



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία  
**ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ  
ΙΠΤΑΜΕΝΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ  
ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ**

υπό  
Όλγας Βουλγάρογλου

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Αλέξανδρος Αλεξανδρίδης

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, Μάρτιος 2020





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία  
**ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ  
ΙΠΤΑΜΕΝΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ  
ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ**

υπό  
Όλγας Βουλγάρογλου

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Αλέξανδρος Αλεξανδρίδης

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, Μάρτιος 2020

© 2020 Όλγα Βουλγάρογλου

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

**Πρώτος Εξεταστής:** Δρ. Αλέξανδρος Αλεξανδρίδης,  
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών  
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

**Δεύτερος Εξεταστής:** Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος,  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**Τρίτος Εξεταστής:** Δρ. Αλέξης Κερμανίδης,  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων  
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των προπτυχιακών σπουδών μου στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, αρχικά, τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αλέξανδρο Αλεξανδρίδη για την πολύτιμη καθοδήγησή του, καθώς χωρίς αυτήν δεν θα μπορούσα να ξεπεράσω τις δυσκολίες που συνάντησα κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών που, μέσα από τις διαλέξεις τους, μου μετέδωσαν τις γνώσεις τους και με βοήθησαν να αποκτήσω σωστό τρόπο σκέψης.

Δεν θα μπορούσα να μην αναφερθώ στις φίλες μου, Ηλέκτρα και Τριανταφυλλιά, καθώς και σε όλους τους φίλους μου για τις μοναδικές στιγμές και όμορφες εμπειρίες που ζήσαμε μαζί κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων. Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, Λεωνίδα και Χριστιάνα, και σε όλη την οικογένειά μου για την αγάπη, τη στήριξη και την υπομονή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στην οικογένειά μου.

Βουλγάρογλου Όλγα  
Βόλος, Μάρτιος 2020

# ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΙΠΤΑΜΕΝΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Βουλγάρογλου Όλγα

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2020

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Αλέξανδρος Αλεξανδρίδης

## Περίληψη

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη συνιστούν αντικείμενο μελέτης των τελευταίων ετών, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξυπηρέτηση ανθρωπίνων σκοπών και έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών όπως πολιτικό, επιστημονικό και στρατιωτικό. Στο επίκεντρο της ερευνητικής κοινότητας βρίσκονται τα δίκτυα μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Μία από τις αστικοπολιτικές εφαρμογές τους είναι η χρήση σε επιχειρήσεις έκτακτης ανάγκης μετά από φυσικές καταστροφές.

Οι βασικοί στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι, αρχικά, η μοντελοποίηση και η εξερεύνηση ενός χώρου - σεναρίου καταστροφών και στη συνέχεια, η σύγκλιση των μη επανδρωμένων αεροσκαφών στις ομάδες ανθρώπων που εντοπίστηκαν κατά τη διάρκεια της φάσης εξερεύνησης.

Το βασικότερο ζήτημα ήταν η ανάπτυξη διαδρομών εξερεύνησης του χώρου καταστροφής, για το δίκτυο μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Ζήτημα το οποίο προσεγγίστηκε με τη χρήση ενός αλγορίθμου βασισμένου στη μέθοδο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO), που ανήκει στις τεχνικές ευφυΐας σμήνους. Επιπλέον, προσομοιώθηκε η κινητικότητα των ανθρώπων, οι οποίοι ήταν οργανωμένοι σε ομάδες, με τη χρήση του μοντέλου κινητικότητας Τυχαίου Σημείου (Random Waypoint Mobility model - RWP).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από επαναληπτικές δοκιμές του αλγορίθμου για διαφορετικά σενάρια κίνησης και συνδυασμούς χαρακτηριστικών του παραμέτρων, επιβεβαίωσαν την επίτευξη των δύο επιθυμητών στόχων. Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν μεταξύ τους έτσι ώστε να βρεθεί το βέλτιστο σενάριο. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος Matlab R2016a.

**Λέξεις - κλειδιά:** Μη επανδρωμένα αεροσκάφη, Δίκτυα μη επανδρωμένων αεροσκαφών, Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων, Νοημοσύνη Σμήνους, Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Σημείου, Σενάριο καταστροφής

# SWARM COORDINATION OF AUTONOMOUS UNMANNED AERIAL VEHICLES USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Voulgaroglou Olga

University of Thessaly, Department of Mechanical Engineering, 2020

Thesis Supervisor: Dr. Alex Alexandridis

## Abstract

Unmanned Aerial Vehicles have been the subject of recent studies, as they can be used for humanitarian purposes and have a wide range of applications such as civilian, scientific and military. The networks of unmanned aerial vehicles are at the heart of the research community. One of their civilian applications is the use in emergency response operations after natural disasters.

The main objectives of this Thesis are, first, to model and explore a disaster scenario area and then, to make unmanned aerial vehicles converge to the groups of people identified during the exploration phase.

The key issue was the generation of exploratory trajectories for the UAV networks. This was accomplished by utilizing an algorithm based on the Particle Swarm Optimization (PSO) method, which belongs to swarm intelligence techniques. In addition, the simulation of victims' mobility, who were organized in clusters, was achieved using the Random Waypoint Mobility Model (RWP).

After several simulation runs, the results obtained for different scenarios and characterization parameters of the algorithm showed that both desired goals were achieved. The results of the simulations were compared with each other in order to find the optimum scenario. It should be noted that the simulations were performed using Matlab R2016a.

**Key words:** Unmanned aerial vehicles (UAV), Unmanned aerial vehicles' networks, Particle Swarm Optimization (PSO), Swarm Intelligence, Random Waypoint Mobility Model (RWP), Disaster scenario



## Πίνακας Περιεχομένων

<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1 Κίνητρο και Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας .....	1
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	2
1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας .....	4
<b>Κεφάλαιο 2: Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO).....</b>	<b>7</b>
2.1 Γενικά για τη Νοημοσύνη Σμήνους.....	7
2.2 Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων.....	7
2.2.1 Αλγόριθμος της Ολικής Βέλτιστης Λύσης (Global best PSO).....	8
2.2.2 Αλγόριθμος της Τοπικής Βέλτιστης Λύσης (Local best PSO).....	9
2.2.3 Ταχύτητα των Σωματιδίων .....	10
2.2.4 Αρχικοποίηση Μεταβλητών .....	12
2.2.5 Συνθήκες Τερματισμού του Αλγορίθμου .....	13
2.2.6 Τοπολογίες.....	13
2.3 Σύνοψη.....	15
<b>Κεφάλαιο 3: Σενάριο Καταστροφής (Disaster Scenario).....</b>	<b>17</b>
3.1 Περιγραφή Σεναρίου Καταστροφής .....	17
3.1.1 Περιβάλλον .....	17
3.1.2 Κινητικότητα Ανθρώπων.....	18
3.2 Δίκτυο Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών .....	18
3.2.1 Πλοήγηση Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών .....	20
3.2.2 Επικοινωνία Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών .....	21
3.2.3 Στόχοι Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών.....	22
3.3 Σύνοψη.....	22
<b>Κεφάλαιο 4: Αλγόριθμος Συντονισμού Σμήνους Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών .....</b>	<b>23</b>
4.1 Περιγραφή Αλγορίθμου Συντονισμού Σμήνους Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών .....	23
4.2 Χώρος Αναζήτησης και Αντικειμενική Συνάρτηση .....	25
4.3 Φάσεις του αλγορίθμου .....	26
4.4 Κινητικότητα Δικτύου Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών .....	27
4.5 Σύνοψη.....	31

<b>Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα .....</b>	<b>33</b>
5.1 Γενικά .....	33
5.2 Προσομοίωση Σεναρίων Κίνησης .....	33
5.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης .....	37
5.4 Σύνοψη .....	45
<b>Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – Προτάσεις .....</b>	<b>47</b>
6.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα .....	47
6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα .....	47
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>49</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Απεικόνιση της μεταβολής της θέσης ενός σωματιδίου σε δισδιάστατο επίπεδο τη χρονική στιγμή $t$ (αριστερά) και τη χρονική στιγμή $t+1$ (δεξιά) [3] .....	11
Σχήμα 2.2: Τοπολογίες αλγορίθμου PSO.....	14
Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση του σεναρίου καταστροφής με τις ομάδες (clusters) των ανθρώπων τη χρονική στιγμή $t = 0$ s. ....	19
Σχήμα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση του σεναρίου καταστροφής με τις ομάδες (clusters) των ανθρώπων τη χρονική στιγμή $t = 100$ s. ....	19
Σχήμα 3.3: Πολυκόπτερο (multi copter) αριστερά και UAV με σταθερά φτερά (fixed wing) δεξιά.....	20
Σχήμα 3.4: Απεικόνιση παραδείγματος εντοπισμού και μη ανθρώπων (nodes) από δίκτυο μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAVs).....	21
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα συμπεριφοράς UAV σε σχέση με τις φάσεις του αλγορίθμου .....	28
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα υπολογισμού διανύσματος ταχύτητας UAV [10].....	29
Σχήμα 4.3: Απεικόνιση κινητικότητας δικτύου UAVs σε τρεις φάσεις α) Inertia, β) Local Best και γ) Global Best .....	30
Σχήμα 5.1: Ψευδοκώδικας αλγορίθμου βελτιστοποίησης .....	34
Σχήμα 5.2: Πίνακας παραμέτρων προσομοίωσης.....	35
Σχήμα 5.3: Απεικόνιση μεταβολής των παραμέτρων της βελτιστοποίησης με το χρόνο .....	35
Σχήμα 5.4: Συνδυασμοί των παραμέτρων του αδρανειακού βάρους, του τοπικού βέλτιστου και του τοπικού ελάχιστου .....	36
Σχήμα 5.5: Ποσοστό εντοπισμένων ανθρώπων για $(x,y) = (0,0)$ .....	37
Σχήμα 5.6: Ποσοστό εντοπισμένων ανθρώπων για $(x,y) = (4000,0)$ .....	38
Σχήμα 5.7: Ποσοστό εντοπισμένων ανθρώπων για $(x,y) = (0,4000)$ .....	38
Σχήμα 5.8: Ποσοστό εντοπισμένων ανθρώπων για $(x,y) = (4000,4000)$ .....	38
Σχήμα 5.9: Ποσοστό εντοπισμένων ανθρώπων για τυχαία, ομοιόμορφη κατανομή στο χώρο .....	39
Σχήμα 5.10: Μεταβολή αριθμού εντοπισμένων ανθρώπων με το χρόνο για $w = 0.75, c1 = 0$ και $c2 = 0.25$ . ....	40
Σχήμα 5.11: Απεικόνιση εισόδου των UAVs από το σημείο $(x,y) = (4000,0)$ .....	41
Σχήμα 5.12: Απεικόνιση τη χρονική στιγμή $t = 80$ s. ....	41
Σχήμα 5.13: Απεικόνιση τη χρονική στιγμή $t = 170$ s. ....	42
Σχήμα 5.14: Απεικόνιση τη χρονική στιγμή $t = 450$ s. ....	42
Σχήμα 5.15: Απεικόνιση τη χρονική στιγμή $t = 750$ s. ....	43
Σχήμα 5.16: Απεικόνιση τη χρονική στιγμή $t = 900$ s. ....	43
Σχήμα 5.17: Απεικόνιση τη χρονική στιγμή $t = 1000$ s. ....	44
Σχήμα 5.18: Απεικόνιση τη χρονική στιγμή $t = 1350$ s. ....	44



## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

### 1.1 Κίνητρο και Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Μετά από μία φυσική καταστροφή, όπως ο σεισμός, ο τυφώνας και η πλημμύρα, είναι αναγκαία η άμεση έναρξη απαραίτητων βοηθητικών ενεργειών στις πληγείσες περιοχές. Στις περιπτώσεις αυτές, οι διασώστες έρχονται αντιμέτωποι με πλήθος αντίξων συνθηκών· μία από αυτές είναι η δυσλειτουργία ή καταστροφή της υποδομής επικοινωνίας.

Οι πρώτες 12 - 24 ώρες μετά από μία καταστροφή είναι κρίσιμες, καθώς μπορούν να καθορίσουν την επιτυχία των αποστολών διάσωσης. Για το λόγο αυτό, η επικοινωνία μεταξύ των διασωστών είναι ζωτικής σημασίας και κατά συνέπεια, είναι απαραίτητη μία εναλλακτική μορφή της που θα χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Η μορφή αυτή επικοινωνίας θα πρέπει να αναπτύσσεται σε σύντομο χρονικό διάστημα, να μπορεί να προσαρμοστεί στις πραγματικές συνθήκες και να χρησιμοποιεί ασύρματες τεχνολογίες έτσι ώστε να παρέχει ευκολία χρήσης στους διασώστες και στους ανθρώπους - θύματα.

Τα μικρά, μη επανδρωμένα αεροσκάφη (Unmanned Aerial Vehicles - UAVs) πληρούν αυτές τις προϋποθέσεις, καθώς έχουν τη δυνατότητα να εξερευνήσουν μία περιοχή - σενάριο καταστροφών, μετακινούμενα σε συγκεκριμένες θέσεις και αποφεύγοντας πιθανά εμπόδια, προκειμένου να συλλέξουν πληροφορίες σχετικά με τις θέσεις των θυμάτων και τα χαρακτηριστικά του σεναρίου. Επιπλέον, μπορούν να λειτουργήσουν ως ένα ευέλικτο, αναπτυσσόμενο δίκτυο επικοινωνίας, το οποίο θα αντικαταστήσει το μη λειτουργικό δίκτυο λόγω της φυσικής καταστροφής. Η ομάδα των μη επανδρωμένων αεροσκαφών που χρησιμοποιείται ως δίκτυο επικοινωνίας ονομάζεται Flying Ad Hoc Network (FANET), Aerial Ad Hoc Network (AANET) ή δίκτυο UAVs [1],[2]. Η μεγάλη κινητικότητα των κόμβων στα δίκτυα UAV είναι αυτή που συνεισφέρει στη βελτιστοποίηση των επιθυμητών στόχων, καθώς επιτρέπει την προσαρμογή της τοπολογίας του δικτύου στο σενάριο.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη διαδρομών για το δίκτυο UAV έτσι ώστε να εξερευνήσει ένα σενάριο καταστροφών για τον εντοπισμό ανθρώπων, και στη συνέχεια να συγκλίνει στις ομάδες (clusters) των ανθρώπων προκειμένου να παρέχει βοήθεια με τη μορφή επικοινωνίας με τους διασώστες. Για τη δημιουργία αποδοτικών διαδρομών εξερεύνησης χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος βασισμένος στη μέθοδο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO) [3], η οποία εντάσσεται στο πεδίο της Υπολογιστικής Νοημοσύνης.

## 1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Τα μοντέλα κινητικότητας των ανθρώπων σε σενάρια καταστροφών, καθώς και ο σχεδιασμός αυτόνομων συστημάτων για την ανάπτυξη διαδρομών για κάθε UAV σε ένα δίκτυο, έχουν αποτελέσει αντικείμενο έρευνας των τελευταίων ετών.

Όσον αφορά τα μοντέλα κινητικότητας των ανθρώπων, οι περισσότερες μελέτες εστιάζουν κυρίως στη μοντελοποίηση των κινήσεων των διασωστών, καθώς αφορούν μονάδες προστασίας του πολίτη [4],[5]. Στη δημοσίευση [6] παρουσιάζεται το μοντέλο σύνθετης κινητικότητας για σενάρια καταστροφών (Composite Mobility Model - CoM), το οποίο προκύπτει από το συνδυασμό βασικότερων μοντέλων, όπως είναι το μοντέλο σημείου αναφοράς ομάδας (Reference Point Group Mobility Model - RPGM) και το μοντέλο Levy - Walk για την απόκτηση πιο ρεαλιστικών προσομοιώσεων χωρίς τη συγκέντρωση κόμβων σε μια περιοχή. Το μοντέλο Levy - Walk μαζί με το μοντέλο κινητικότητας τυχαίου σημείου (Random Waypoint Mobility Model - RWP) συνιστούν τις πιο συνηθισμένες μεθόδους μοντελοποίησης της κινητικότητας των ανθρώπων, καθώς προσομοιώνουν το σενάριο καταστροφής ως μία τετραγωνισμένη περιοχή και κατανέμουν τα θύματα σε ολόκληρο το χώρο.

Πρόσφατες μελέτες βασίζονται στην ανάλυση πραγματικών ιχνών της ανθρώπινης κίνησης προκειμένου να αναπτύξουν νέα μοντέλα κινητικότητας [7], ενώ άλλες προσπαθούν να επαληθεύσουν τα υφιστάμενα μοντέλα χρησιμοποιώντας πραγματικά ίχνη κίνησης [8],[9]. Στη δημοσίευση [1] προτείνεται ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο, όπου απεικονίζονται πραγματικά στοιχεία μιας περιοχής μετά από μία φυσική καταστροφή, όπως ερείπια κτιρίων, αποκλεισμένοι δρόμοι και κτίρια στα οποία είναι εγκλωβισμένοι άνθρωποι οι οποίοι δεν μπορούν να διαφύγουν χωρίς τη βοήθεια των διασωστών. Επιπρόσθετα, προσομοιώνονται απότομες μεταβολές στο χώρο, όπως μία έκρηξη, που μπορούν να οδηγήσουν στην εξαφάνιση ομάδων ανθρώπων από το την περιοχή της καταστροφής.

Ως προς το σχεδιασμό αυτόνομων συστημάτων για την ανάπτυξη διαδρομών, υπάρχουν τρεις στρατηγικές ελέγχου: (α) Κεντρική (centralized): κάθε κόμβος μοιράζεται τις πληροφορίες του με όλους τους κόμβους του δικτύου. Κατά συνέπεια, η διαδικασία λήψης απόφασης είναι κεντρική, (β) Αποκεντρωμένη (decentralized): δεν υπάρχει ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των κόμβων με αποτέλεσμα η λήψη αποφάσεων να βασίζεται αποκλειστικά στις πληροφορίες του ίδιου του κόμβου και (γ) Κατανεμημένη (distributed): δεν υπάρχει κεντρικός κόμβος και οι κόμβοι ανταλλάσσουν μεταξύ τους πληροφορίες. Με τον τρόπο αυτό, κάθε κόμβος λαμβάνει αποφάσεις χρησιμοποιώντας τόσο τις δικές του πληροφορίες όσο και τις πληροφορίες που λαμβάνει από γειτονικούς του κόμβους [10].

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων παρουσιάζουν οι μέθοδοι της Υπολογιστικής Νοημοσύνης, οι οποίες είναι εμπνευσμένες από τη φύση. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (GA) [11] χρησιμοποιούνται για την εύρεση λύσεων ακριβείας σε προβλήματα βελτιστοποίησης, βασιζόμενοι στην θεωρία της εξέλιξης και συγκεκριμένα στη φυσική επιλογή, τη διασταύρωση και τη γενετική μετάλλαξη. Αρχικά, δημιουργείται τυχαία ένας πληθυσμός πιθανών λύσεων που ονομάζονται χρωμοσώματα. Κάθε λύση αξιολογείται για την ικανότητά της προς επιβίωση στην αντικειμενική συνάρτηση του εκάστοτε προβλήματος και οι πιο δυνατές λύσεις είναι αυτές που αναπαράγονται. Μέσα από την επαναληπτική διαδικασία της εξέλιξης προκύπτουν όλο και καλύτερες λύσεις [3].

