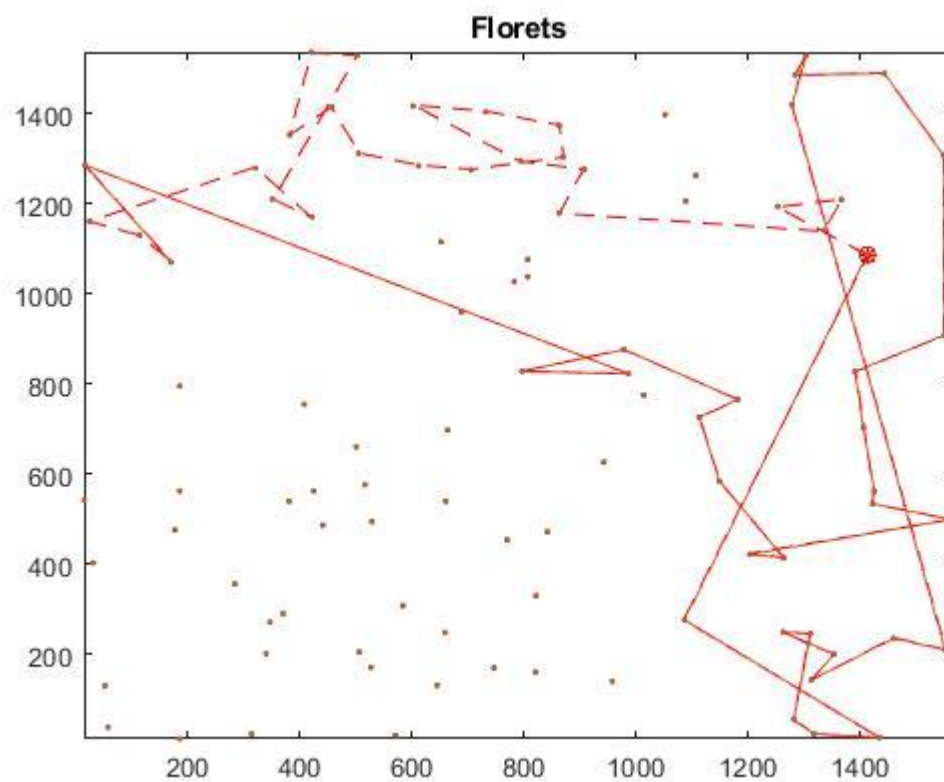
Εικόνα 15: Συγκέντρωση γύρης (στήλη p) για τα λουλούδια 64-84 με το πέρας του αλγορίθμου

Fields	x	y	p
85	310	498	0
86	364	208	0
87	82	9	0
88	298	103	0
89	497	176	0
90	188	275	0
91	453	159	0
92	419	295	0
93	49	478	0
94	449	87	0
95	210	282	0
96	174	435	0
97	455	293	0
98	449	139	0
99	273	299	0
100	442	25	0
101	473	461	0
102			

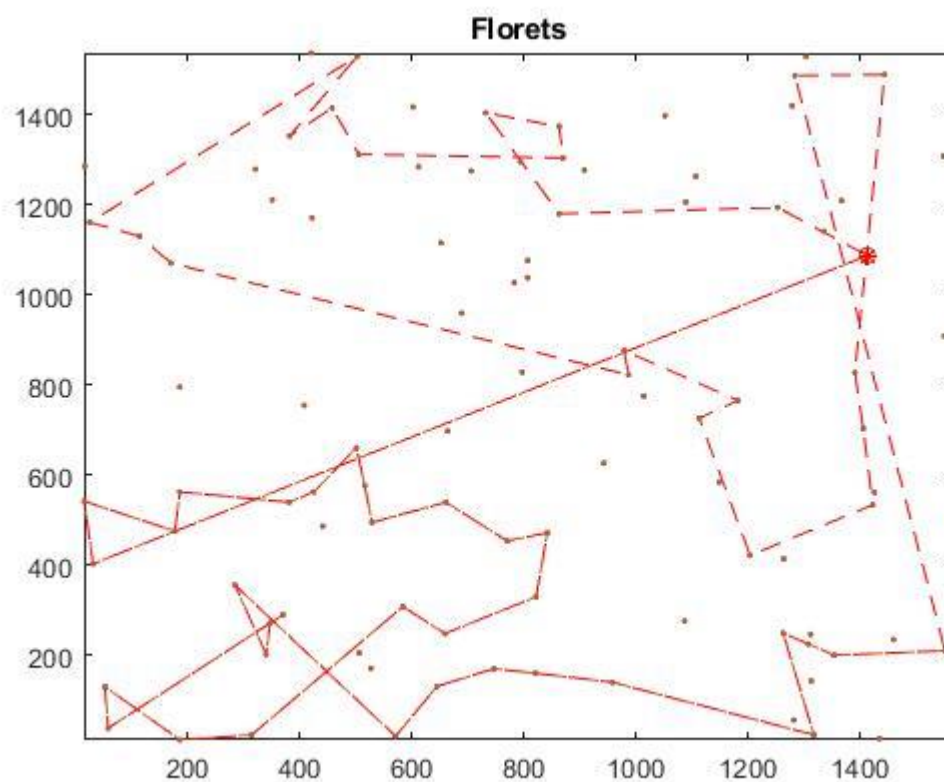
Εικόνα 16: Συγκέντρωση γύρης (στήλη p) για τα λουλούδια 85-101 με το πέρας του αλγορίθμου