Οι αλγόριθμοι της Νοημοσύνης Σμήνους (Swarm Intelligence - SI) [12],[13] προέρχονται από τη μελέτη συμπεριφοράς κοινωνικών ομάδων στη φύση, όπως είναι τα σμήνη πουλιών και οι αποικίες μυρμηγκιών. Κάθε μέλος ενός σμήνους αναπαριστά μία πιθανή λύση, η οποία ελέγχεται στην αντικειμενική συνάρτηση. Στη συνέχεια, κάθε μέλος για να μετακινηθεί προς τη βέλτιστη λύση, λαμβάνει υπόψιν τόσο τη δική του, μέχρι εκείνη τη στιγμή, βέλτιστη λύση όσο και των γειτονικών του σωματιδίων. Στη δημοσίευση [14] η εξερεύνηση ενός σεναρίου καταστροφής πραγματοποιείται με αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization - ACO) και στη δημοσίευση [15] μία ομάδα μη επανδρωμένων αεροσκαφών χρησιμοποιείται για την κατάσβεση δασικών πυρκαγιών. Μετά την ανάθεση σημείου πυρκαγιάς σε κάθε UAV, αυτό θα αναπτύξει τη βέλτιστη διαδρομή προς το αντίστοιχο σημείο με βάση τον αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO).

Αντίστοιχοι αλγόριθμοι που εμπνέονται από τη φύση είναι αυτοί που βασίζονται στο φυσικό ανοσοποιητικό σύστημα, και συγκεκριμένα στον τρόπο λειτουργίας του και τις αρχές που το διέπουν. Οι αλγόριθμοι Τεχνητού Ανοσοποιητικού Συστήματος (Artificial Immune System - AIS) μοντελοποιούν στην ουσία την ικανότητα του φυσικού ανοσοποιητικού συστήματος να ανιχνεύει τα ξένα κύτταρα που εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό. Οι συγγραφείς στη δημοσίευση [16] χρησιμοποιούν UAVs για την περιπολία καθορισμένης περιοχής και την αντιμετώπιση πιθανών εισβολέων. Η στρατηγική τους βασίζεται στις αρχές των αντισωμάτων και τον τρόπο που συνεργάζονται μεταξύ τους για μια επιτυχή ανοσοαπόκριση.

### 1.3 Περιγραφή Διαδικασίας Προσομοίωσης

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος ανάπτυξης διαδρομών για την εξερεύνηση ενός σεναρίου καταστροφής σε αποστολή διάσωσης από ένα

δίκτυο μη επανδρωμένων αεροσκαφών, ο οποίος βασίζεται στον αλγόριθμο της μεθόδου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων. Οι τροποποιήσεις εμπεριέχονται στην εξίσωση της ταχύτητας της μεθόδου και έχουν ως σκοπό την αποδοτικότερη εξερεύνηση του χώρου.

Για την αξιολόγηση του αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση και προσομοίωση τόσο του σεναρίου καταστροφών όσο και των παραγόμενων διαδρομών εξερεύνησης. Η μοντελοποίηση του χώρου του σεναρίου έγινε χρησιμοποιώντας το μοντέλο κινητικότητας Τυχαίου Σημείου για τους ανθρώπους - θύματα της καταστροφής, οι οποίοι είναι οργανωμένοι σε 3 ομάδες (clusters). Διεξήχθη ένας μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων με διαφορετικούς συνδυασμούς χαρακτηριστικών παραμέτρων και για διαφορετικά σενάρια κίνησης.

Στόχος του δικτύου μη επανδρωμένων αεροσκαφών είναι η ενίσχυση των αποστολών διάσωσης, καθώς έχει τη δυνατότητα να εξερευνήσει το χώρο πριν τους διασώστες. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να παρέχει βοήθεια στους ίδιους αλλά και στα θύματα.

### **1.4 Δομή Διπλωματικής Εργασίας**

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο του αλγορίθμου της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, το οποίο χρησιμοποιείται για την εξερεύνηση του σεναρίου καταστροφής από τα UAVs και την σύγκλισή τους στις ομάδες ανθρώπων που εντοπίστηκαν στο προηγούμενο στάδιο, δηλαδή αυτό της εξερεύνησης.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι παραδοχές που πραγματοποιήθηκαν σχετικά με το περιβάλλον του σεναρίου καταστροφής, δηλαδή τον περιβάλλοντα χώρο και το μοντέλο κινητικότητας των ανθρώπων - θυμάτων, καθώς και οι υποθέσεις για την πλοήγηση, την επικοινωνία και τους στόχους των μη επανδρωμένων αεροσκαφών.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για το συντονισμό σμήνους μη επανδρωμένων, αυτόνομων, ιπτάμενων οχημάτων. Ο αλγόριθμος αυτός βασίστηκε στη μέθοδο της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, η οποία περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφονται τα σενάρια κίνησης, τα οποία προσομοιώθηκαν με τη χρήση του προγράμματος Matlab R2016a και ορίζονται οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και γίνεται σύγκριση μεταξύ των σεναρίων κίνησης.



Στο κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση και εξάγονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα. Επιπλέον, διατυπώνονται προτάσεις προς μελλοντική έρευνα.



## Κεφάλαιο 2: Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO)

### 2.1 Γενικά για τη Νοημοσύνη Σμήνους

Νοημοσύνη Σμήνους (Swarm Intelligence - SI) αποκαλείται το επιστημονικό πεδίο που ασχολείται με τη συλλογική συμπεριφορά αποκεντρωμένων και αυτοοργανωμένων φυσικών ή τεχνητών συστημάτων [17]. Η θεωρία αυτή, που είναι εμπνευσμένη από τη φύση, μελετήθηκε για πρώτη φορά το 1989 από τους G. Beni και J. Wang και αφορά στον τρόπο με τον οποίο αλληλοεπιδρούν τα άτομα για την επίλυση ενός προβλήματος του συστήματος στο οποίο ανήκουν.

Παραδείγματα συστημάτων Νοημοσύνης Σμήνους είναι οι αποικίες μυρμηγκιών και τερμιτών, τα σμήνη πουλιών και μελισσών και τα κοπάδια ψαριών. Ο πληθυσμός του συστήματος ορίζεται ως σμήνος (swarm) και τα μέλη που το απαρτίζουν ως πράκτορες (agents). Η συμπεριφορά κάθε μέλους βασίζεται τόσο στις δικές του πληροφορίες όσο και στις πληροφορίες που ανταλλάσσει με γειτονικά μέλη του σμήνους, είτε απευθείας, είτε μέσω του περιβάλλοντός τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα μέλη να λειτουργούν συντονισμένα παρά την απουσία δομής κεντρικού ελέγχου - συντονιστή, που να υποδεικνύει στα μέλη τον τρόπο συμπεριφοράς τους. Για το λόγο αυτό, η συνολική συμπεριφορά του σμήνους είναι αρκετά πολύπλοκη [3].

Η μελέτη της κοινωνικής συμπεριφοράς ζώων και εντόμων οδήγησε στην ανάπτυξη αλγορίθμων βελτιστοποίησης και ομαδοποίησης, που στόχος τους είναι η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς κάθε μέλους καθώς και των αλληλεπιδράσεων του με τα γειτονικά του μέλη προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση σε σύνθετα προβλήματα. Αλγόριθμοι που εντάσσονται στον τομέα της Υπολογιστικής Νοημοσύνης Σμήνους (Computational Swarm Intelligence) είναι η βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών [18], ο αλγόριθμος πυγολαμπίδων [18], η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων [3], ο αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών [19], ο αλγόριθμος αναζήτησης κούκου [20] κ.α.. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ένας τροποποιημένος αλγόριθμος της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, ενώ στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο του βασικού αλγορίθμου.

### 2.2 Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων

Η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) είναι ένας αλγόριθμος στοχαστικής βελτιστοποίησης που βασίζεται στον πληθυσμό (population

- based. Είναι εμπνευσμένος από τη φύση, και συγκεκριμένα από την κοινωνική συμπεριφορά των πουλιών που συνιστούν ένα σμήνος [21].

Κάθε μέλος του σμήνους ονομάζεται σωματίδιο (particle) και αναπαριστά μία πιθανή λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Τα σωματίδια κινούνται σε ένα πολυδιάστατο χώρο αναζήτησης με βάση την κοινωνική - ψυχολογική τάση τους να «αντιγράφουν» την επιτυχία των γειτονικών τους σωματιδίων. Κατά συνέπεια, η συμπεριφορά τους επηρεάζεται τόσο από τις δικές τους εμπειρίες και γνώσεις όσο και από αυτές των υπόλοιπων σωματιδίων του σμήνους. Η μοντελοποίηση αυτής της κοινωνικής συμπεριφοράς οδηγεί στη στοχαστική επιστροφή των σωματιδίων σε περιοχές που θεωρούνται βέλτιστες, μετά από την αξιολόγησή τους στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Έστω  $S$  ο χώρος αναζήτησης. Κάθε χρονική στιγμή τα σωματίδια σε ένα σμήνος ανανεώνουν τη θέση τους σύμφωνα με τη σχέση (2.1):

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (2.1)$$

όπου:

- $x_i(t)$ : η θέση του σωματιδίου  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $v_i(t+1)$ : η ταχύτητα που εφαρμόζεται στο σωματίδιο  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$ .

Ο όρος της ταχύτητας είναι αυτός που καθορίζει την πορεία της βελτιστοποίησης και εμπεριέχει τόσο τις πληροφορίες του σωματιδίου όσο και τις πληροφορίες των γειτονικών του σωματιδίων. Επηρεάζεται από τρεις παράγοντες, τον αδρανειακό (inertia component), τον γνωστικό (cognitive component) και τον κοινωνικό (social component), οι οποίοι θα αναλυθούν στην ενότητα 2.2.3.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι Ολικής Βέλτιστης Λύσης και Τοπικής Βέλτιστης Λύσης, οι οποίοι βασίζονται στον κύριο αλγόριθμο PSO και διαφέρουν ως προς το μέγεθος της γειτονιάς των σωματιδίων.

### 2.2.1 Αλγόριθμος της Ολικής Βέλτιστης Λύσης (Global best PSO)

Στην περίπτωση του αλγόριθμου ολικής βέλτιστης λύσης (gbest PSO), ως γειτονιά κάθε σωματιδίου ορίζεται ολόκληρο το σμήνος και επομένως, ο κοινωνικός παράγοντας της ταχύτητας περιέχει πληροφορίες από όλα τα σωματίδια. Η ταχύτητα κάθε σωματιδίου  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$  ως προς τη διάσταση  $j = 1, \dots, n_x$  δίνεται από τη σχέση (2.2):

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_{1j}(t)[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2r_{2j}(t)[\hat{y}_j(t) - x_{ij}(t)] \quad (2.2)$$

όπου:

- $v_{ij}(t)$ : η ταχύτητα του σωματιδίου  $i$  στη διάσταση  $j$  τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $x_{ij}(t)$ : η θέση του σωματιδίου  $i$  στη διάσταση  $j$  τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $c_1, c_2$ : θετικές σταθερές επιτάχυνσης που ποσοτικοποιούν τη συνεισφορά του γνωστικού και κοινωνικού παράγοντα αντίστοιχα.
- $r_{1j}(t), r_{2j}(t)$ : ομοιόμορφα κατανεμημένες τυχαίες μεταβλητές στο εύρος  $[0,1]$ . Χρησιμοποιούνται για τη στοχαστικότητα του αλγορίθμου.
- $y_{ij}(t)$ : προσωπική βέλτιστη λύση του σωματιδίου  $i$  μέχρι τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $\hat{y}_j(t)$ : ολική βέλτιστη λύση μέχρι τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $w$ : αδρανειακό βάρος.

Η προσωπική βέλτιστη λύση  $y_i(t)$  του σωματιδίου  $i$  είναι η βέλτιστη λύση του συγκεκριμένου σωματιδίου μέχρι τη δεδομένη χρονική στιγμή  $t$  και υπολογίζεται από τη σχέση (2.3):

$$y_i(t+1) = \begin{cases} y_i(t), & \text{αν } f(x_i(t+1)) \geq f(y_i(t)) \\ x_i(t+1), & \text{αν } f(x_i(t+1)) < f(y_i(t)) \end{cases} \quad (2.3)$$

όπου  $f: R^{n_x} \rightarrow R$  είναι η αντικειμενική συνάρτηση που αξιολογεί την εγγύτητα κάθε λύσης στη βέλτιστη.

Η ολική βέλτιστη λύση  $\hat{y}(t)$  είναι η καλύτερη λύση που έχει βρεθεί από όλα τα σωματίδια του σμήνους μέχρι τη χρονική στιγμή  $t$  και υπολογίζεται από τη σχέση (2.4):

$$\hat{y}(t) = \min\{f(x_0(t)), \dots, f(x_n(t))\} \quad (2.4)$$

όπου  $n$  ο συνολικός αριθμός σωματιδίων στο σμήνος.

### 2.2.2 Αλγόριθμος της Τοπικής Βέλτιστης Λύσης (Local best PSO)

Για τον αλγόριθμο τοπικής βέλτιστης λύσης (lbest PSO), ως γειτονιά ορίζεται μία μικρότερη περιοχή, σε αντίθεση με τον gbest PSO όπου ο όρος γειτονιά αναφερόταν σε ολόκληρο το σμήνος, και η ανταλλαγή πληροφοριών πραγματοποιείται στο εύρος αυτής της γειτονιάς. Επομένως, στον κοινωνικό παράγοντα της ταχύτητας

εμπεριέχεται η πληροφορία της βέλτιστης θέσης που έχει μέχρι εκείνη τη στιγμή εντοπιστεί από τα σωματίδια της γειτονιάς.

Η γειτονιά στην περίπτωση αυτή ορίζεται ως:

$$N_i = \{y_{i-n_{N_i}}(t), y_{i-n_{N_i}+1}(t), \dots, y_{i-1}(t), y_i(t), y_{i+1}(t), y_{i+n_{N_i}}(t)\} \quad (2.5)$$

Η τοπική βέλτιστη λύση αναφέρεται στη βέλτιστη λύση της γειτονιάς και δίνεται από τη σχέση (2.6):

$$\hat{y}_i(t+1) \in \{N_i | f(\hat{y}_i(t+1)) = \min\{f(x)\}, \forall x \in N_i\} \quad (2.6)$$

Η ταχύτητα κάθε σωματιδίου  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$  ως προς τη διάσταση  $j = 1, \dots, n_x$  δίνεται από τη σχέση (2.7):

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_{1j}(t)[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2r_{2j}(t)[\hat{y}_{ij}(t) - x_{ij}(t)] \quad (2.7)$$

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στο βασικό αλγόριθμο PSO δεν υπάρχουν κοινά στοιχεία μεταξύ των σωματιδίων μέσα σε μία γειτονιά, καθώς ο διαχωρισμός τους σε γειτονιές γίνεται με βάση το δείκτη κάθε σωματιδίου. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί τροποποιήσεις του βασικού αλγορίθμου έτσι ώστε ο διαχωρισμός να πραγματοποιείται με βάση τη θέση κάθε σωματιδίου. Επιπλέον, κάθε σωματίδιο έχει τη δυνατότητα να είναι μέλος σε παραπάνω από μία γειτονιές, δηλαδή οι γειτονιές αλληλοκαλύπτονται. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η διάδοση της πληροφορίας σε όλες τις γειτονιές σωματιδίων, και κατά συνέπεια σε όλο το σμήνος, και η σύγκλιση τους σε μια πιθανή βέλτιστη λύση.

Συγκρίνοντας τους αλγόριθμους gbest PSO και lbest PSO παρατηρούμε ότι ο gbest είναι υποπερίπτωση του lbest για μέγεθος γειτονιάς ίσο με το μέγεθος ολόκληρου του σμήνους. Ισχύει με άλλα λόγια  $n_{N_i} = n$ . Επιπλέον, ο αλγόριθμος gbest συγκλίνει πιο γρήγορα σε μία λύση λόγω της άμεσης επικοινωνίας και ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των σωματιδίων. Υπάρχει, όμως, ο κίνδυνος ο αλγόριθμος να «παγιδευτεί» σε τοπικά ελάχιστα λόγω της μείωσης ποικιλομορφίας των λύσεων· στο σημείο αυτό είναι που πλεονεκτεί ο αλγόριθμος lbest PSO [3].

### 2.2.3 Ταχύτητα των Σωματιδίων

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το διάνυσμα της ταχύτητας επηρεάζεται από τη συμβολή τριών παραγόντων και δίνεται από τις σχέσεις (2.2), (2.7):

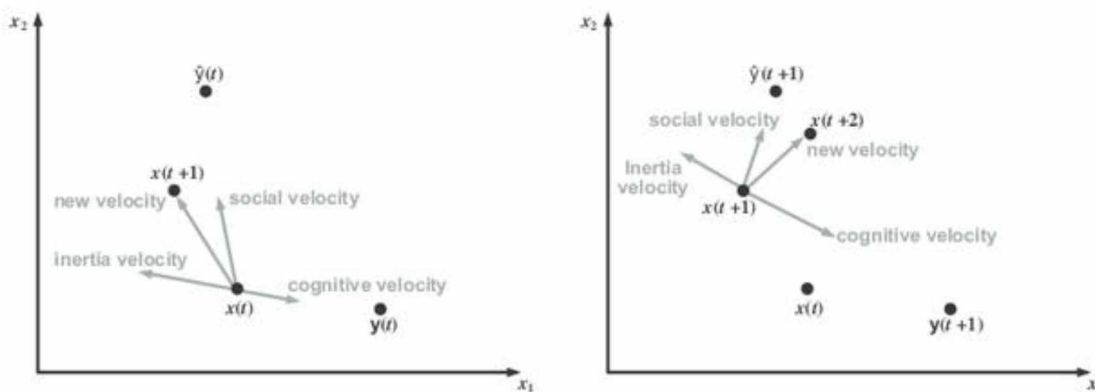
$$v_{ij}(t + 1) = wv_{ij}(t) + c_1r_{1j}(t)[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2r_{2j}(t)[\hat{y}_{ij}(t) - x_{ij}(t)]$$

Ο αδρανειακός παράγοντας (inertia component),  $wv_{ij}(t)$ , συνιστά τη «μνήμη» του σωματιδίου σχετικά με την προηγούμενη κατεύθυνσή του και το εμποδίζει από την εκτέλεση απότομων μεταβολών κατεύθυνσης. Το αδρανειακό βάρος  $w$  ελέγχει τη συνεισφορά της προηγούμενης ταχύτητας  $v_{ij}(t)$ , και επομένως θα πρέπει να γίνει σωστή επιλογή της τιμής του έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η συγκλίνουσα συμπεριφορά του σμήνους. Για  $w \geq 1$ , η ταχύτητα αυξάνεται με το χρόνο και τα σωματίδια δε μπορούν να αλλάξουν κατεύθυνση προκειμένου να μετακινηθούν προς θέσεις που πιθανόν να ήταν πιο βέλτιστες. Έτσι, το σμήνος αποκλίνει από τη βέλτιστη λύση. Για  $w < 1$ , η ταχύτητα των σωματιδίων σταδιακά μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί. Όσο πιο μικρό είναι το  $w$ , τόσο περισσότερο συμβάλλουν ο γνωστικός και ο κοινωνικός παράγοντας [3].

Ο γνωστικός παράγοντας (cognitive component),  $c_1r_1(y_i - x_i)$ , αντιπροσωπεύει την προσωπική εμπειρία του σωματιδίου  $i$  και εκφράζει την τάση του να επιστρέψει στη βέλτιστή του θέση μέχρι τη δεδομένη χρονική στιγμή.

Όσον αφορά τον κοινωνικό παράγοντα (social component),  $c_2r_2(\hat{y} - x_i)$  στην περίπτωση του gbest και  $c_1r_1(\hat{y}_i - x_i)$  για τον lbest, αντιπροσωπεύει την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των σωματιδίων της γειτονιάς, όπως αυτή ορίζεται σε κάθε περίπτωση. Ο παράγοντας αυτός εκφράζει την τάση των σωματιδίων να μετακινηθούν προς την ολική βέλτιστη λύση, δηλαδή τη βέλτιστη λύση του σμήνους.

Στο Σχήμα 2.1 αναπαρίστανται η θέση και η ταχύτητα ενός σωματιδίου, σε δισδιάστατο επίπεδο και σε δύο χρονικές στιγμές  $t$  και  $t+1$ , και ο τρόπος με τον οποίο η τελευταία επηρεάζεται από τους τρεις παράγοντες που προαναφέρθηκαν, δηλαδή τον αδρανειακό, το γνωστικό και τον κοινωνικό. Το σωματίδιο κατευθύνεται προς την



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση της μεταβολής της θέσης ενός σωματιδίου σε δισδιάστατο επίπεδο τη χρονική στιγμή  $t$  (αριστερά) και τη χρονική στιγμή  $t+1$  (δεξιά) [3]

ολική βέλτιστη λύση  $\hat{y}(t) = \hat{y}(t + 1)$ , χωρίς όμως να καταλήγει κατευθείαν σε αυτή λόγω της συνεισφοράς των τριών παραγόντων. Παρόλο που το υπολογιστικό κόστος αυξάνεται, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των διαδρομών που ακολουθεί το κάθε σωματίδιο, μειώνεται ο κίνδυνος να «παγιδευτεί» ο αλγόριθμος σε τοπικά ελάχιστα και έτσι επιτυγχάνεται ευρύτερη αναζήτηση στο πεδίο.

#### 2.2.4 Αρχικοποίηση Μεταβλητών

Η αρχικοποίηση των μεταβλητών του σμήνους κρίνεται απαραίτητη, διότι μπορεί να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό την εξέλιξη του αλγόριθμου και κατά συνέπεια το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Οι μεταβλητές που λαμβάνουν αρχικές τιμές είναι η θέση κάθε σωματιδίου καθώς και η προσωπική του βέλτιστη λύση, η αρχική του ταχύτητα και οι σταθερές επιτάχυνσης,  $c_1$  και  $c_2$ . Στην περίπτωση του αλγορίθμου lbest PSO, θα πρέπει να οριστεί και το μέγεθος της γειτονιάς.

Οι αρχικές θέσεις των σωματιδίων θα πρέπει να κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλο το χώρο αναζήτησης, έτσι ώστε να μη μείνει ανεξερεύνητη περιοχή του χώρου η οποία θα μπορούσε να περιλαμβάνει τη βέλτιστη λύση. Μία αποδοτική μέθοδος αρχικοποίησης της θέσης του σωματιδίου δίνεται από τη σχέση (2.8):

$$x(0) = x_{min,j} + r_j(x_{max,j} - x_{min,j}), \quad \forall j = 1, \dots, n_x, \forall x = 1, \dots, n \quad (2.8)$$

όπου:

- $x_{min}$ : ελάχιστο όριο
- $x_{max}$ : μέγιστο όριο
- $r$ : ομοιόμορφα κατανεμημένη τυχαία μεταβλητή στο εύρος (0,1)

Η αρχική, προσωπική βέλτιστη λύση κάθε σωματιδίου ισούται με τη θέση του σωματιδίου τη χρονική στιγμή  $t = 0$ , δηλαδή:

$$y_i(0) = x(0) \quad (2.9)$$

Η αρχική ταχύτητα κάθε σωματιδίου μπορεί να οριστεί ως:

$$v_i(0) = 0 \quad (2.10)$$

Η αρχικοποίηση της προσωπικής βέλτιστης λύσης και της ταχύτητας κάθε σωματιδίου δεν περιλαμβάνει άμεσα τυχαίους όρους αλλά έμμεσα, καθώς οι δύο αυτές μεταβλητές συνδέονται μέσω των σχέσεων (2.1) και (2.3) με την θέση του σωματιδίου. Επομένως, η τυχαία αρχικοποίηση της θέσης του σωματιδίου αρκεί για τη διασφάλιση της τυχαιότητας του αλγορίθμου.



### 2.2.5 Συνθήκες Τερματισμού του Αλγορίθμου

Η συνθήκη τερματισμού του αλγορίθμου θα πρέπει να επιλεγεί κατάλληλα έτσι ώστε να μην τον επιβαρύνει με υπολογιστικό κόστος και να μην τον οδηγεί σε πρόωρη σύγκλιση, καθώς υπάρχει η πιθανότητα να αγνοηθούν λύσεις που προσεγγίζουν περισσότερο τη βέλτιστη. Μερικά από τα κριτήρια που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι:

- Ορισμός μιας αποδεκτής λύσης. Στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει η διαφορά μεταξύ της τελευταίας λύσης που υπολογίστηκε και της βέλτιστης να μην ξεπερνά μια συγκεκριμένη τιμή, η οποία ορίζεται ως απόλυτο σφάλμα. Η συνθήκη αυτή προϋποθέτει τη γνώση της βέλτιστης λύσης από την έναρξη της διαδικασίας βελτιστοποίησης, γεγονός που δεν είναι πάντοτε εφικτό.
- Ορισμός μέγιστου αριθμού επαναλήψεων. Το κριτήριο αυτό συνήθως χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με κάποιο κριτήριο σύγκλισης, έτσι ώστε να τερματίσει τον αλγόριθμο σε περίπτωση που αδυνατεί να συγκλίνει. Αν επιλεγεί μικρός αριθμός επαναλήψεων, τότε πιθανόν ο αλγόριθμος να τερματιστεί πριν βρεθεί η βέλτιστη λύση.
- Ορισμός αριθμού επαναλήψεων στον οποίο δεν έχει παρατηρηθεί σημαντική μεταβολή. Η μεταβολή αυτή μπορεί να αναφέρεται στην ταχύτητα του σωματιδίου, τη θέση του ή την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος βελτιστοποίησης. Για παράδειγμα, μικρές μεταβολές των θέσεων των σωματιδίων συνεπάγονται ότι το σμήνος έχει συγκλίνει σε μία θέση, και επομένως ο αλγόριθμος μπορεί να τερματιστεί.

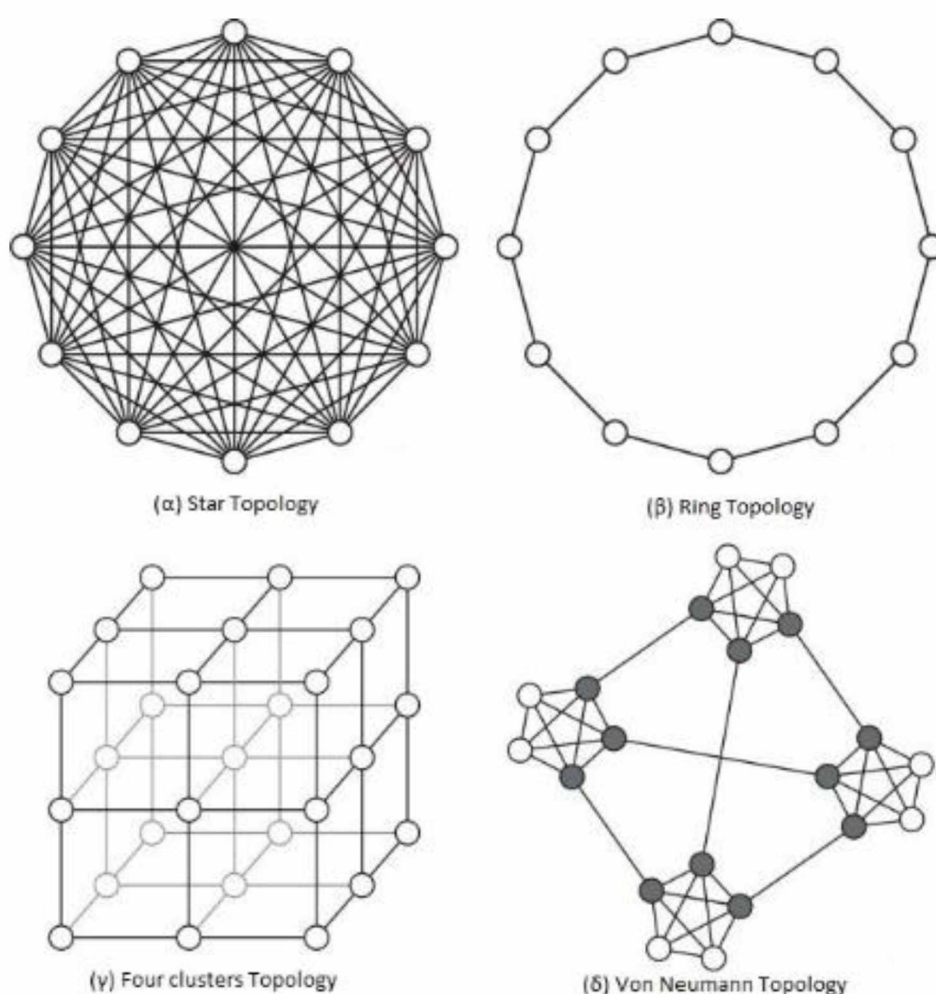
### 2.2.6 Τοπολογίες

Η επικοινωνία μεταξύ των σωματιδίων στο εσωτερικό του σμήνους συνιστά ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία του αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, καθώς η είναι αυτή που καθοδηγεί την πορεία εξέλιξης του αλγορίθμου. Το μοντέλο επικοινωνίας μέσω του οποίου τα σωματίδια ανταλλάσσουν τις πληροφορίες τους, στα πλαίσια ενός δομημένου κοινωνικού δικτύου, χαρακτηρίζεται ως τοπολογία.

Τα σωματίδια που ανήκουν στην ίδια γειτονιά, όπου ο όρος γειτονιά μπορεί να αναφέρεται και σε ολόκληρο το σμήνος, ανταλλάσσουν τις προσωπικές, βέλτιστες λύσεις τους μέχρι τη δεδομένη χρονική στιγμή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα σωματίδια να κινούνται σταδιακά προς τη λύση που θεωρείται βέλτιστη· γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η δομή του κοινωνικού δικτύου ή αλλιώς τοπολογία καθορίζει την απόδοση του αλγορίθμου. Η ροή των πληροφοριών μέσω ενός κοινωνικού δικτύου

εξαρτάται από το βαθμό διασύνδεσης των κόμβων, το ποσοστό ομαδοποίησης και τη μέση απόσταση μεταξύ των κόμβων. Μερικές από τις τοπολογίες που έχουν αναπτυχθεί για τον αλγόριθμο του PSO είναι [3]:

- Η τοπολογία σε μορφή αστεριού (Star Topology), στην οποία κάθε σωματίδιο μπορεί να επικοινωνήσει με οποιοδήποτε άλλο στο σμήνος, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2(α). Κατά συνέπεια, κάθε σωματίδιο κινείται προς την ολική βέλτιστη λύση, που είναι η βέλτιστη λύση του σμήνους. Το μοντέλο αυτό επικοινωνίας χρησιμοποιείται στον αλγόριθμο gbest PSO.



Σχήμα 2.2: Τοπολογίες αλγορίθμου PSO

- Η τοπολογία σε μορφή δαχτυλιδιού (Ring Topology), όπου κάθε σωματίδιο επικοινωνεί με τα  $n_N$  γειτονικά του σωματίδια. Όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 2.2(β), στην περίπτωση που  $n_N = 2$ , το σωματίδιο αναπτύσσει σύνδεσμο επικοινωνίας με τα ακριβώς διπλανά του σωματίδια. Με τον τρόπο αυτό, τα σωματίδια κινούνται προς τη βέλτιστη λύση της γειτονιάς στην οποία ανήκουν. Ένα σωματίδιο μπορεί να ανήκει σε παραπάνω από μία γειτονιές. Με άλλα λόγια, οι γειτονιές αλληλοκαλύπτονται, γεγονός που οδηγεί στη διάδοση των πληροφοριών σε όλο το σμήνος. Η μορφή ring topology χαρακτηρίζει τον αλγόριθμο lbest PSO.
- Η τοπολογία των τεσσάρων ομάδων (Four Clusters Topology), η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2(γ). Σε αυτή την περίπτωση, σχηματίζονται 4 ομάδες (clusters) που η κάθε μία επικοινωνεί με τις υπόλοιπες.
- Η τοπολογία Von Neumann, όπου τα σωματίδια συνδέονται σε ένα πλέγμα και σχηματίζουν μια ιδιόμορφη κοινωνική δομή. Η τοπολογία αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2(δ).

### 2.3 Σύνοψη

Η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων είναι μία μέθοδος εμπνευσμένη από τη συμπεριφορά κοινωνικών ομάδων στη φύση, και συγκεκριμένα των σμηνών που σχηματίζουν τα πουλιά, και εντάσσεται στο πεδίο της Υπολογιστικής Νοημοσύνης. Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύθηκαν οι κύριες παράμετροι που συνιστούν το βασικό αλγόριθμο της μεθόδου, όπως η θέση και η ταχύτητα των σωματιδίων του σμήνους, καθώς και οι παράγοντες που τις επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα, ο ορισμός της γειτονιάς, η αρχικοποίηση των μεταβλητών, τα κριτήρια τερματισμού και οι τοπολογίες των αλγορίθμων της βελτιστοποίησης.



## Κεφάλαιο 3: Σενάριο Καταστροφής (Disaster Scenario)

### 3.1 Περιγραφή Σεναρίου Καταστροφής

Η μοντελοποίηση ενός σεναρίου καταστροφής (disaster scenario) περιλαμβάνει τον ορισμό του χώρου στον οποίο πραγματοποιείται η καταστροφή, και τη μοντελοποίηση της κινητικότητας των ανθρώπων - θυμάτων στο χώρο αυτό. Τα μοντέλα κινητικότητας των ανθρώπων μπορούν να διακριθούν σε δύο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι τα συνθετικά μοντέλα (synthetic mobility models), όπου η κίνηση των ανθρώπων είναι τυχαία και οι κόμβοι κινούνται ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο αναπτύσσοντας συνθετικά ίχνη, ενώ η δεύτερη κατηγορία είναι τα μοντέλα κινητικότητας που βασίζονται σε πραγματικά ίχνη (trace - based mobility models) [7].

Για να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική η απεικόνιση της κίνησης των ανθρώπων στο χώρο του σεναρίου καταστροφής, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν παράμετροι όπως η μορφολογία του χώρου μετά την καταστροφή και η φυσική, καθώς και ψυχολογική κατάσταση των ανθρώπων. Οι παράμετροι αυτές, όμως, καθιστούν περίπλοκο το πρόβλημα της μοντελοποίησης της κίνησης των ανθρώπων. Για το λόγο αυτό, συνήθως χρησιμοποιούνται τα συνθετικά μοντέλα που έχουν πιο απλοποιημένη μορφή, σε αντίθεση με αυτά που βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα, καθώς στα συνθετικά οι κινήσεις γενικεύονται για το σύνολο των κόμβων του δικτύου δημιουργώντας ομοιογενή ίχνη.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η χρήση του μοντέλου κινητικότητας Τυχαίου Σημείου (Random Waypoint Mobility Model - RWP) για την κίνηση των ανθρώπων, το οποίο εντάσσεται στην κατηγορία των συνθετικών μοντέλων.

#### 3.1.1 Περιβάλλον

Για τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντα χώρου καταστροφής έγιναν οι εξής υποθέσεις:

- Ο χώρος του σεναρίου καταστροφής είναι σε δισδιάστατο επίπεδο και τετραγωνισμένος.
- Δε μοντελοποιούνται εμπόδια στο χώρο, όπως οικοδομικά τετράγωνα, ερείπια κτιρίων και αποκλεισμένοι δρόμοι.
- Τα θύματα συγκεντρώνονται σε μικρές υποπεριοχές που χαρακτηρίζονται ως ομάδες ανθρώπων (victims clusters).

Οι παραδοχές αυτές μετατρέπουν το χώρο του σεναρίου καταστροφής σε ένα απλουστευμένο μοντέλο το οποίο δεν προσομοιάζει το πραγματικό. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε, καθώς κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η χρήση αλγορίθμου για την ανάπτυξη του δικτύου μη επανδρωμένων αεροσκαφών, προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι τους που περιγράφονται στη συνέχεια του κεφαλαίου. Επομένως, ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο του σεναρίου καταστροφής θα οδηγούσε σε αύξηση της πολυπλοκότητας του προβλήματος και μη επίτευξη των επιθυμητών στόχων.