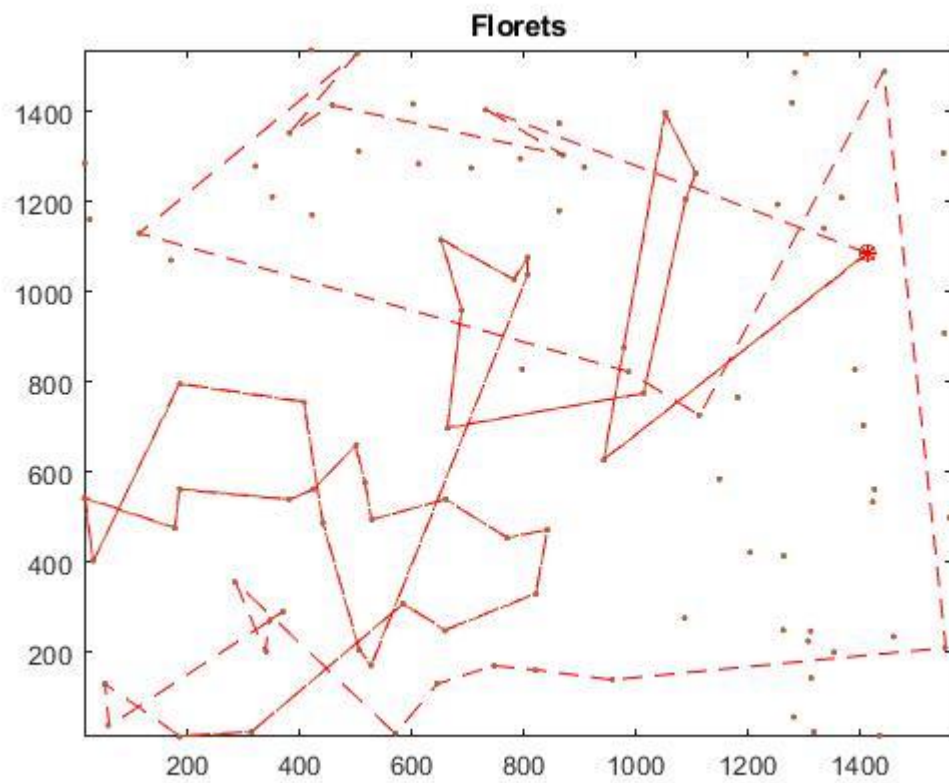
Εικόνα 17: Μονοπάτι επικοινωνίας της πρώτης ρομποτικής μέλισσας.



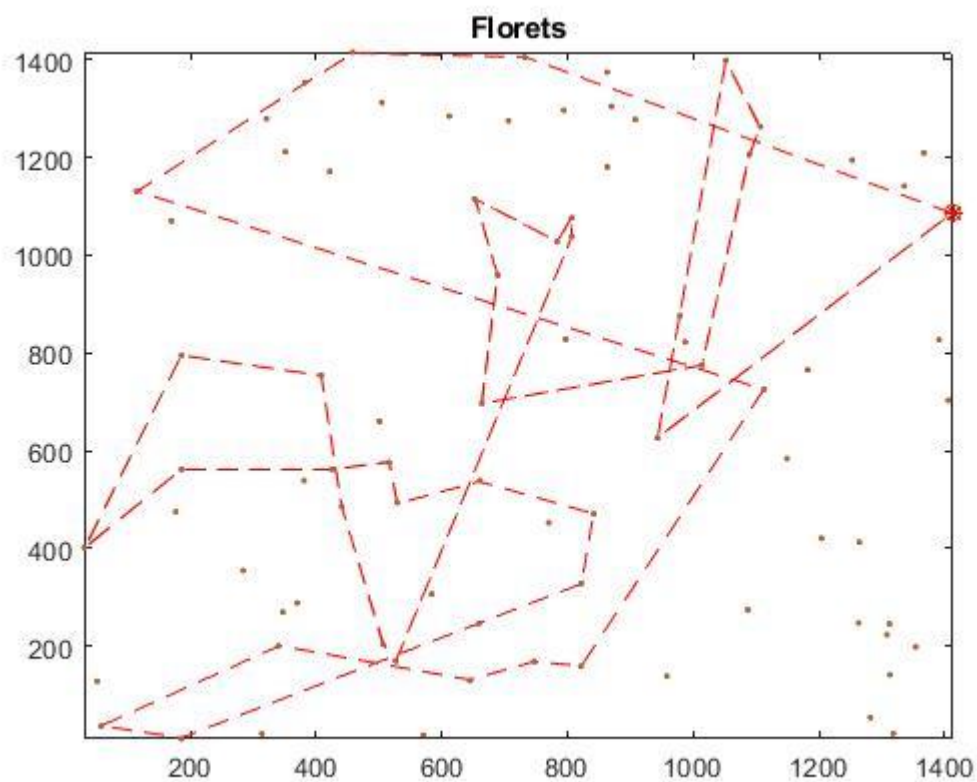
Εικόνα 18: Μονοπάτι επικοινωνίας της δεύτερης ρομποτικής μέλισσας.



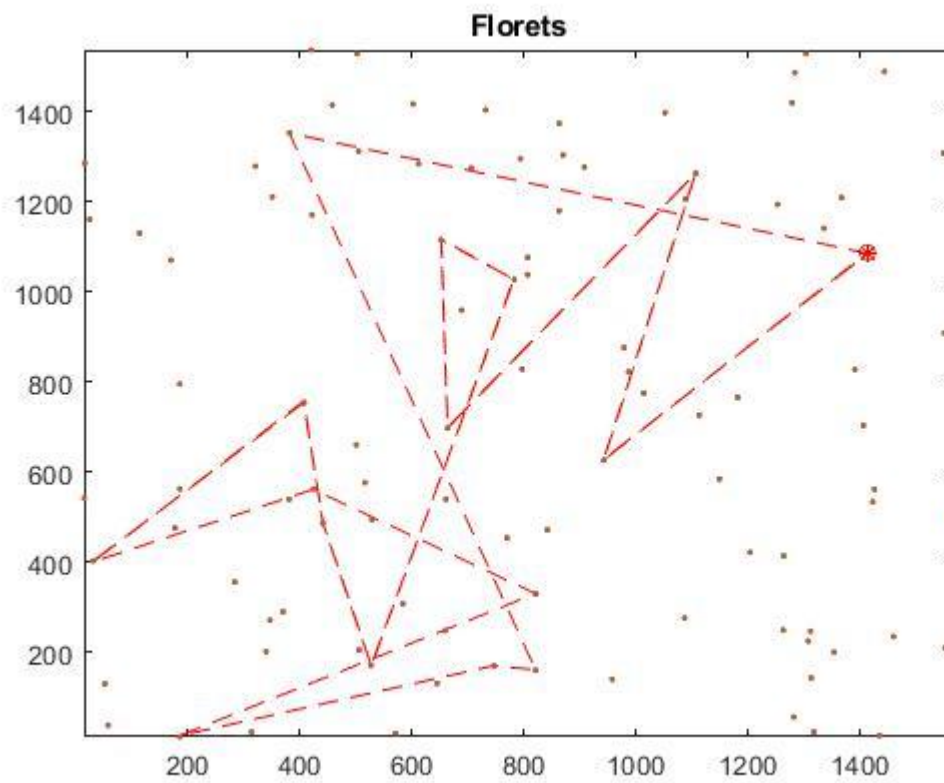
Εικόνα 19: Μονοπάτι επικοινωνίας της τρίτης ρομποτικής μέλισσας.