### 3.1.2 Κινητικότητα Ανθρώπων

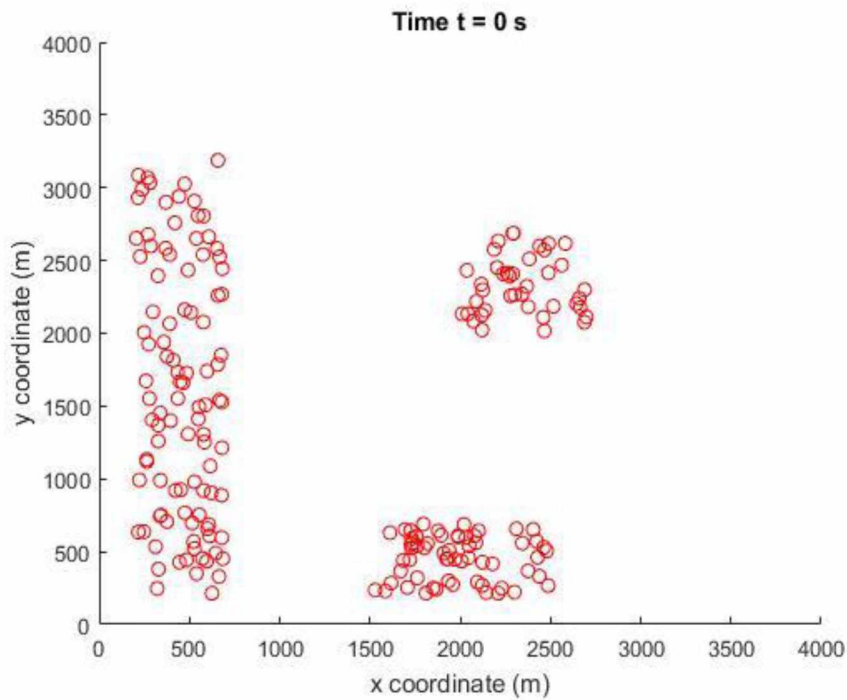
Το μοντέλο κινητικότητας των θυμάτων έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Τα θύματα έχουν τη δυνατότητα να μετακινηθούν μόνο μέσα στο χώρο που ορίζεται από την ομάδα στην οποία ανήκουν.
- Τα όρια κάθε ομάδας είναι μεταβλητά, καθώς τα θύματα μετακινούνται στο χώρο που καταλαμβάνει η κάθε ομάδα και δεν παραμένουν στατικά. Παρ' όλα αυτά, το κέντρο κάθε ομάδας παραμένει σταθερό.
- Οι άνθρωποι κινούνται στα πλαίσια της ομάδας τους, αλλάζοντας θέση και ταχύτητα κάθε χρονική στιγμή, σύμφωνα με το μοντέλο κινητικότητας Τυχαίου Σημείου (Random Waypoint Mobility Model - RWP) [22],[23]. Με βάση το μοντέλο αυτό, κάθε κόμβος επιλέγει ένα τυχαίο σημείο στο χώρο και κινείται προς αυτό με τυχαία ταχύτητα. Με τον τρόπο αυτό, η πορεία που ακολουθεί κάθε κόμβος εμπεριέχει μια αλληλουχία τυχαίων αλμάτων.
- Η ελάχιστη ταχύτητα των θυμάτων ορίζεται σε 0,5 m/s και η μέγιστη ταχύτητα σε 3 m/s.
- Το θύμα μπορεί να παραμείνει στατικό για μικρό χρονικό διάστημα.

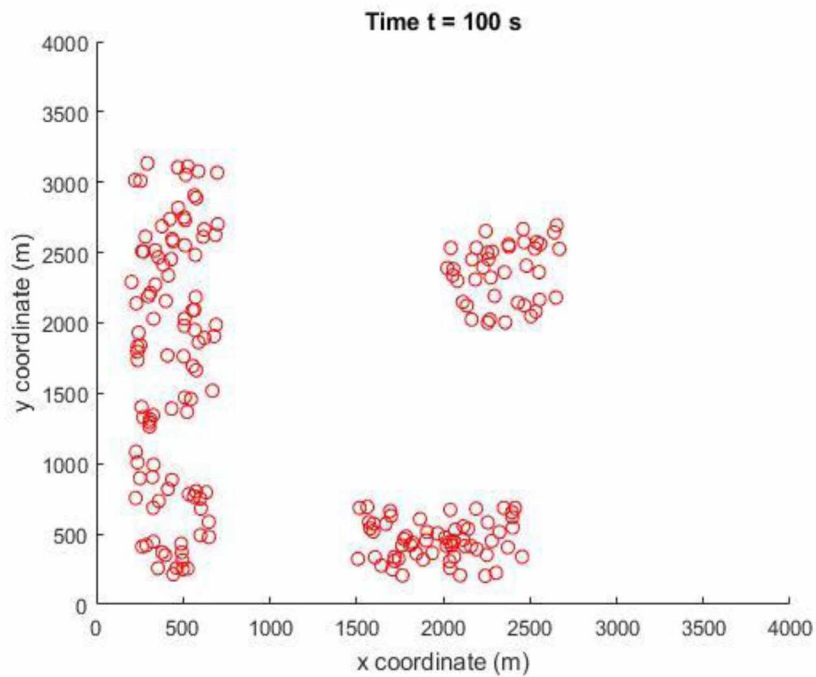
Στα Σχήματα 3.1 και 3.2 αναπαρίστανται οι θέσεις που καταλαμβάνουν οι άνθρωποι, οι οποίοι είναι οργανωμένοι σε τρεις ομάδες, στο χώρο του σεναρίου καταστροφής σε δύο χρονικές στιγμές  $t = 0 \text{ s}$  και  $t = 100 \text{ s}$ . Μπορεί κανείς εύκολα να παρατηρήσει ότι έχουν μεταβληθεί τα όρια των ομάδων με την πάροδο του χρόνου λόγω της μετακίνησης των μελών στο εσωτερικό τους.

## 3.2 Δίκτυο Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών

Σε ένα δίκτυο αυτόνομων μη επανδρωμένων αεροσκαφών, κάθε UAV χαρακτηρίζεται ως πράκτορας (agent). Η δράση που αναπτύσσει, και κατά συνέπεια η διαδρομή που θα ακολουθήσει, προκύπτει από το συνδυασμό των δικών του



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση του σεναρίου καταστροφής με τις ομάδες (clusters) των ανθρώπων τη χρονική στιγμή  $t = 0$  s.



Σχήμα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση του σεναρίου καταστροφής με τις ομάδες (clusters) των ανθρώπων τη χρονική στιγμή  $t = 100$  s.

πληροφοριών και των πληροφοριών που αποκτά μέσω της επικοινωνίας του, τόσο με τους γειτονικούς του πράκτορες, όσο και με τα θύματα της καταστροφής. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές υποθέσεις σχετικά με την πλοήγηση των UAVs, την επικοινωνία και τους στόχους τους.

### 3.2.1 Πλοήγηση Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών

Οι παραδοχές που έγιναν σχετικά με την πλοήγηση των UAVs είναι [10]:

- Τα UAVs που θα χρησιμοποιηθούν είναι είτε πολυκόπτερα (multi copter), είτε με σταθερά φτερά (fixed wing), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2.
- Κινούνται σε δισδιάστατο επίπεδο προκειμένου να απλοποιηθεί η δυναμική και επομένως η προσομοίωσή τους.
- Οι διαδρομές που θα ακολουθήσουν αποτελούνται από μια σειρά σημείων, τα οποία προκύπτουν από τον αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων.
- Η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να αναπτύξει ένα UAV εξαρτάται από το είδος του. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε μία μέση τιμή ενός τυπικού UAV και συγκεκριμένα ορίστηκε σε 15 m/s.
- Τα UAVs εισέρχονται στο χώρο του σεναρίου καταστροφής ως ομάδα από οποιαδήποτε από τις γωνίες του είτε κατανέμονται με ομοιόμορφο τρόπο. Επιπλέον, πριν την έναρξη της φάσης εξερεύνησης γνωρίζουν μόνο τις διαστάσεις του χώρου και όχι τις συντεταγμένες των ομάδων και κατά συνέπεια τις θέσεις των θυμάτων.



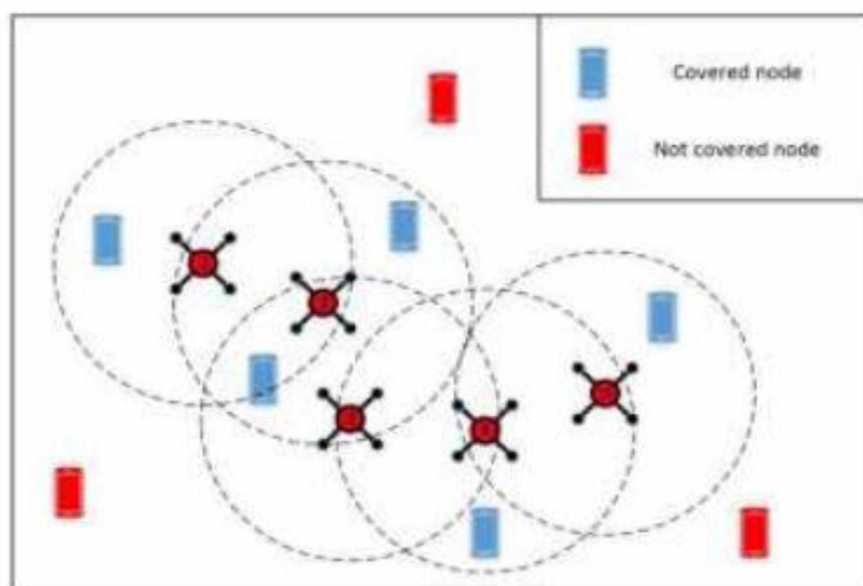
Σχήμα 3.3: Πολυκόπτερο (multi copter) αριστερά και UAV με σταθερά φτερά (fixed wing) δεξιά



### 3.2.2 Επικοινωνία Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών

Όσον αφορά την επικοινωνία ανάμεσα στα UAVs αλλά και με τους διασώστες και τα θύματα ισχύουν τα παρακάτω [10]:

- Διαθέτουν ασύρματες συσκευές επικοινωνίας με μικρή εμβέλεια, ενώ ορισμένα UAVs διαθέτουν συσκευές και με μεγάλη εμβέλεια. Οι συσκευές μικρής εμβέλειας χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία τόσο με τα υπόλοιπα μέλη του σμήνους, όσο και με τους δέκτες στο έδαφος, δηλαδή τους διασώστες και τα θύματα. Για την επίτευξη επικοινωνίας με δορυφόρο ή επίγειο σταθμό χρησιμοποιούνται οι συσκευές μεγάλης εμβέλειας.
- Ο εντοπισμός των θυμάτων από τα UAVs κατά τη διάρκεια της εξερευνητικής φάσης μπορεί να γίνει με τη χρήση ασύρματων τεχνολογιών, καθώς και με μεθόδους τεχνητής όρασης όπως είναι οι κάμερες. Επιπλέον, είναι δυνατή η εκπομπή σήματος από τους ανθρώπους μέσω των κινητών τους τηλεφώνων.
- Η επικοινωνία μεταξύ των UAVs αλλά και με τους ανθρώπους επιτυγχάνεται σύμφωνα με το μοντέλο δίσκου (disk model) [24], υποθέτοντας ακτίνα ίση με 500 m. Αυτό συνεπάγεται ότι αν δύο UAVs βρεθούν σε απόσταση μικρότερη από 500 m μπορούν να αναπτύξουν σύνδεσμο επικοινωνίας. Επιπλέον, αν η θέση ενός ανθρώπου βρίσκεται μέσα στο εύρος εμβέλειας του UAV, τότε θεωρείται ότι έχει γίνει εντοπισμός του συγκεκριμένου ανθρώπου. Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται ο εντοπισμός ανθρώπων (nodes) από ένα δίκτυο UAVs. Οι μπλε κόμβοι εντοπίζονται από ένα τουλάχιστον UAV, ενώ οι κόμβοι με κόκκινο χρώμα δεν εντοπίζονται, καθώς δεν βρίσκονται στο εύρος της ακτίνας



Σχήμα 3.4: Απεικόνιση παραδείγματος εντοπισμού και μη ανθρώπων (nodes) από δίκτυο μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAVs)

εμβέλειας των UAVs. Η ακτίνα της εμβέλειας επικοινωνίας εξαρτάται άμεσα από τη χρονική διάρκεια ζωής της μπαταρίας του UAV και του ωφέλιμου φορτίου του, και επομένως της κατηγορίας στην οποία ανήκει.

- Με την ανάπτυξη συνδέσμου επικοινωνίας, πραγματοποιείται ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των UAVs και συγκεκριμένα των προσωπικών, βέλτιστων λύσεων τους μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή. Η βέλτιστη λύση περιλαμβάνει τον αριθμό των θυμάτων που εντοπίστηκαν και τις συντεταγμένες τους.

### 3.2.3 Στόχοι Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών

Οι υποθέσεις σχετικά με τους στόχους που πρέπει να επιτευχθούν από τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη είναι:

- Εξερεύνηση του σεναρίου καταστροφής και σύγκλιση σε μία από τις ομάδες ανθρώπων που εντοπίστηκαν κατά τη διάρκεια της φάσης εξερεύνησης.
- Ο διαθέσιμος χρόνος για την επίτευξη των στόχων πρέπει να είναι μικρότερος από το μέγιστο χρόνο πτήσης, ο οποίος εξαρτάται από τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Για το λόγο αυτό, ο χρόνος προσομοίωσης επιλέχθηκε να είναι 1350 s, καθώς ο μέγιστος χρόνος πτήσης ενός τυπικού UAV είναι περίπου 25 min που ισούται με 1500 s.
- Μετά τον εντοπισμό των ανθρώπων, η βοήθεια που μπορούν να τους παρέχουν τα UAVs είναι είτε παροχή επικοινωνίας με τους διασώστες είτε παροχή πληροφοριών σχετικά τη μορφολογία του χώρου μετά την καταστροφή, όπως διαδρομές που μπορούν να ακολουθήσουν και τυχόν κινδύνους που μπορεί να περιέχουν.

## 3.3 Σύνοψη

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάστηκε το περιβάλλον προσομοίωσης στο οποίο θα εφαρμοστεί ο τροποποιημένος αλγόριθμος της μεθόδου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων. Αρχικά, αναλύθηκαν τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντα χώρου του σεναρίου καταστροφής και το μοντέλο κινητικότητας των ανθρώπων στο χώρο αυτό και στη συνέχεια περιεγράφηκαν οι παραδοχές σχετικά με την πλοήγηση, την επικοινωνία και τους στόχους των μη επανδρωμένων αεροσκαφών.

## Κεφάλαιο 4: Αλγόριθμος Συντονισμού Σμήνους Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών

### 4.1 Περιγραφή Αλγορίθμου Συντονισμού Σμήνους Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για το συντονισμό σμήνους μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAVs), έτσι ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητοί στόχοι, βασίζεται στο βασικό αλγόριθμο της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, που περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 2, με κάποιες τροποποιήσεις.

Η εξίσωση της ταχύτητας των σωματιδίων περιλαμβάνει τις τυχαίες μεταβλητές  $r_{1j}(t)$  και  $r_{2j}(t)$ , οι οποίες είναι ομοιόμορφα κατανομημένες στο εύρος  $[0,1]$  και περιέχονται στο γνωστικό και στον κοινωνικό όρο της ταχύτητας αντίστοιχα. Οι παράμετροι αυτές συμβάλλουν στην αποφυγή «παγίδευσης» του αλγορίθμου σε τοπικά μέγιστα, και στον εντοπισμό του ολικού μέγιστου στο χώρο του σεναρίου καταστροφής, που αποτελεί έναν από τους βασικούς στόχους που πρέπει να επιτευχθούν από τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη.

Οι απότομες μεταβολές, όμως, που προκαλούνται λόγω των παραπάνω παραμέτρων στη διαδρομή που θα ακολουθήσει κάθε μη επανδρωμένο αεροσκάφος, οδηγούν σε μία «νευρική» πτήση και κατά συνέπεια σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας και μείωση του μέγιστου χρόνου πτήσης. Για το λόγο αυτό, εισήχθη στην εξίσωση της ταχύτητας ένας τυχαίος όρος, ο οποίος εμφανίζεται κάθε φορά που ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος φτάνει στα όρια του χώρου αναζήτησης. Με τον τρόπο αυτό, το UAV αναγκάζεται να επιστρέψει στο εσωτερικό του χώρου· εφόσον, όμως, η βέλτιστη θέση δε βρίσκεται στα όρια του σεναρίου καταστροφής. Σύμφωνα με τις παραπάνω αλλαγές, η εξίσωση της ταχύτητας των σωματιδίων δίνεται από τη σχέση (4.1):

$$v_{ij}(t + 1) = wv_{ij}(t) + c_1r_{1j}(t)[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + \quad (4.1) \\ c_2r_{2j}(t)[\hat{y}_j(t) - x_{ij}(t)] + b$$

όπου:

- $v_{ij}(t)$ : η ταχύτητα του σωματιδίου  $i$  στη διάσταση  $j$  τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $x_{ij}(t)$ : η θέση του σωματιδίου  $i$  στη διάσταση  $j$  τη χρονική στιγμή  $t$ .

- $c_1, c_2$ : θετικές σταθερές επιτάχυνσης που ποσοτικοποιούν τη συνεισφορά του γνωστικού και κοινωνικού παράγοντα αντίστοιχα.
- $r_{1j}(t), r_{2j}(t)$ : ομοιόμορφα κατανομημένες τυχαίες μεταβλητές στο εύρος  $[0,1]$ . Χρησιμοποιούνται για τη στοχαστικότητα του αλγορίθμου.
- $y_{ij}(t)$ : προσωπική βέλτιστη λύση του σωματιδίου  $i$  μέχρι τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $\hat{y}_j(t)$ : ολική βέλτιστη λύση μέχρι τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $w$ : αδρανειακό βάρος.
- $b$ : τυχαία μεταβλητή που αντιπροσωπεύει την τυχαία κατεύθυνση που ακολουθεί ένα UAV όταν φτάσει στα όρια του χώρου αναζήτησης.

Στο βασικό αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, τα σωματίδια, και κυρίως αυτά που βρίσκονται μακριά από τη βέλτιστη λύση, αναπτύσσουν γρήγορα υψηλές ταχύτητες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απομακρύνονται από το χώρο αναζήτησης, να «παγιδεύονται» στα όρια του και κατά συνέπεια να αποκλίνουν. Για το λόγο αυτό, εισήχθη ένας επιπλέον περιορισμός, εκτός από την τυχαία μεταβλητή  $b$ , που εγκλείει την ταχύτητα μέσα στα επιθυμητά όρια (velocity clamping). Σύμφωνα με αυτόν τον περιορισμό, αν η ταχύτητα ενός σωματιδίου υπερβεί τη μέγιστη, καθορισμένη τιμή, τότε θα λάβει τη μέγιστη τιμή.

Έστω  $v_{max,j}$  η μέγιστη τιμή της ταχύτητας ως προς τη διάσταση  $j$ . Η ταχύτητα του σωματιδίου  $i$  μετά την εισαγωγή του περιορισμού θα ισούται σύμφωνα με τη σχέση (4.2) με:

$$v_{ij}(t+1) = \begin{cases} v'_{ij}(t+1), & \text{αν } v'_{ij}(t+1) < v_{max,j} \\ v_{max,j}, & \text{αν } v'_{ij}(t+1) \geq v_{max,j} \end{cases} \quad (4.2)$$

όπου  $v'_{ij}(t+1)$  η ταχύτητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4.1).

Ο αλγόριθμος της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων πλεονεκτεί σε σύγκριση με άλλες μεθόδους της Υπολογιστικής Νοημοσύνης, καθώς περιλαμβάνει μικρό αριθμό παραμέτρων, έχει χαμηλότερο υπολογιστικό κόστος και ταχύτερη σύγκλιση. Για τους παραπάνω λόγους, επιλέχθηκε για την επίλυση του προβλήματος που πραγματεύεται η παρούσα εργασία.

## 4.2 Χώρος Αναζήτησης και Αντικειμενική Συνάρτηση

Ο χώρος αναζήτησης  $S$  αντιστοιχεί στο χώρο του σεναρίου καταστροφής, όπου κινούνται τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη προκειμένου να εξερευνήσουν το χώρο αυτό και να εντοπίσουν τις ομάδες των ανθρώπων. Οι πιθανές θέσεις που μπορεί να καταλάβει κάθε UAV συνιστούν το χώρο αναζήτησης και εκφράζονται με το σύστημα των καρτεσιανών συντεταγμένων  $(x,y)$ , καθώς έχει γίνει η υπόθεση ότι ο χώρος του σεναρίου καταστροφής είναι δισδιάστατος. Ως αρχή του συστήματος συντεταγμένων ορίζεται το σημείο  $x = 0, y = 0$ . Το μέγεθος του χώρου του σεναρίου ορίζεται από τις μέγιστες τιμές που μπορούν να πάρουν οι συντεταγμένες  $x,y$ . Επομένως, ο χώρος αναζήτησης  $S$  ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.3) ως:

$$S : \{x: 0 \leq x \leq x_{max} \text{ and } y: 0 \leq y \leq y_{max}\} \quad (4.3)$$

Η αξιολόγηση κάθε υποψήφιας λύσης πραγματοποιείται με τη χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης του εκάστοτε προβλήματος. Στην παρούσα εργασία, η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως ο αριθμός των ανθρώπων που εντοπίζονται από τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη και αφορά ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης, καθώς η βέλτιστη λύση είναι η βέλτιστη διαδρομή με την οποία το UAV μπορεί να εντοπίσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό ανθρώπων - θυμάτων. Οι σχέσεις (4.4), (4.5) ορίζουν την αντικειμενική συνάρτηση.

$$f(x, y) = k \quad (4.4)$$

$$(x^*, y^*) \in S \subseteq \mathbb{R}^2 \text{ έτσι ώστε } \forall (x, y) \in S \rightarrow f(x^*, y^*) \geq f(x, y) \quad (4.5)$$

όπου:

- $f$ : η εξίσωση της αντικειμενικής συνάρτησης
- $x, y$ : οι συντεταγμένες των UAVs στην  $x$  και  $y$  διεύθυνση αντίστοιχα
- $k$ : ο αριθμός των ανθρώπων που εντοπίζονται

Ένας άνθρωπος θεωρείται ότι έχει εντοπιστεί από ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος, όταν βρίσκεται σε Ευκλείδεια απόσταση  $d$  μικρότερη ή ίση από την ακτίνα εμβέλειας του UAV. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο δίσκου (disk model) ή μοντέλο κάλυψης δίσκου Boolean (Boolean disk coverage model), το οποίο θεωρεί ως μεταβλητή τη σύνδεση (connectivity) μεταξύ ενός UAV και ενός κόμβου (node), δηλαδή ανθρώπου [24]. Το μοντέλο αυτό δίνεται από τη σχέση (4.6).

$$f(d(u_i, n_j)) = \begin{cases} 1, & \text{αν } d(u_i, n_j) \leq R \\ 0, & \text{αν } d(u_i, n_j) > R \end{cases} \quad (4.6)$$

όπου:

- $d$ : η Ευκλείδεια απόσταση
- $u_i$ : η θέση του UAV
- $n_j$ : η θέση του ανθρώπου - κόμβου
- $R$ : η ακτίνα εμβέλειας του UAV

Η Ευκλείδεια απόσταση υπολογίζεται από την εξίσωση (4.7):

$$d(u_i, n_j) = \sqrt{(u_i(1) - n_j(1))^2 + (u_i(2) - n_j(2))^2} \quad (4.7)$$

Προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση στο χώρο αναζήτησης, τα UAVs επικοινωνούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας πληροφορίες σχετικά με τον μέγιστο αριθμό ανθρώπων που έχουν εντοπίσει και τη θέση στην οποία επιτεύχθηκε. Με τον τρόπο αυτό, κάθε σωματίδιο στο σμήνος μοιράζεται τις προσωπικές του πληροφορίες με όλα τα μέλη του σμήνους και επομένως γνωρίζει τις προσωπικές πληροφορίες κάθε σωματιδίου.

### 4.3 Φάσεις του αλγορίθμου

Κατά τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης, κάθε UAV θα περάσει από τρεις διαφορετικές χρονικές φάσεις, οι οποίες είναι ίσης διάρκειας. Επομένως, κάθε φάση ισούται με το ένα τρίτο του χρόνου προσομοίωσης. Επιπλέον, η χρονική διάρκεια κάθε φάσης είναι ίδια για όλα τα UAVs. Οι φάσεις αυτές είναι: α) του αδρανειακού βάρους (inertia), β) του τοπικού βέλτιστου (local best) και γ) του ολικού βέλτιστου (global best).

- Η πρώτη φάση αντιστοιχεί σε αυτή του αδρανειακού βάρους  $w$ . Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής, η επίδραση της αδράνειας είναι μεγαλύτερη από τη επίδραση του τοπικού και ολικού βέλτιστου. Κάθε UAV ακολουθεί μία ευθύγραμμη τροχιά, η οποία δημιουργείται με την είσοδο του στο χώρο του σεναρίου καταστροφής. Στην περίπτωση που το UAV φτάσει στα όρια του χώρου υπολογίζεται μία νέα διαδρομή, την οποία θα ακολουθήσει μέχρι να φτάσει και πάλι σε κάποιο από τα σύνορα του χώρου ή αρχίσει η δεύτερη φάση, αυτή του τοπικού βέλτιστου.
- Στη δεύτερη φάση, η κίνηση του UAV αρχίζει να επηρεάζεται από τον παράγοντα του τοπικού βέλτιστου  $c_1$ , δηλαδή από την προσωπική, βέλτιστή του λύση μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή. Παράλληλα, η επίδραση του φαινομένου της αδράνειας μειώνεται καθώς οι μεταβλητές του αδρανειακού βάρους και του τοπικού βέλτιστου θα πρέπει να έχουν άθροισμα ίσο με 1.

- Η τρίτη και τελευταία φάση του αλγορίθμου αντιστοιχεί στην επίδραση του παράγοντα του ολικού βέλτιστου  $c_2$ . Η διαδρομή που ακολουθεί κάθε UAV υπολογίζεται με βάση το ολικό βέλτιστο, καθώς τα UAVs τείνουν να προσελκύονται από την ολική βέλτιστη λύση. Η επίδραση του αδρανειακού παράγοντα μειώνεται ακόμα περισσότερο, καθώς το άθροισμα των τριών μεταβλητών θα πρέπει να ισούται με 1.

Πριν την έναρξη της φάσης εξερεύνησης, δηλαδή την έναρξη του αλγορίθμου, κάθε μη επανδρωμένο αεροσκάφος γνωρίζει την μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει κάθε ένας από τους τρεις παράγοντες που προαναφέρθηκαν. Έστω ότι ορίζεται η μέγιστη τιμή του αδρανειακού βάρους να ισούται με 1. Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης, κάθε UAV κινείται στο χώρο κατευθυνόμενο από το αδρανειακό του βάρος.

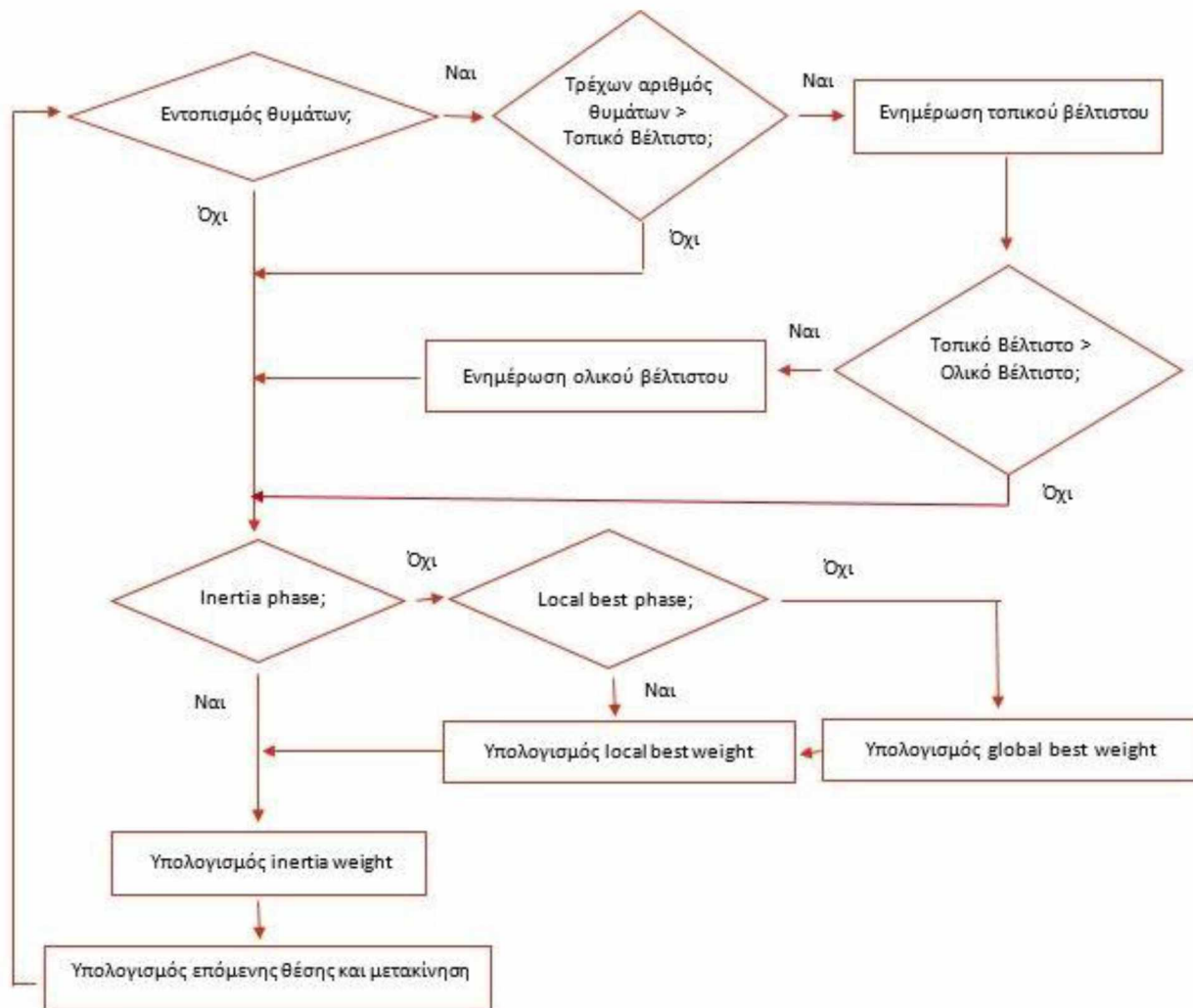
Όταν ξεκινήσει η φάση του τοπικού βέλτιστου, ο παράγοντας  $c_1$  θα αρχίσει να αυξάνεται βαθμιαία μέχρι να φτάσει τη μέγιστη τιμή του, ενώ παράλληλα το αδρανειακό βάρος θα μειώνεται έτσι ώστε κάθε χρονική στιγμή να ισχύει η συνθήκη ότι το άθροισμα των παραγόντων πρέπει να ισούται με 1. Στην τρίτη φάση, αυξάνεται ο παράγοντας του ολικού βέλτιστου και μειώνεται αντίστοιχα ο παράγοντας του αδρανειακού βάρους έτσι ώστε να το άθροισμα του αδρανειακού βάρους, του τοπικού βέλτιστου και του ολικού βέλτιστου να ισούται με 1.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι εφόσον ο παράγοντας του τοπικού βέλτιστου λάβει τη μέγιστη τιμή του, αυτή παραμένει σταθερή και δε μεταβάλλεται. Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται το διάγραμμα συμπεριφοράς ενός UAV σε σχέση με τις φάσεις του αλγορίθμου που περιεγράφηκαν.

#### 4.4 Κινητικότητα Δικτύου Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών

Κάθε μη επανδρωμένο αεροσκάφος του δικτύου κινείται ως ένα σωματίδιο του αλγορίθμου. Η κίνησή του περιγράφεται από την εξίσωση (4.1), σύμφωνα με την οποία το διάνυσμα της ταχύτητας κάθε UAV, που είναι  $v_{ij}(t + 1)$ , τη χρονική στιγμή  $t+1$  προκύπτει από το άθροισμα τριών συνιστωσών. Οι συνιστώσες αυτές είναι το διάνυσμα της ταχύτητας τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $v_{ij}(t)$ , το διάνυσμα με διεύθυνση την προσωπική, βέλτιστη λύση του UAV μέχρι τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $y_{ij}(t)$ , και το διάνυσμα με διεύθυνση την ολική βέλτιστη λύση του σμήνους μέχρι τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $\hat{y}_j(t)$ .

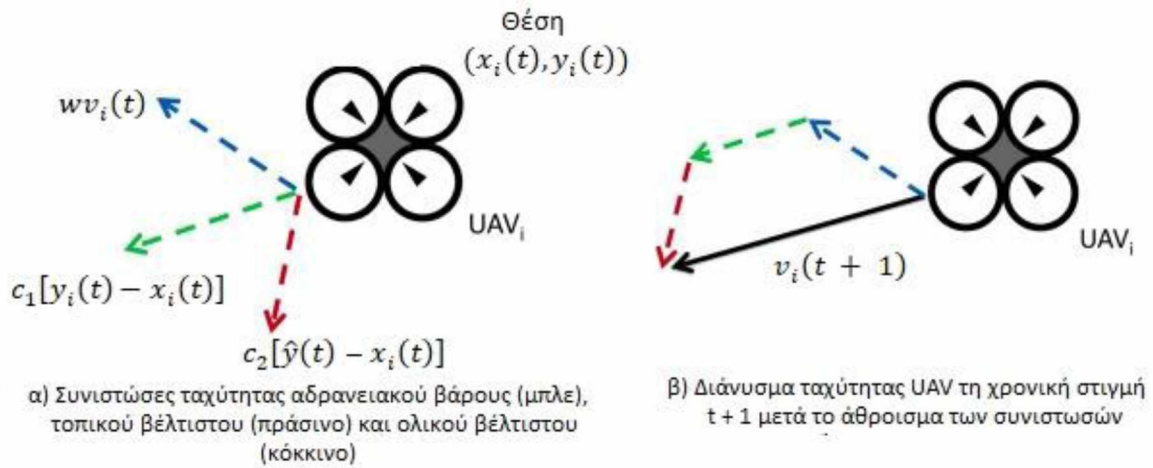
Η συνεισφορά κάθε μίας από τις παραπάνω συνιστώσες στον υπολογισμό της ταχύτητας του UAV επηρεάζεται από την αντίστοιχη παράμετρο. Το  $w$  είναι η



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα συμπεριφοράς UAV σε σχέση με τις φάσεις του αλγορίθμου

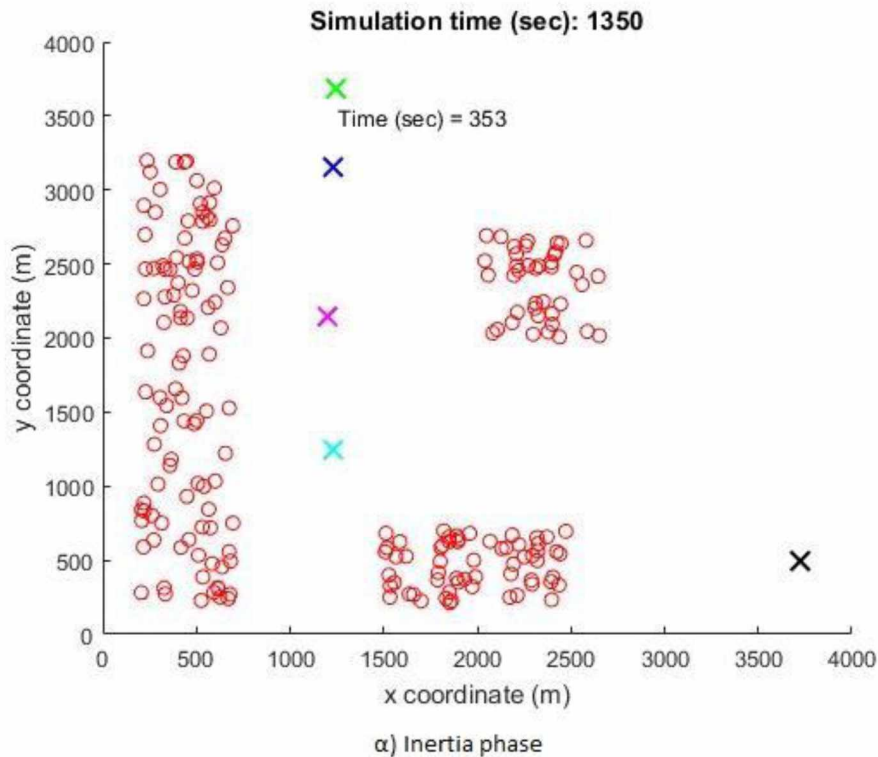
παράμετρος του αδρανειακού βάρους, το  $c_1$  η παράμετρος που ποσοτικοποιεί την έλξη του σωματιδίου προς την προσωπική του βέλτιστη λύση και το  $c_2$  η παράμετρος που ποσοτικοποιεί το μέγεθος της έλξης ενός σωματιδίου προς την ολική βέλτιστη λύση, δηλαδή τη βέλτιστη λύση του σμήνου. Οι μέγιστες τιμές αυτών των παραμέτρων συνιστούν σχεδιαστικές παραμέτρους και καθορίζονται πριν την έναρξη του αλγορίθμου. Ο τέταρτος όρος της σχέσης (4.1),  $b$ , αντιστοιχεί στην τυχαία διεύθυνση προς την οποία θα μετακινηθεί το UAV στην περίπτωση που η θέση του συμπίπτει με κάποιο από τα όρια του χώρου αναζήτησης. Ο υπολογισμός του διανύσματος της ταχύτητας και οι συνιστώσες του απεικονίζονται στο Σχήμα 4.2. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η συνιστώσα του αδρανειακού βάρους, με πράσινο του τοπικού βέλτιστου και με κόκκινο χρώμα του ολικού βέλτιστου.