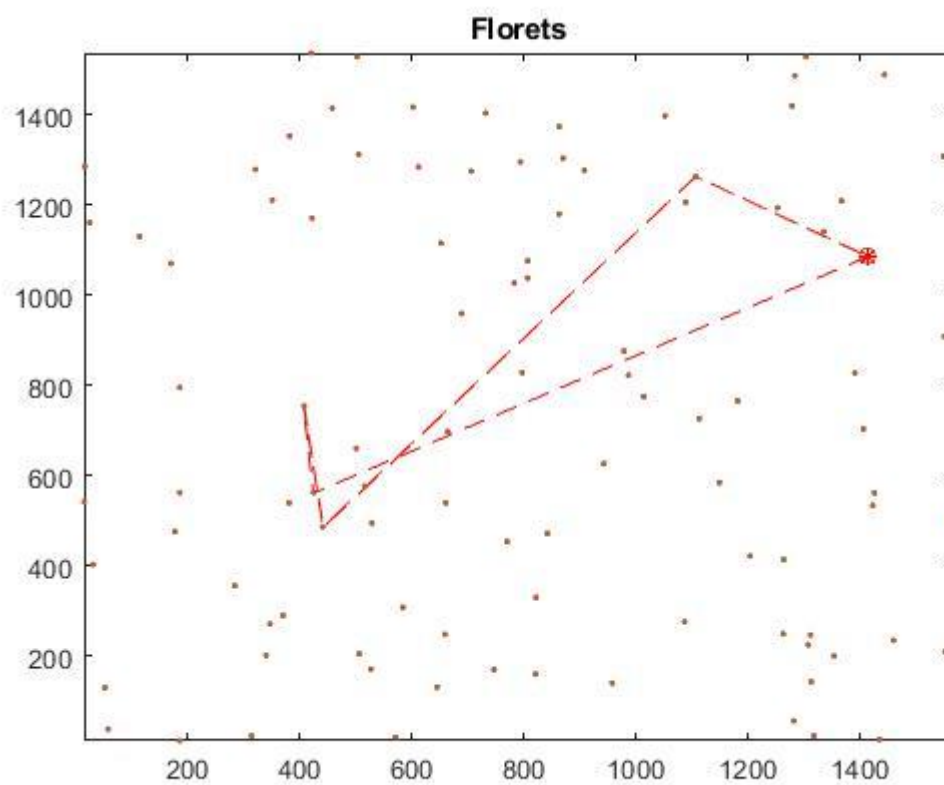
Εικόνα 20: Μονοπάτι επικοινωνίας της τέταρτης ρομποτικής μέλισσας.



Εικόνα 21: Μονοπάτι επικοινωνίας της πέμπτης ρομποτικής μέλισσας.



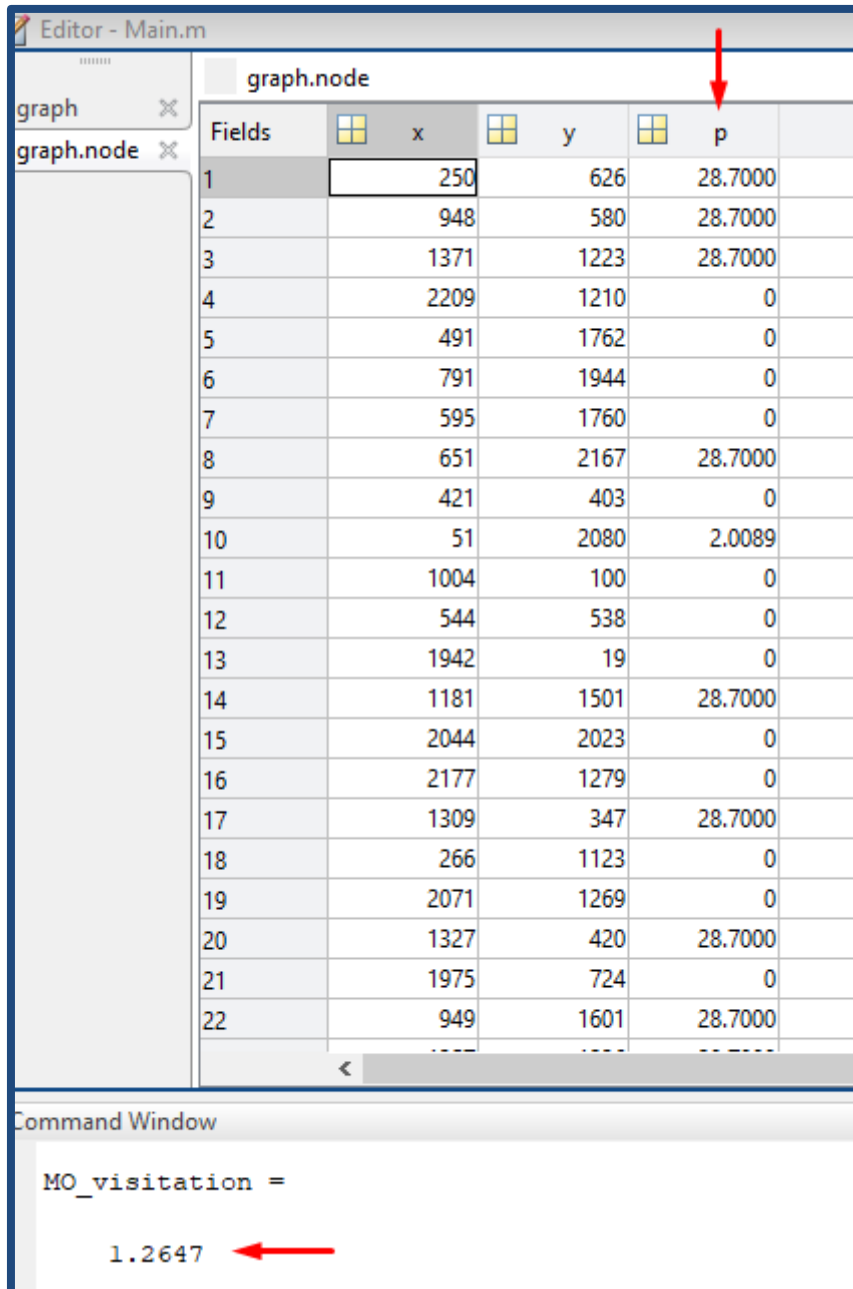
Εικόνα 22: Μονοπάτι επικοινωνίας της έκτης ρομποτικής μέλισσας.