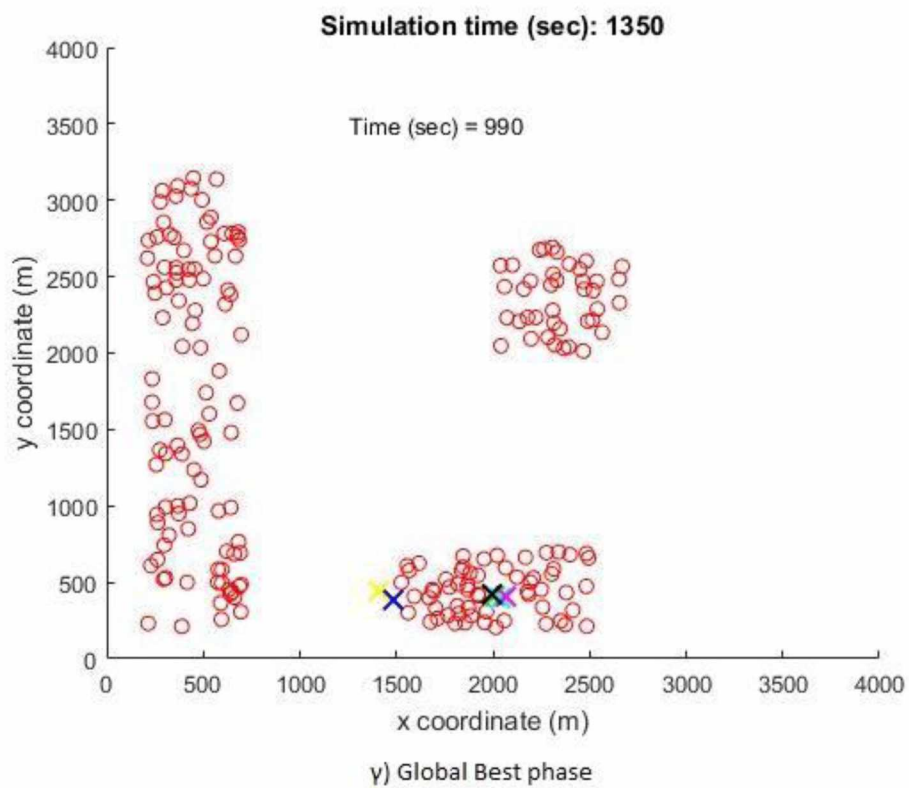
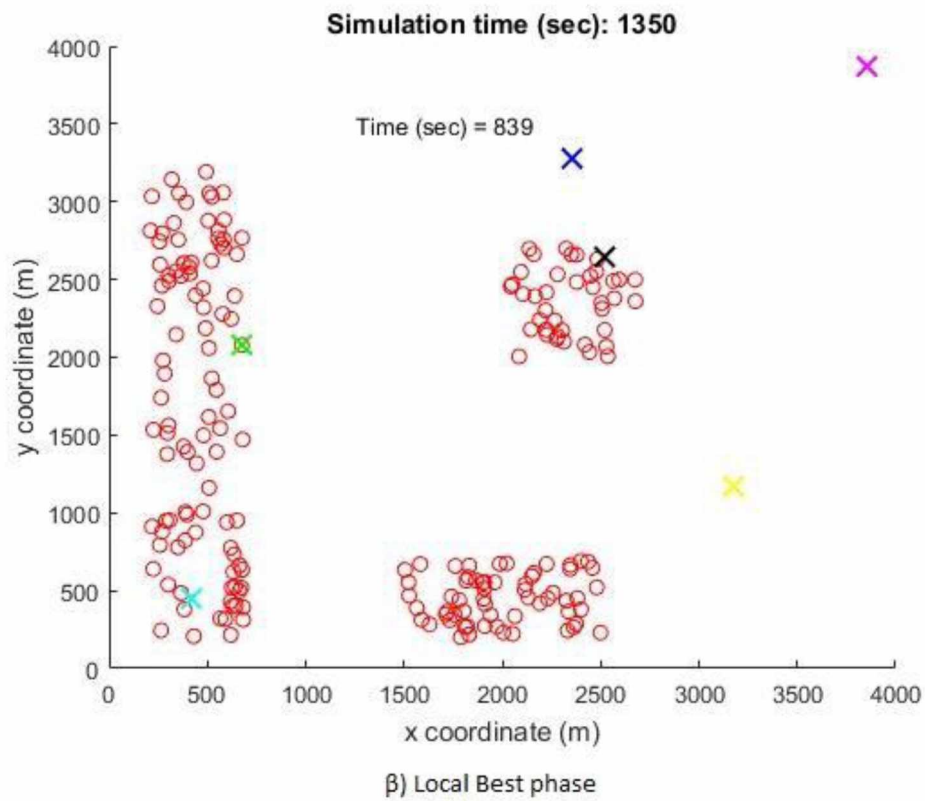




Σχήμα 4.2: Διάγραμμα υπολογισμού διανύσματος ταχύτητας UAV [10]

Στο Σχήμα 4.3 απεικονίζονται οι τρεις διαφορετικές φάσεις του αλγορίθμου που περιεγράφηκαν στην ενότητα 4.3. Στο Σχήμα 4.3(α) απεικονίζεται η πρώτη φάση, αυτή του αδρανειακού βάρους. Στο Σχήμα 4.3(β) φαίνεται η φάση του τοπικού βέλτιστου και πως τα σωματίδια αρχίζουν να «έλκονται» από την προσωπική τους βέλτιστη λύση και στο Σχήμα 4.3(γ) απεικονίζεται η φάση του ολικού βέλτιστου. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι τα σωματίδια συγκλίνουν στην ομάδα των ανθρώπων στην οποία έχουν εντοπίσει το μεγαλύτερο αριθμό ανθρώπων. Τα UAVs συμβολίζονται με το σχήμα x και οι άνθρωποι συμβολίζονται ως κόκκινοι κύκλοι.





Σχήμα 4.3: Απεικόνιση κινητικότητας δικτύου UAVs σε τρεις φάσεις  
α) Inertia, β) Local Best και γ) Global Best

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.2.5, προκειμένου να τερματιστεί η επαναληπτική διαδικασία ενός αλγορίθμου, χρησιμοποιούνται κάποια κριτήρια τερματισμού. Στην παρούσα εργασία, η συνθήκη τερματισμού επιλέχθηκε με βάση το μέγιστο, διαθέσιμο χρόνο πτήσης ενός τυπικού UAV, που ισούται με 1500 s. Για το λόγο αυτό, ο χρόνος προσομοίωσης ορίστηκε στα 1350 s.

#### 4.5 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκε ο τροποποιημένος αλγόριθμος της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για το συντονισμό σμήνους μη επανδρωμένων, αυτόνομων αεροσκαφών. Αρχικά, αναλύθηκε η εξίσωση της ταχύτητας των σωματιδίων καθώς και οι περιορισμοί που τη διέπουν. Στη συνέχεια, περιεγράφηκαν οι σχέσεις που ορίζουν το χώρο αναζήτησης και την αντικειμενική συνάρτηση. Τέλος, αναλύθηκαν οι φάσεις του αλγορίθμου από τις οποίες θα περάσει κάθε UAV και η κινητικότητα του δικτύου βάσει των φάσεων αυτών.



## Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα

### 5.1 Γενικά

Στα προηγούμενα κεφάλαια, έγινε η περιγραφή του θεωρητικού υπόβαθρου της παρούσας εργασίας, και συγκεκριμένα του αλγόριθμου που χρησιμοποιήθηκε για το συντονισμό σμήνους μη επανδρωμένων, αυτόνομων, ιπτάμενων οχημάτων. Η θεωρία της μεθόδου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων αποτέλεσε το κύριο εφόδιο για την εφαρμογή του αλγόριθμου και το τελευταίο θεωρητικό στάδιο της συγκεκριμένης εργασίας.

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται αρχικά οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή του αλγόριθμου, και στη συνέχεια τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις του σε διαφορετικά σενάρια κίνησης.

### 5.2 Προσομοίωση Σεναρίων Κίνησης

Για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του θεωρητικού μοντέλου βελτιστοποίησης σε διαφορετικά σενάρια κίνησης, έτσι ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα που θα προκύψουν και να βρεθεί το βέλτιστο σενάριο, σύμφωνα με το οποίο θα εντοπιστεί ο μεγαλύτερος αριθμός ανθρώπων από το δίκτυο των μη επανδρωμένων αεροσκαφών, χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα Matlab R2016a.

Αφού οριστούν οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, αρχικοποιούνται οι μεταβλητές της εξίσωσης της ταχύτητας (4.1) και της θέσης (2.1) κάθε σωματιδίου και υπολογίζονται οι θέσεις των ανθρώπων κάθε χρονική στιγμή, υπολογισμός ο οποίος πραγματοποιείται με τη χρήση του μοντέλου κινητικότητας Τυχαίου Σημείου. Μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας του αλγόριθμου, επικαιροποιούνται η ταχύτητα και η θέση κάθε σωματιδίου για κάθε χρονική στιγμή. Η αξιολόγηση κάθε πιθανής λύσης πραγματοποιείται με τη χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης, που ορίζεται από τις εξισώσεις (4.4), (4.5). Ανάλογα με το αποτέλεσμα που θα προκύψει, ενημερώνονται η προσωπική, βέλτιστη λύση κάθε σωματιδίου και η ολική, βέλτιστη λύση του σμήνους και συνεχίζεται η επαναληπτική διαδικασία μέχρι η συνθήκη τερματισμού του αλγόριθμου να είναι αληθής. Στο Σχήμα 5.1 δίνεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σε μορφή ψευδοκώδικα.

```

1: //Initialize all particles
2: Initialize
3: repeat
4:   for each particle  $i = 1, \dots, PopSize$  do
5:     //update the particle's best position
6:     if  $f(x_i) > f(y_i)$  then
7:        $y_i = x_i$ ;
8:     end
9:     //update the global best position
10:    if  $f(y_i) > f(\hat{y})$  then
11:       $\hat{y} = y_i$ ;
12:    end
13:  end
14:
15: //update particle's velocity and position
16: for each particle  $i = 1, \dots, PopSize$  do
17:   update the velocity using equation (4.1);
18:   update the position using equation (2.1);
19: end
20: until stopping condition is true;

```

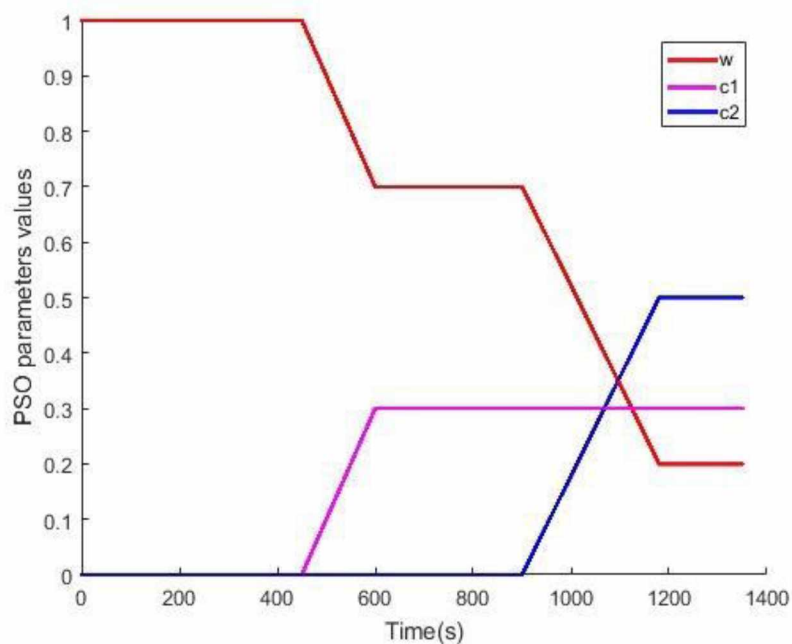
Σχήμα 5.1: Ψευδοκώδικας αλγορίθμου βελτιστοποίησης

Τα σενάρια κίνησης που προσομοιώθηκαν αντιστοιχούν σε διαφορετικά σημεία εισόδου των μη επανδρωμένων αεροσκαφών στο χώρο του σεναρίου καταστροφής. Συγκεκριμένα, τα σημεία εκκίνησης που ορίστηκαν είναι: α)  $(x, y) = (0, 0)$ , β)  $(x, y) = (0, 4000)$ , γ)  $(x, y) = (4000, 0)$ , δ)  $(x, y) = (4000, 4000)$  και ε) ομοιόμορφη κατανομή στο χώρο του σεναρίου καταστροφής. Στο Σχήμα 5.2 ορίζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.

Οι παράγοντες της αδράνειας  $w$ , του τοπικού βέλτιστου  $c_1$  και του ολικού βέλτιστου  $c_2$  μπορούν να πάρουν διακριτές τιμές στο εύρος  $[0, 1]$ , καθώς όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.3 το άθροισμά τους κάθε χρονική στιγμή πρέπει να ισούται με 1. Ανάλογα με τις τιμές που λαμβάνουν οι παράγοντες κάθε φορά, η συμπεριφορά του δικτύου μη επανδρωμένων αεροσκαφών αλλάζει. Η αρχική τιμή του αδρανειακού βάρους ισούται με 1, που είναι και η μέγιστη τιμή του, και η τελική του προκύπτει από την αφαίρεση των παραγόντων του τοπικού και ολικού βέλτιστου από το 1. Στο Σχήμα 5.3 απεικονίζεται η μεταβολή των τιμών των παραπάνω παραγόντων με το χρόνο. Οι τελικές τιμές είναι αυτές που επηρεάζουν και τη συμπεριφορά του δικτύου.

<b>Αριθμός UAVs</b>	6
<b>Συνολικός Αριθμός Ανθρώπων</b>	200
<b>Αριθμός ομάδων ανθρώπων (clusters)</b>	3
<b>Ομάδα 1</b>	# ανθρώπων = 100
	$(x_{1,1}, y_{1,1}) = (200, 200)$
	$(x_{1,2}, y_{1,2}) = (700, 3200)$
<b>Ομάδα 2</b>	# ανθρώπων = 60
	$(x_{1,1}, y_{1,1}) = (1500, 200)$
	$(x_{1,2}, y_{1,2}) = (2500, 700)$
<b>Ομάδα 3</b>	# ανθρώπων = 40
	$(x_{1,1}, y_{1,1}) = (2000, 2000)$
	$(x_{1,2}, y_{1,2}) = (2700, 2700)$
<b>Διαστάσεις Χώρου Σεναρίου</b>	$(x_{max}, y_{max}) = (4000, 4000)$
<b>Χρόνος Προσομοίωσης</b>	1350 s
<b>Αριθμός Σημείων Εκκίνησης</b>	5
<b>Αριθμός συνδυασμών παραμέτρων <math>w, c_1, c_2</math></b>	18

Σχήμα 5.2: Πίνακας παραμέτρων προσομοίωσης



Σχήμα 5.3: Απεικόνιση μεταβολής των παραμέτρων της βελτιστοποίησης με το χρόνο

Για να αξιολογηθεί η επίδραση των παραγόντων του αδρανειακού βάρους, του τοπικού βέλτιστου και του ολικού βέλτιστου στη συμπεριφορά των UAVs, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για διαφορετικούς συνδυασμούς τιμών των παραπάνω παραμέτρων. Οι συνδυασμοί αυτοί απεικονίζονται στο Σχήμα 5.4. Ειδικές περιπτώσεις των συνδυασμών αποτελούν:

- Περίπτωση 8: Υπάρχει μόνο η παράμετρος του τοπικού βέλτιστου, δηλαδή ο γνωστικός όρος της ταχύτητας και το σωματίδιο κινείται έχοντας ως γνώμονα μόνο τις προσωπικές του πληροφορίες.
- Περίπτωση 12: Οι όροι της αδράνειας και του τοπικού βέλτιστου είναι ίσοι με το μηδέν. Το σωματίδιο κινείται προς τη βέλτιστη λύση του σμήνους χωρίς να λαμβάνει υπόψιν τις δικές του γνώσεις.

Να σημειωθεί ότι για κάθε συνδυασμό παραμέτρων πραγματοποιήθηκαν 20 προσομοιώσεις και συγκεκριμένα 4 για κάθε σημείο εκκίνησης. Έπειτα από μία ολοκληρωμένη προσομοίωση 20 επαναλήψεων για ένα ορισμένο συνδυασμό τιμών, ορίζονταν νέες τιμές στις παραμέτρους σύμφωνα με το Σχήμα 5.4 και πραγματοποιούνταν μία νέα προσομοίωση.

Περίπτωση	Αδράνεια (Inertia)	Τοπικό βέλτιστο (Local Best)	Ολικό βέλτιστο (Local Best)
1	0,6	0,2	0,2
2	0,4	0,3	0,3
3	0,2	0,4	0,4
4	0	0,5	0,5
5	0,75	0,25	0
6	0,5	0,5	0
7	0,25	0,75	0
8	0	1	0
9	0,75	0	0,25
10	0,5	0	0,5
11	0,25	0	0,75
12	0	0	1
13	0,4	0,2	0,4
14	0,2	0,2	0,6
15	0	0,2	0,8
16	0,4	0,4	0,2
17	0,2	0,6	0,2
18	0	0,2	0,8

Σχήμα 5.4: Συνδυασμοί των παραμέτρων του αδρανειακού βάρους, του τοπικού βέλτιστου και του τοπικού ελάχιστου

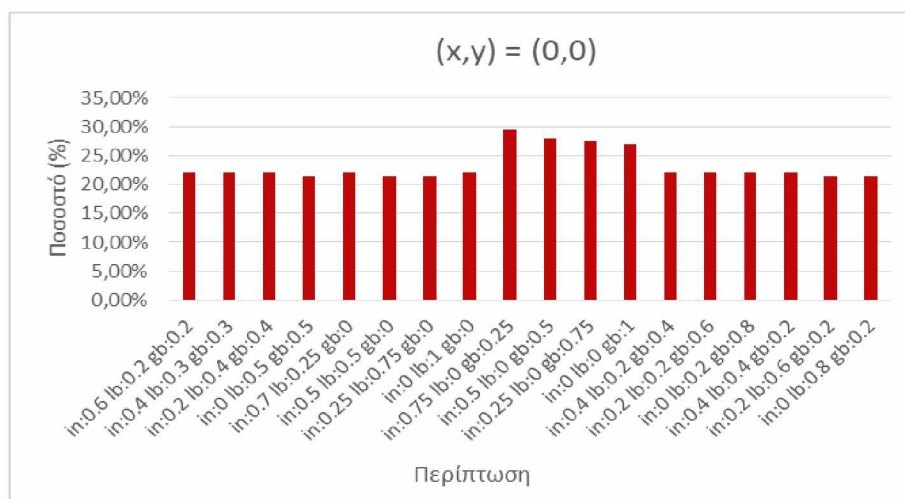


### 5.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

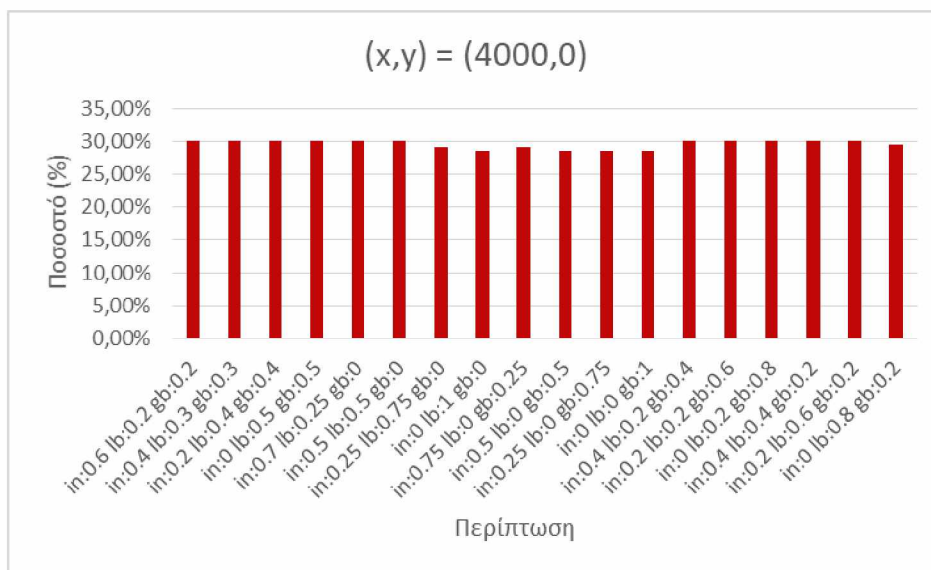
Προκειμένου να πραγματοποιηθούν συγκρίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων, έτσι ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων και σημείου εκκίνησης, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τεσσάρων επαναλήψεων ανά σενάριο έναρξης του αλγορίθμου και για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων. Επομένως, στα διαγράμματα θα απεικονίζονται οι αντίστοιχοι μέσοι όροι.