Εικόνα 23: Μονοπάτι επικοινωνίας της έβδομης ρομποτικής μέλισσας.

4.5 Εφαρμογή αλγορίθμου σε χωράφι μισού στρέμματος

Με την πρώτη εφαρμογή του αλγορίθμου σε χωράφι μισού στρέμματος (2235 cm x 2235 cm) 1500 ανθούς, χρησιμοποιήθηκαν και οι τριάντα μέλισσες και ο μέσος όρος επισκεψιμότητας ήταν 1,26 μέλισσες ανά λουλούδι που έχει επισκευτεί, γεγονός που ίσως οδηγήσει σε μη αποτελεσματική επικοινωνία.

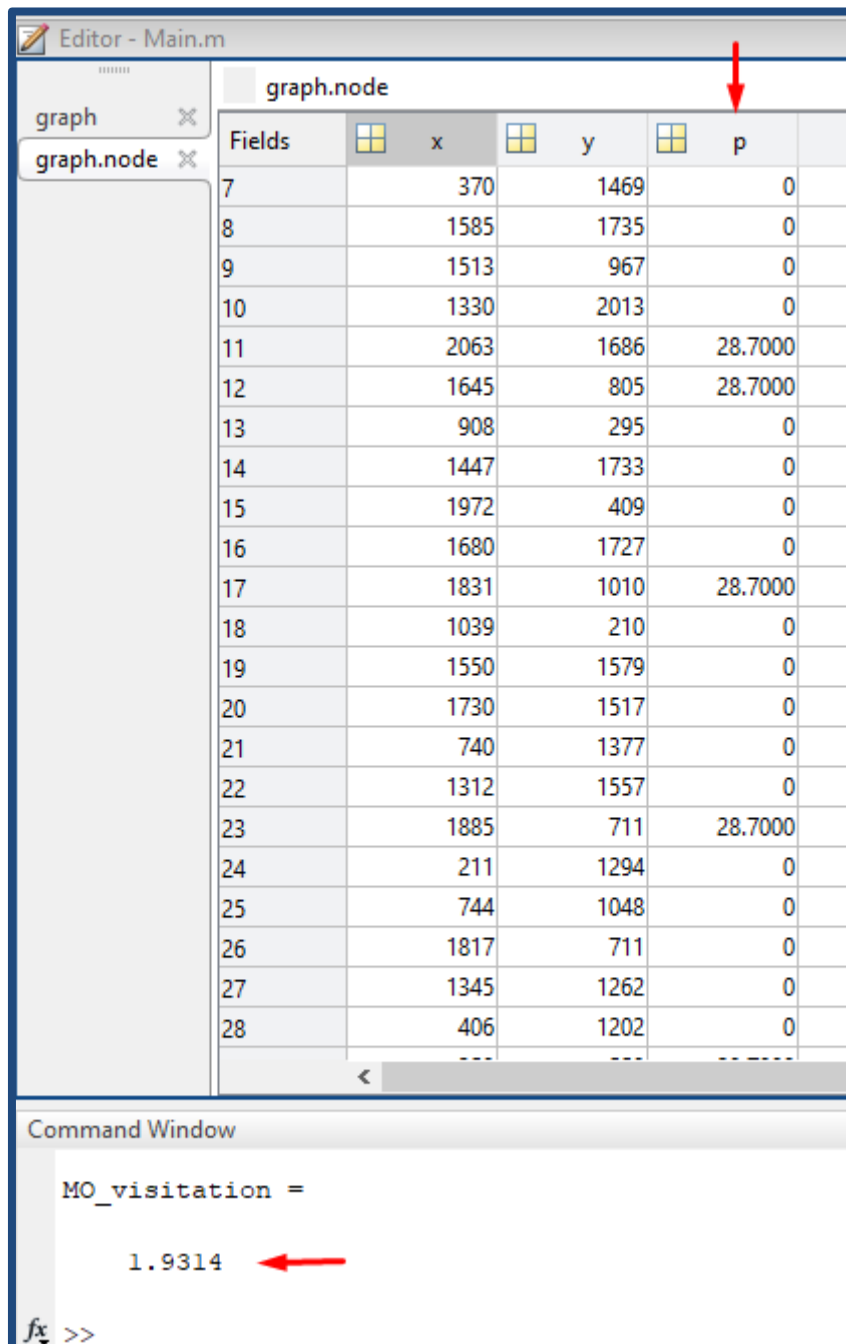


Fields	x	y	p
1	250	626	28.7000
2	948	580	28.7000
3	1371	1223	28.7000
4	2209	1210	0
5	491	1762	0
6	791	1944	0
7	595	1760	0
8	651	2167	28.7000
9	421	403	0
10	51	2080	2.0089
11	1004	100	0
12	544	538	0
13	1942	19	0
14	1181	1501	28.7000
15	2044	2023	0
16	2177	1279	0
17	1309	347	28.7000
18	266	1123	0
19	2071	1269	0
20	1327	420	28.7000
21	1975	724	0
22	949	1601	28.7000

Command Window
MO_visitation =
1.2647

Εικόνα 24: Αποτελέσματα για χωράφι μισού στρέμματος με 30 διαθέσιμες μέλισσες. Στη στήλη p βλέπουμε ότι υπάρχουν λουλούδια που δεν έχουν επισκευτεί και έχουν όλη τη γύρη τους. Στο command window φαίνεται ο μέσος όρος επισκεψιμότητας από τις μέλισσες ανά λουλούδι που έχει επισκευτεί.

Ο αριθμός των διαθέσιμων μελισσών αυξήθηκε στις 50 και πάλι όλες οι μέλισσες εκτέλεσαν κάποια διαδρομή, ο μέσος όρος επισκεψιμότητας αυξήθηκε στο 1.93 όμως το ¼ περίπου των λουλουδιών είχε όλη τη γύρη ακόμα.



The screenshot shows a software window titled "Editor - Main.m". It contains a table with columns "Fields", "x", "y", and "p". A red arrow points to the "p" column header. Below the table is a "Command Window" showing the command "MO_visitation =" followed by the value "1.9314", with a red arrow pointing to the value. The table lists 28 fields with their corresponding x and y coordinates and a value in the "p" column.

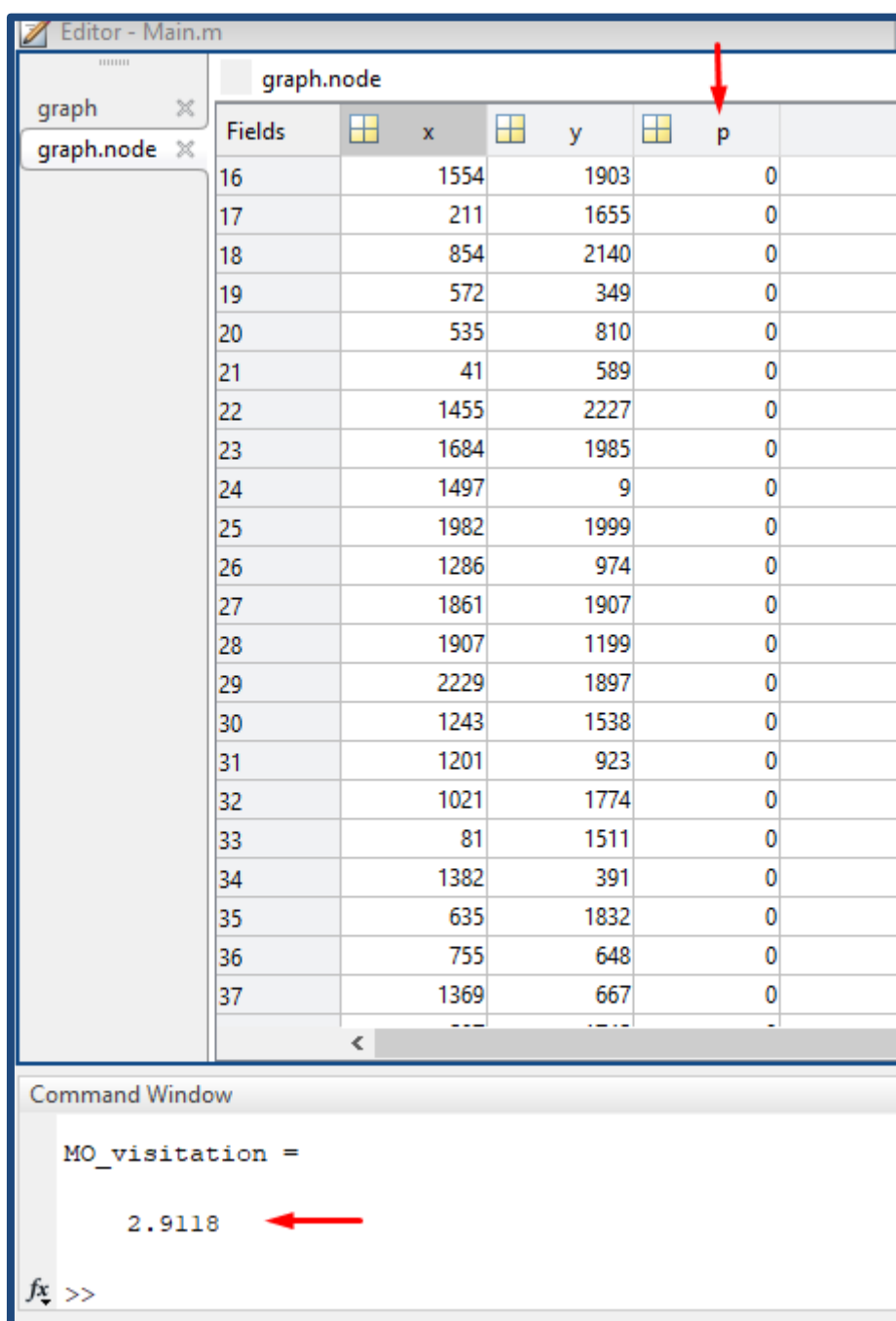
Fields	x	y	p
7	370	1469	0
8	1585	1735	0
9	1513	967	0
10	1330	2013	0
11	2063	1686	28.7000
12	1645	805	28.7000
13	908	295	0
14	1447	1733	0
15	1972	409	0
16	1680	1727	0
17	1831	1010	28.7000
18	1039	210	0
19	1550	1579	0
20	1730	1517	0
21	740	1377	0
22	1312	1557	0
23	1885	711	28.7000
24	211	1294	0
25	744	1048	0
26	1817	711	0
27	1345	1262	0
28	406	1202	0

Command Window

```
MO_visitation =
    1.9314
```

Εικόνα 25: Αποτελέσματα για χωράφι μισού στρέμματος με 30 διαθέσιμες μέλισσες. Στη στήλη p βλέπουμε ότι υπάρχουν λουλούδια που δεν έχουν επισκεφτεί και έχουν όλη τη γύρη τους. Στο command window φαίνεται ο μέσος όρος επισκεψιμότητας από τις μέλισσες ανά λουλούδι που έχει επισκεφτεί.