Στα Σχήματα 5.5 έως 5.9 απεικονίζεται το ποσοστό των ανθρώπων που έχουν εντοπιστεί από τα UAVs για κάθε ένα από τα σημεία εκκίνησης του αλγορίθμου και κατά συνέπεια του δικτύου μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Μπορεί κανείς εύκολα να παρατηρήσει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό ανθρώπων που έχει εντοπιστεί αντιστοιχεί στο 30% του συνολικού αριθμού, που ισούται με 60 ανθρώπους. Αυτό συμβαίνει διότι τα UAVs συγκλίνουν στην ομάδα στην οποία μεγαλύτερος αριθμός θυμάτων βρίσκεται μέσα στην εμβέλεια της ακτίνας τους. Η ομάδα που αντιστοιχεί σε αυτές τις προϋποθέσεις είναι η 2 (Σχήμα 5.2), καθώς, παρόλο που ο αριθμός των ανθρώπων είναι μικρότερος σε σχέση με την ομάδα 1, αυτοί είναι συγκεντρωμένοι σε μικρότερο χώρο, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.1.

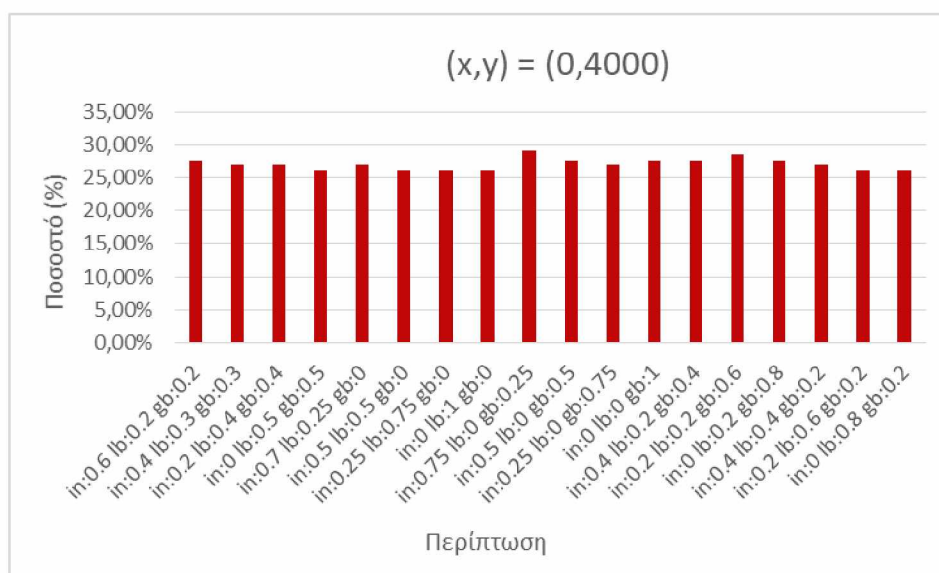
Επιπλέον, ο συνδυασμός των παραμέτρων της αδράνειας, του τοπικού βέλτιστου και του ολικού βέλτιστου που μεγιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, δηλαδή τον αριθμό των εντοπισμένων ανθρώπων, είναι η Περίπτωση 9 με  $w = 0.75$ ,  $c_1 = 0$  και  $c_2 = 0.25$ . Ο συνδυασμός αυτός αντιστοιχεί στην περίπτωση του κοινωνικού μόνο μοντέλου (social - only model) του αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, στην οποία τα σωματίδια δεν ελκύνονται από τις βέλτιστες, προσωπικές τους θέσεις τους και έχουν την τάση να ακολουθούν μόνο τη βέλτιστη λύση του σμήνους, που είναι και η συνολική. Σύμφωνα με μελέτες [25], το μοντέλο αυτό είναι πιο αποδοτικό και συγκλίνει ταχύτερα σε σχέση με τον ολοκληρωμένο αλγόριθμο, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας.



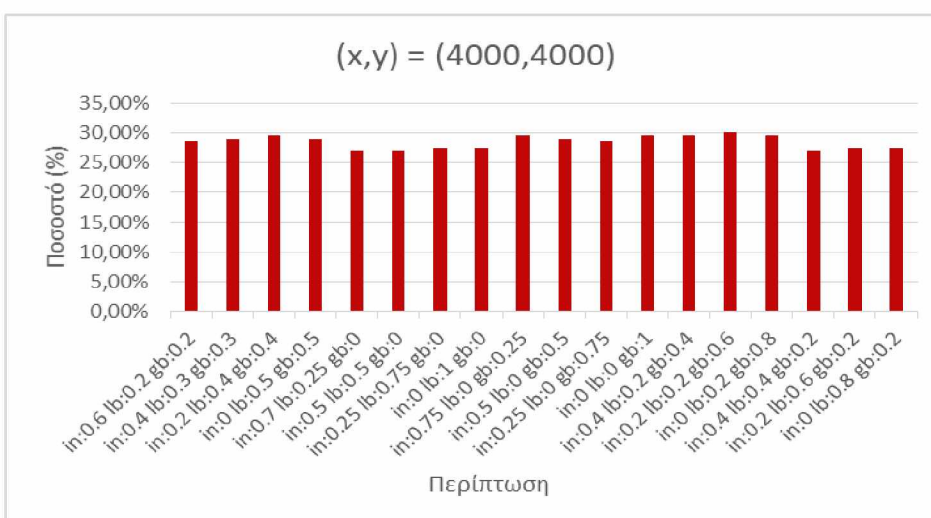
Σχήμα 5.5: Ποσοστό εντοπισμένων ανθρώπων για  $(x,y) = (0,0)$



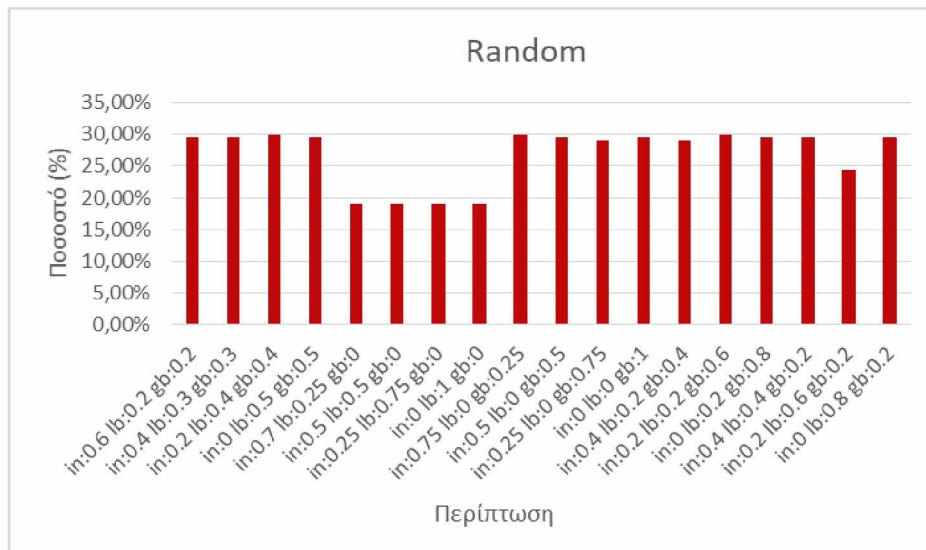
Σχήμα 5.6: Ποσοστό εντοπισμένων ανθρώπων για  $(x,y) = (4000,0)$



Σχήμα 5.7: Ποσοστό εντοπισμένων ανθρώπων για  $(x,y) = (0,4000)$



Σχήμα 5.8: Ποσοστό εντοπισμένων ανθρώπων για  $(x,y) = (4000,4000)$



Σχήμα 5.9: Ποσοστό εντοπισμένων ανθρώπων για τυχαία, ομοιόμορφη κατανομή στο χώρο

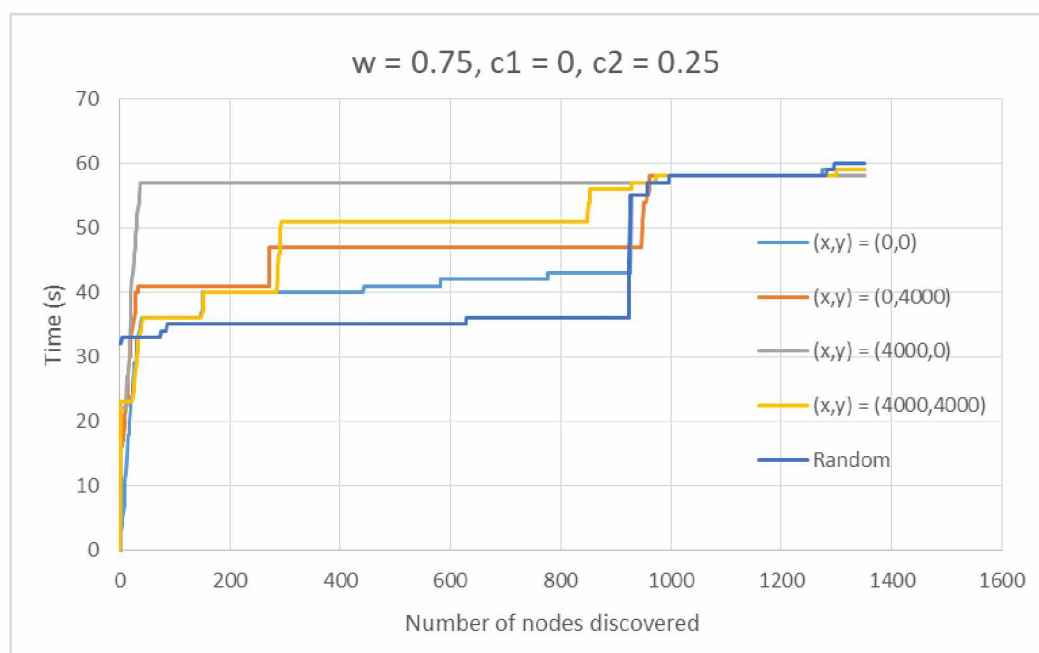
Στους συνδυασμούς παραμέτρων στους οποίους ο παράγοντας του ολικού βέλτιστου ισούται με μηδέν, παρατηρείται ότι η αντικειμενική συνάρτηση έχει τις χαμηλότερες τιμές, και κυρίως στην περίπτωση της τυχαίας κατανομής στο χώρο. Οι συνδυασμοί αυτοί είναι:

- Περίπτωση 5:  $w = 0.75$ ,  $c_1 = 0.25$  και  $c_2 = 0$
- Περίπτωση 6:  $w = 0.5$ ,  $c_1 = 0.5$  και  $c_2 = 0$
- Περίπτωση 7:  $w = 0.25$ ,  $c_1 = 0.75$  και  $c_2 = 0$
- Περίπτωση 8:  $w = 0$ ,  $c_1 = 1$  και  $c_2 = 0$

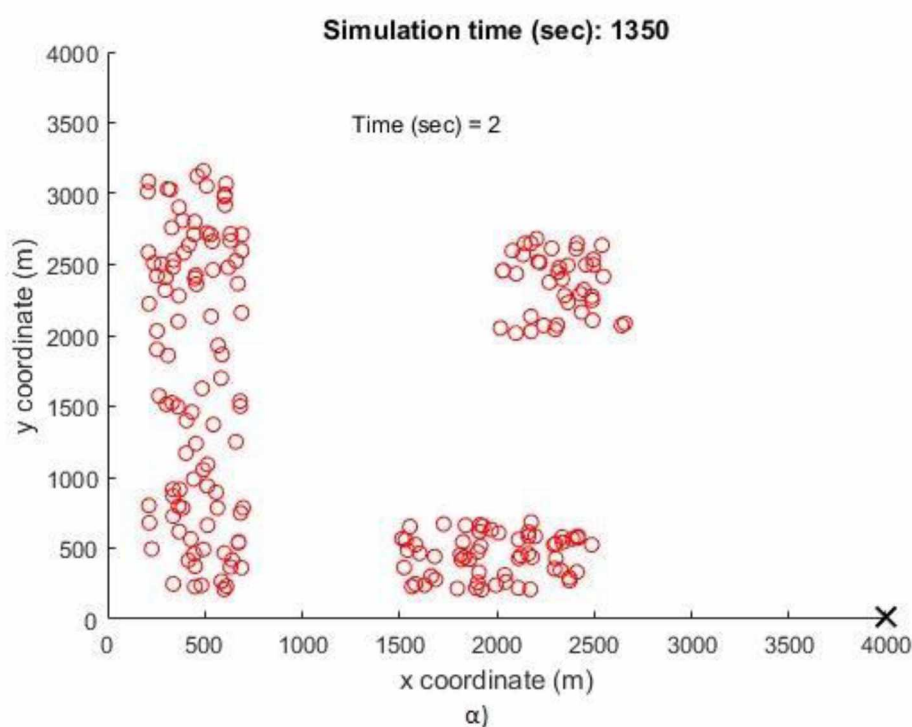
Οι συνδυασμοί αυτοί εμπίπτουν στην κατηγορία του γνωστικού μόνο μοντέλου (cognitive - only model) του αλγορίθμου της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, σύμφωνα με το οποίο τα σωματίδια παρουσιάζουν νοσταλγική συμπεριφορά και τείνουν να επιστρέφουν στις προσωπικές, βέλτιστες λύσεις τους. Το μοντέλο αυτό χρειάζεται μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων, έτσι ώστε να συγκλίνει στη βέλτιστη λύση, καθώς τα σωματίδια τείνουν να εξερευνούν μόνο το χώρο γύρω από την αρχική τους θέση [25].

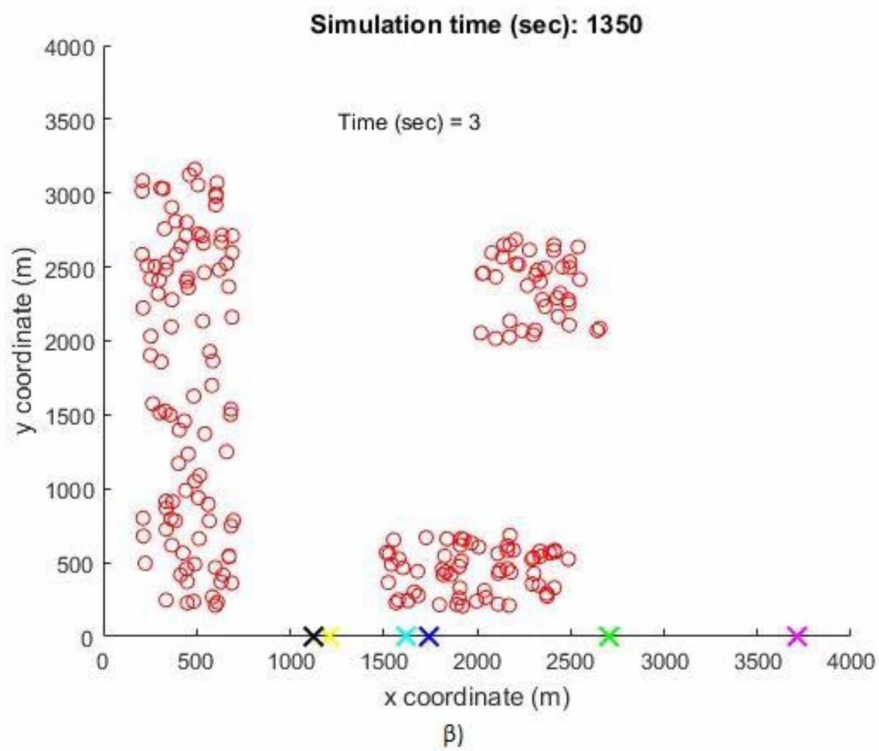
Στο Σχήμα 5.10 απεικονίζεται ο αριθμός των ανθρώπων που εντοπίζονται σε κάθε σενάριο έναρξης του αλγορίθμου και για τον ίδιο συνδυασμό παραμέτρων σε σχέση με το χρόνο. Οι παράμετροι είναι αυτές που για κάθε σενάριο οδηγούν στη μεγαλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή  $w = 0.75$ ,  $c_1 = 0$  και  $c_2 = 0.25$ . Μπορεί κανείς εύκολα να παρατηρήσει ότι για  $(x, y) = (4000, 0)$ , ο αλγόριθμος συγκλίνει πολύ γρήγορα στη μέγιστη τιμή ενώ στην περίπτωση της

τυχαίας κατανομής ο αλγόριθμος χρειάζεται τον περισσότερο χρόνο για να συγκλίνει. Η ταχύτερη σύγκλιση στο σενάριο  $(x, y) = (4000, 0)$  οφείλεται στο γεγονός ότι η ομάδα 2, στην οποία συγκλίνουν τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, είναι η πρώτη που συναντούν τα UAVs κατά την είσοδο τους στο χώρο του σεναρίου καταστροφής στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.11. Στα Σχήματα 5.12 έως 5.18 απεικονίζονται διαφορετικά στιγμιότυπα της κινητικότητας του δικτύου των μη επανδρωμένων αεροσκαφών.