Αυξάνοντας και άλλο τον αριθμό από 50 σε 100 μαζεύεται όλη η γύρη από τα λουλούδια, οι μέλισσες που χρειάζονται είναι 74 και ο μέσος όρος επισκεψιμότητας είναι 2,76.



The screenshot shows a software interface with a table titled 'graph.node' and a 'Command Window' at the bottom. The table has columns for 'Fields', 'x', 'y', and 'p'. The 'p' column contains values of 0 for all rows. A red arrow points to the 'p' column header. The 'Command Window' shows the command 'MO_visitation =' followed by the value '2.9118', with a red arrow pointing to the value.

Fields	x	y	p
16	1554	1903	0
17	211	1655	0
18	854	2140	0
19	572	349	0
20	535	810	0
21	41	589	0
22	1455	2227	0
23	1684	1985	0
24	1497	9	0
25	1982	1999	0
26	1286	974	0
27	1861	1907	0
28	1907	1199	0
29	2229	1897	0
30	1243	1538	0
31	1201	923	0
32	1021	1774	0
33	81	1511	0
34	1382	391	0
35	635	1832	0
36	755	648	0
37	1369	667	0

Command Window

```
MO_visitation =
    2.9118
```

Εικόνα 26: Αποτελέσματα για χωράφι μισού στρέμματος με 30 διαθέσιμες μέλισσες. Στη στήλη p βλέπουμε ότι υπάρχουν λουλούδια που δεν έχουν επισκεφτεί και έχουν όλη τη γύρη τους. Στο command window φαίνεται ο μέσος όρος επισκεψιμότητας από τις μέλισσες ανά λουλούδι που έχει επισκεφτεί.

Editor - Main.m V2

graph ×

graph.node ×

colony ×

colony.bee ×

colony.bee				
Fields	tour	battery	fitness	PollPath
61	1x1502 dou...	5.3537	1.4371e+05	1x58 double
62	1x1502 dou...	4.0127	1.5126e+05	1x59 double
63	1x1502 dou...	4.1114	1.3956e+05	1x59 double
64	1x1502 dou...	6.6098	1.4898e+05	1x59 double
65	1x1502 dou...	4.1728	1.4765e+05	1x59 double
66	1x1502 dou...	5.4379	1.3652e+05	1x58 double
67	1x1502 dou...	10.5185	1.3750e+05	1x57 double
68	1x1502 dou...	1.9855	1.5197e+05	1x58 double
69	1x1502 dou...	3.4927	1.4341e+05	1x57 double
70	1x1502 dou...	4.6686	1.4236e+05	1x57 double
71	1x1502 dou...	64.8741	1.3934e+05	1x45 double
72	1x1502 dou...	127.0691	1.5436e+05	1x33 double
73	1x1502 dou...	247.3318	1.4284e+05	1x11 double
74	1x1502 dou...	300	1.4173e+05	[1,1]
75	1x1502 dou...	300	1.4256e+05	[1,1]
76	1x1502 dou...	300	1.3969e+05	[1,1]
77	1x1502 dou...	300	1.4356e+05	[1,1]
78	1x1502 dou...	300	1.4140e+05	[1,1]
79	1x1502 dou...	300	1.3841e+05	[1,1]
80	1x1502 dou...	300	1.5350e+05	[1,1]
81	1x1502 dou...	300	1.4031e+05	[1,1]
82	1x1502 dou...	300	1.4428e+05	[1,1]

Command Window

Εικόνα 27: Η μέλισσα υπ' αριθμόν 73 εκτελεί μια διαδρομή επισκεπτόμενη 9 λουλούδια (η αρχή και το τέλος της διαδρομής της είναι η κυψέλη οπότε $11-2=9$ επισκέψεις). Οι μέλισσες 74-100 δεν είναι απαραίτητες για την επικοινωνία του συγκεκριμένου χωραφιού)

Κεφάλαιο 5: Συζήτηση

5.1 Συμπεράσματα και μελλοντικές εφαρμογές

Αρχικός σκοπός της διπλωματικής αυτής ήταν μια πρώτη εκτίμηση της εφικτότητας ανάθεσης της διαδικασίας της επικοινωνίας σε ένα ρομποτικό σμήνος μελισσών. Η ρομποτική είναι ένας κλάδος της μηχανικής ο οποίος εξελίσσεται ταχύτητα, παρόλα αυτά μέχρι και την ημερομηνία συγγραφής της διπλωματικής αυτής, ο μηχανικός σχεδιασμός ενός τέτοιου ρομπότ δεν είναι ακόμα εφικτός, ή προσβάσιμος (έχει σημειωθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο ότι η αμερικανική πολυεθνική Walmart έχει κατασκευάσει και πατεντάρει μια ρομποτική μέλισσα, τα χαρακτηριστικά της οποίας δεν είναι δημοσιοποιημένα (World Economic Forum,online) .Για τον λόγο αυτό, εξετάζεται η υλοποίηση του σμήνους σε επίπεδο προσομοίωσης, και έχουν γίνει παραδοχές ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την κατασκευή του. Οι παραδοχές αυτές βασίζονται στις προδιαγραφές των υπάρχοντων ρομποτικών συστημάτων. Ο κώδικας που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να προσαρμοστεί με τρόπο τέτοιο έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί για τη ρύθμιση και τον προγραμματισμό μελλοντικών ρομποτικών μελισσών, όταν αυτές κατασκευαστούν.

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου δείχνουν ότι οι ρομποτικοί επικοινωνιστές είναι εφικτό να επικοινωνούν ένα μικρό χωράφι και μάλιστα πιο αποτελεσματικά και ταχύτερα από τους συμβατικούς, καθώς για 100 ανθούς απαιτείται υποτριπλάσιος αριθμός επικοινωνιστών. Σε μεγαλύτερα χωράφια με περισσότερους καρπούς ο αριθμός των ρομποτικών μελισσών αυξάνεται σημαντικά.

Ο αλγόριθμος της διπλωματικής αυτής σίγουρα επιδέχεται βελτιστοποίησης, τόσο στο προγραμματιστικό κομμάτι, όσο και σε άλλους τομείς που θα αυξάνανε την αποτελεσματικότητά του, όπως π.χ. καλύτερη επικοινωνία μεταξύ των μελισσών, εύρεση καλύτερων μονοπατιών ακόμα και η τοποθέτηση της κυψέλης θα βελτιώσει την αποδοτικότητά του. Σύμφωνα με τους Brosi B.J, et al. 2008 η τοποθέτηση της κυψέλης παίζει σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα των επικοινωνιστών.

Με την ένταξη ρομπότ μελισσών που θα δρουν με βάση τον αλγόριθμο αυτόν ή κάποιας εξελιγμένης εκδοχής του η λειτουργία της κυψέλης σαν δίαυλος επικοινωνίας θα μειώνεται χαρίζοντας περισσότερη αυτονομία στη κάθε μέλισσα/ μέλος της αποικίας, ενισχύοντας με το τρόπο αυτό τη νοημοσύνη του σμήνους.

Μπορούν να εισαχθούν διαφορετικού τύπου ρομποτικές μέλισσες οι οποίες παράλληλα με την επικοινωνία χρησιμοποιώντας τη βέλτιστη διαδρομή ή ακόμα και αντιμετωπίζοντας το χωράφι σαν ένα πρόβλημα VRP (ο αναγνώστης μπορεί να συμβουλευτεί για παραπάνω πληροφορίες τους Liong C.Y et al 2008 σχετικά με το VRP) θα μπορούσαν να συλλέξουν γύρη, με κατάλληλους αισθητήρες και όργανα, να την επιστρέψουν στη κυψέλη πίσω, η οποία θα παράγει τεχνητό μέλι (σχετικά με τη διαδικασία παραγωγής μελιού από μέλισσες (Science ABC. (2019).How is honey produced?[online]).

Επιπλέον, μέλισσες πάλι διαφορετικού τύπου από αυτές που είναι υπεύθυνες για την επικοινωνία οι οποίες θα φέρουν ψεκαστήρες θα μπορούν να ψεκάζουν τοπικά τα λουλούδια με εντομοαπωθητικό αντί να ψεκάζεται στον περιβάλλοντα χώρο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

Κανάκης, Π., Παπαμιχαήλ, Δ., Τομέας, Π., Βελτιώσεων, Ε., Και, Ε., Μηχανικής, Γ., Γεωπονίας, Τ., (2016). Αλγόριθμος αποικίας μυρμηγκιών για τη βελτιστοποίηση υπό πίεση αρδευτικών δικτύων.

Σαλίχου Α, 2012 Προηγμένες μέθοδοι βελτιστοποίησης στη Διοίκηση Έργων Η περίπτωση της βελτιστοποίησης με αποικίες μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization) , Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.

Ξένη

Allen-Wardel, Gordon, et al. 1998. The Potential Consequences of Pollinator Declines on the Conservation of Biodiversity and Stability of Food Crop Yields. (2008). *Conservation Biology*, 12(1), pp.8–17.

Arvin F., Murray J., Zhang C. and Yue S. (2014). Colias: An Autonomous Micro Robot for Swarm Robotic Applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11(7), p.113.

B. Freisleben and P. Merz. A Genetic 1996. Local Search Algorithm for Solving Symmetric and Asymmetric Traveling Salesman Problems. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'96)*, IEEE Press, pages 616–621.

Becher, M.A., Grimm, V., Knapp, J., Horn, J., Twiston-Davies, G. and Osborne, J.L. (2016). BEESCOUT: A model of bee scouting behaviour and a software tool for characterizing nectar/pollen landscapes for BEEHAVE. ore.exeter.ac.uk. [online] Available at: <https://ore.exeter.ac.uk/repository/handle/10871/24780>

Biesmeijer J.C, Roberts S.P.M, Reemer M, Ohlemüller R, Edwards M, Peeters T, Schaffers A. P, Potts S.G. Kleukers R, Settele J, Kunin W.E (2006). Parallel Declines in Pollinators and Insect-Pollinated Plants in Britain and the Netherlands, *Science*, 313(5785), pp. 351-354

Bijleveld van Lexmond, M.B., Bonmatin, J.-M., Goulson, D. and Noome, D.A. (2014). Worldwide integrated assessment on systemic pesticides. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(1), pp.1–4.

Brosi, B.J., Armsworth, P.R. and Daily, G.C. (2008). Optimal design of agricultural landscapes for pollination services. *Conservation Letters*, 1(1), pp.27–36.

Cameron, S.A., Lozier, J.D., Strange, J.P., Koch, J.B., Cordes, N., Solter, L.F. and Griswold, T.L. (2011). Patterns of widespread decline in North American bumble bees. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, [online] 108(2), pp.662–667.

Chambó, E.D., Garcia, R.C., Oliveira, N.T.E. de and Duarte-Júnior, J.B. (2011). Honey bee visitation to sunflower: effects on pollination and plant genotype. *Scientia Agricola*, [online] 68(6), pp.647–651.

- Dorigo, M. and Blum, C. (2005). Ant colony optimization theory: A survey. *Theoretical Computer Science*, [online] 344(2–3), pp.243–278. Available at: https://staff.fmi.uvt.ro/~daniela.zaharie/am2016/proiecte/tehnici/ACO/aco_survey.pdf
- Dudek, G., Jenkin, M.M., Milios, E. and Wilkes, D. (1996). A taxonomy for multi-agent robotics. *Autonomous Robots*, [online] 3(4). Available at: <http://klara.student.utwente.nl/~stephan/References/ATaxonomyforSwarmRobots.pdf>
- Fao.org. (2016). FAO -News Article:Pollinators vital to our food supply under threat. [online] Available at: <http://www.fao.org/news/story/en/item/384726/icode/>
- Fell, R.D. (1986). Foraging Behaviors of *Apis mellifera* L. and *Bombus* spp. on Oilseed Sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of the Kansas Entomological Society*, [online] 59(1), pp.72–81. Available at: https://www.jstor.org/stable/25084739?seq=1#metadata_info_tab_contents
- Gallai, N., Jean-Michel Salles, Settele, J. and Vaissière, B.E. (2009). Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted to pollinator decline. [online] ResearchGate. Available at: https://www.researchgate.net/publication/23647989_Economic_valuation_of_the_vulnerability_of_world_agriculture_confronted_to_pollinator_decline
- Goulson, D., Nicholls, E., Botias, C. and Rotheray, E.L. (2015). Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science*, [online] 347(6229), pp.1255957–1255957.
- Hung, K.-L.J., Kingston, J.M., Albrecht, M., Holway, D.A. and Kohn, J.R. (2018). The worldwide importance of honeybees as pollinators in natural habitats. *Proceedings of the Royal Society: Biological Sciences*, 285(1870), p.20172140.
- JEVTIC, A. and ANDINA, D. (n.d.) (2007). *Swarm Intelligence and Its Applications in Swarm Robotics*.
- Klatt, Björn K., et al. 2014. Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value. *Proceedings. Biological sciences / The Royal Society*.. doi:10.1098/rspb.2013.2440.
- Klein, A.-M., Vaissière, B.E., Cane, J.H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S.A., Kremen C. and Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, [online] 274(1608), pp.303–313. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1702377/> .
- L.M. Gambardella and M. Dorigo. 1995 . Ant-Q: A Reinforcement Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. In *Proceedings of the Eleventh International Conference on Machine Learning*, Morgan Kaufmann, pages 252–260.
- Liong C.Y, Wan R.I, Khairuddin O, Mourad Z, (2008), Vehicle routing problem: Models and solutions, *Journal of Quality Measurement and Analysis*, 4(1), pp 205-218.

M. Rubenstein, C. Ahler, and R. Nagpal. (2012). Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 3293–3298.

Ollerton, J., Winfree, R. and Tarrant, S. (2011). How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos*, [online] 120(3), pp.321–326.

Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1600-0706.2010.18644.x>

Partap, U. and Ya, T. (2012). The Human Pollinators of Fruit Crops in Maoxian County, Sichuan, China. *Mountain Research and Development*, 32(2), pp.176–186.

Potts, S.G., Biesmeijer, J.C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O. and Kunin, W.E. (2010). Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(6), pp.345–353.

P-P Grassé (1959) – La Reconstruction du nid et les Coordinations Individuelles chez *Bellicositermes Natalensis* et *Cubitermes* sp. la Théorie de la Stigmergie: Essai d'interprétation du Comportement des Termites Constructeurs, *Insectes Sociaux*,

Sahin, E., Girgin, S., Bayındır, L. and Turgu, A.E. (2004). *Swarm Robotics* pp10-20.

Tarpy, D.R. and Pettis, J.S. (2019). Colony Collapse Disorder. *Encyclopedia of Social Insects*, pp.13

T. Stützle and H.H. Hoos.1998. Improvements on the Ant System: Introducing the MAX –MIN Ant System. In R.F. Albrecht G.D. Smith, N.C. Steele, editor, *Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms*, Wien New York, pages 245–249. Springer Verlag,

Vanbergen, A.J. and Initiative, the I.P. (2013). Threats to an ecosystem service: pressures on pollinators. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(5), pp.251–259

Διαδικτυακοί τόποι

Bitcraze Store Crazyflie 2.1. [online] Retrieved July 27, 2020 from :
<https://store.bitcraze.io/products/crazyflie-2-1>

British Beekeepers Association. How fast can honey bees fly?[online] Retrieved July 27, 2020 from :
<https://www.bbka.org.uk/faqs/how-fast-can-honey-bees-fly>

Home Stratosphere. (2018). Parts of a Flower and Plant - Do You Know Them All? (7 Diagrams: Flower, Cell, Leaf, Stem etc.). [online] Retrieved July 27, 2020 from :
<https://www.homestratosphere.com/parts-of-a-flower/> .

<http://agpollinators.org/author/nresolutions> (2012). Pollinators 101. [online] Native Pollinators in Agriculture. Retrieved July 27, 2020 from : <http://agpollinators.org/pollinators-101/>

kobotusa. KOBOT | Support. [online] Retrieved July 27, 2020 from :
<https://www.techkokobot.comsupport>

Northwestern.edu. (2020). [online] Retrieved July 27, 2020 from :
http://people.esam.northwestern.edu/~cristian/research_body.html

Science ABC. (2019).How is honey produced?[online] Retrieved July 27, 2020 from :
<https://www.scienceabc.com/eyeopeners/how-is-honey-made.html>

UNEP. 2010. Global honey bee colony disorders and other threats to insect pollinators. UNEP emerging issues report, United Nations Environmental Program, Nairobi.

University of California - Berkeley. (2006, October 26). Pollinators Help One-third Of The World's Food Crop Production. *ScienceDaily*. Retrieved July 27, 2020 from
www.sciencedaily.com/releases/2006/10/061025165904.htm

World Economic Forum. Walmart has patented autonomous robot bees. [online] Retrieved July 27, 2020 from : <https://www.weforum.org/agenda/2018/03/autonomous-robot-bees-are-being-patented-by-walmart>