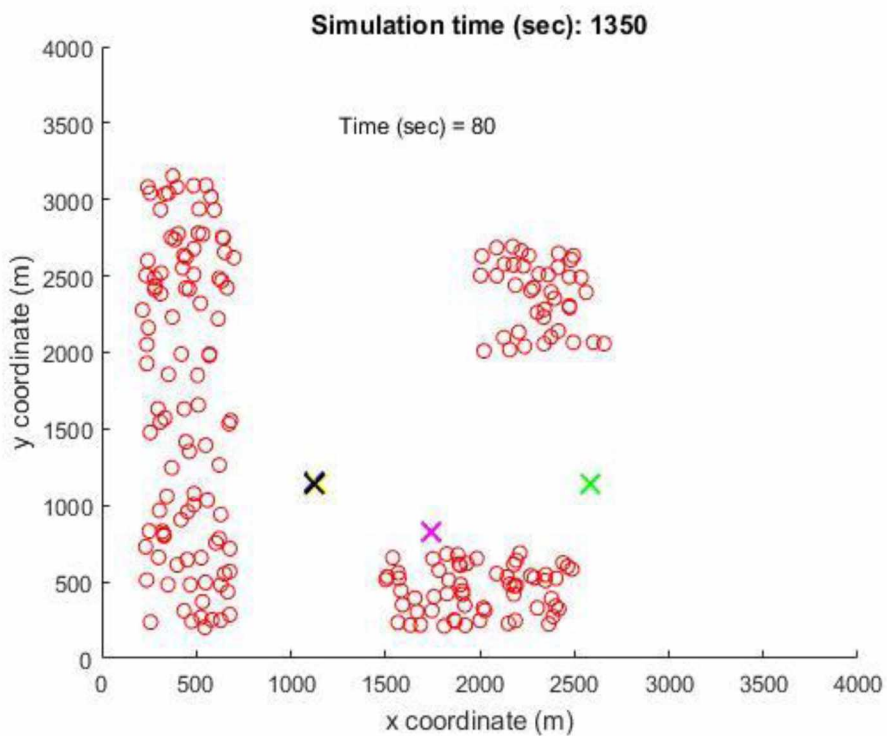


Σχήμα 5.10: Μεταβολή αριθμού εντοπισμένων ανθρώπων με το χρόνο για  $w = 0.75, c_1 = 0$  και  $c_2 = 0.25$ .

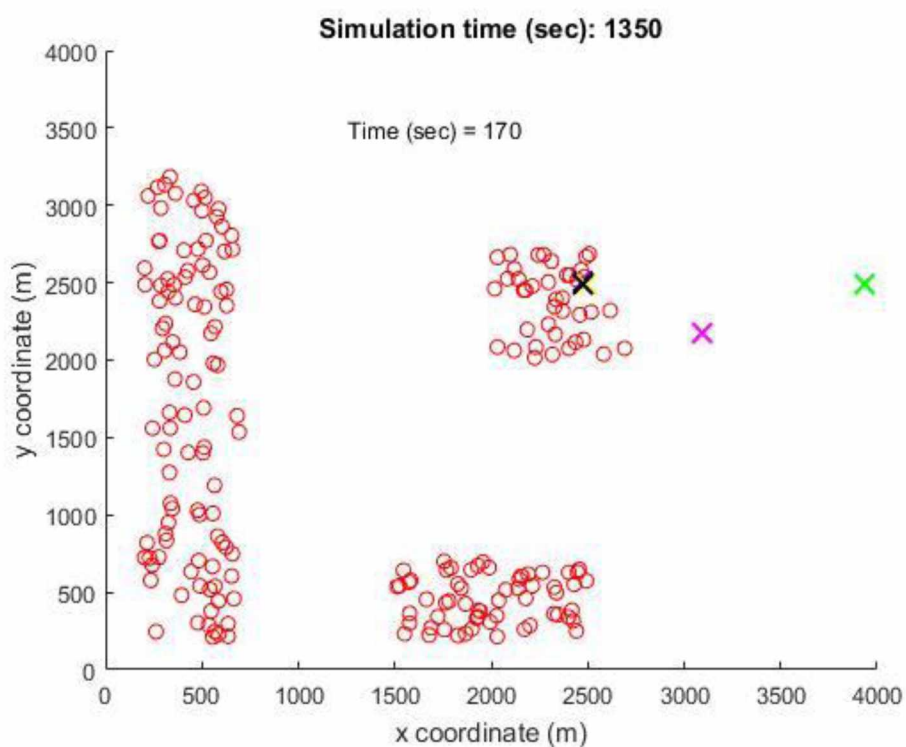




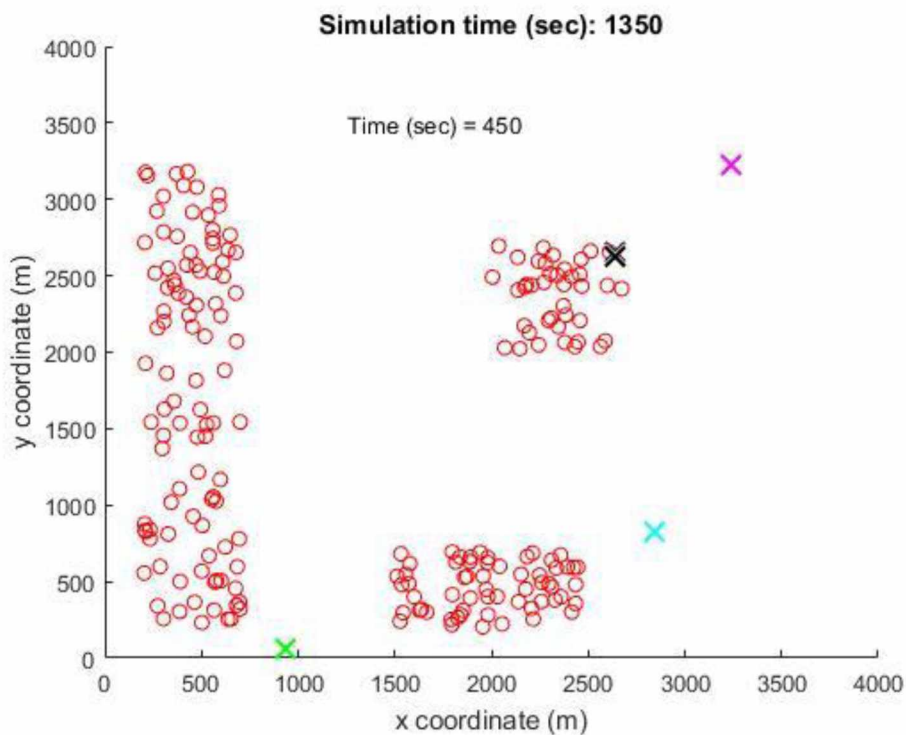
Σχήμα 5.11: Απεικόνιση εισόδου των UAVs από το σημείο  $(x,y) = (4000,0)$



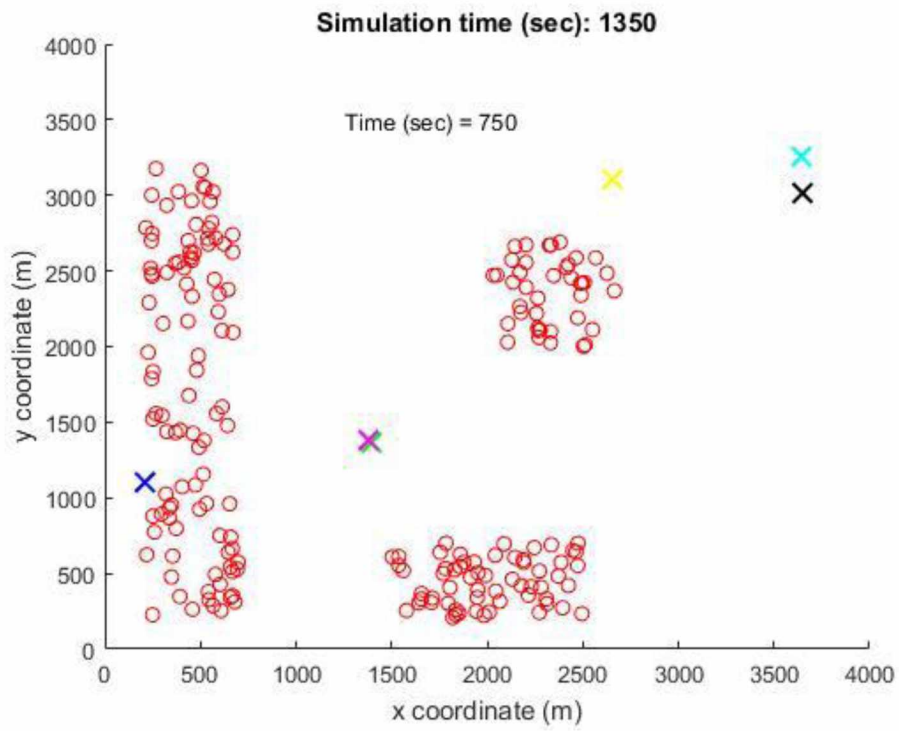
Σχήμα 5.12: Απεικόνιση τη χρονική στιγμή  $t = 80$  s.



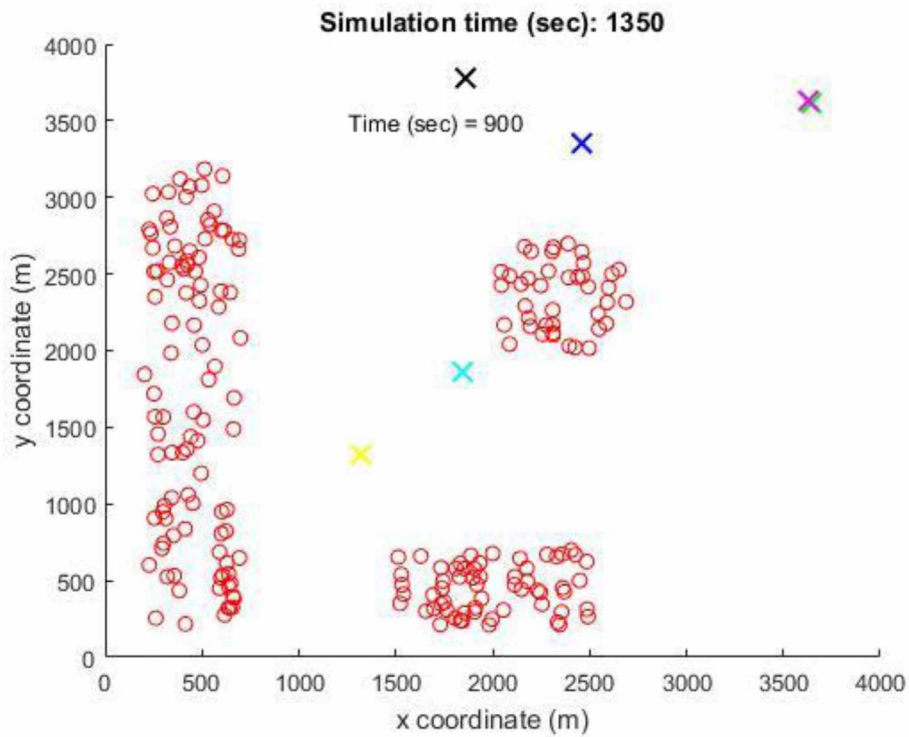
Σχήμα 5.13: Απεικόνιση τη χρονική στιγμή  $t = 170$  s.



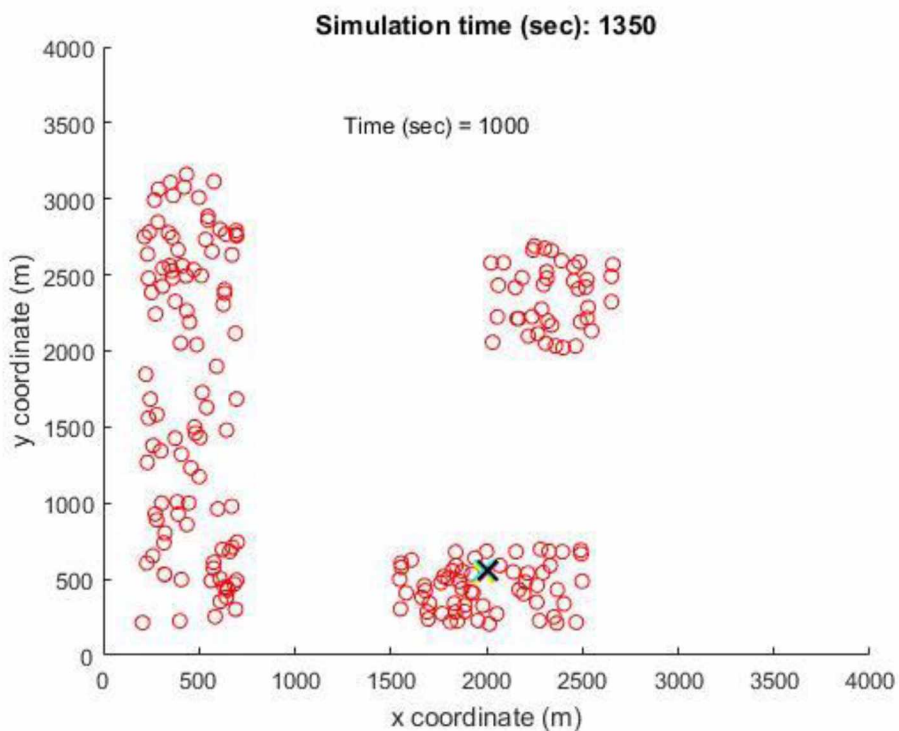
Σχήμα 5.14: Απεικόνιση τη χρονική στιγμή  $t = 450$  s.



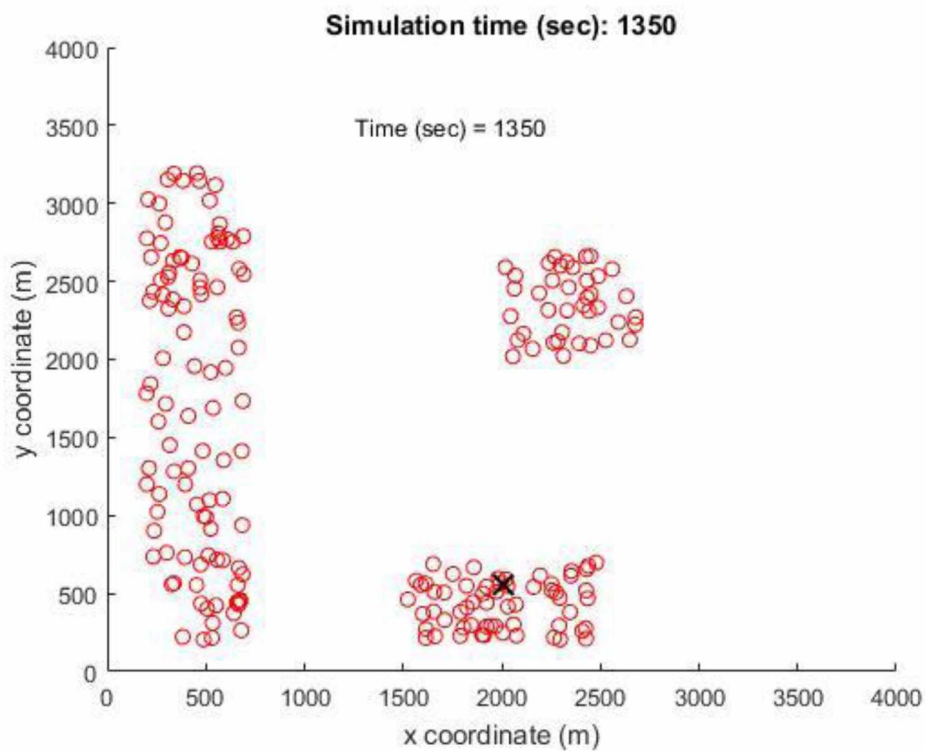
Σχήμα 5.15: Απεικόνιση τη χρονική στιγμή  $t = 750$  s.



Σχήμα 5.16: Απεικόνιση τη χρονική στιγμή  $t = 900$  s.



Σχήμα 5.17: Απεικόνιση τη χρονική στιγμή  $t = 1000$  s.



Σχήμα 5.18: Απεικόνιση τη χρονική στιγμή  $t = 1350$  s.



## 5.4 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις του τροποποιημένου αλγόριθμου της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, αφού πρώτα ορίστηκαν οι παράμετροι που το χαρακτηρίζουν. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ των διαφορετικών σεναρίων κίνησης που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς συνδυασμούς των παραμέτρων της εξίσωσης της ταχύτητας και σε διαφορετικά σημεία εισόδου στο χώρο αναζήτησης.



## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – Προτάσεις

### 6.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα

Οι επιθυμητοί στόχοι ήταν η ανάπτυξη διαδρομών από το δίκτυο μη επανδρωμένων αεροσκαφών προκειμένου αυτά να εξερευνήσουν το χώρο του σεναρίου καταστροφών, και στη συνέχεια να συγκλίνουν στις ομάδες των ανθρώπων που εντοπίστηκαν κατά τη φάση εξερεύνησης.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προκύπτει ότι οι παραπάνω στόχοι επιτεύχθηκαν, καθώς τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη συνέκλιναν στην ομάδα που εντόπισαν κατά τη διάρκεια της εξερευνητικής φάσης με το μεγαλύτερο αριθμό ανθρώπων στο εύρος της εμβέλειάς τους. Δηλαδή με βάση τον αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε βρέθηκε η βέλτιστη λύση. Παρόλα αυτά, το ποσοστό των ανθρώπων που εντοπίστηκαν παραμένει μικρό σε σχέση με το συνολικό αριθμό ανθρώπων.

### 6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Όσον αφορά τη θεωρητική μελέτη και προσομοίωση του θέματος που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος Τοπικής Βέλτιστης λύσης της μεθόδου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, στον οποίο τα UAVs οργανώνονται σε γειτονιές. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται εξερεύνηση μεγαλύτερου μέρους του χώρου αναζήτησης και τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη θα συνέκλιναν σε περισσότερες από μία ομάδες. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα τον εντοπισμό μεγαλύτερου αριθμού ανθρώπων.

Επιπλέον, θα μπορούσε να προσομοιωθεί ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο του χώρου του σεναρίου καταστροφής. Η προσέγγιση αυτή αυξάνει την υπολογιστική πολυπλοκότητα του προβλήματος αλλά προσομοιάζει περισσότερο τις πραγματικές συνθήκες. Χρήσιμη θα ήταν, επίσης, η σύγκριση της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε με κάποια άλλη μέθοδο της Υπολογιστικής Νοημοσύνης, όπως είναι η μέθοδος του Τεχνητού Ανοσοποιητικού Συστήματος (Artificial Immune System) [26] και οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms).

Εξίσου σημαντική είναι, όμως, και η πρακτική εφαρμογή του μοντέλου, καθώς με τον τρόπο αυτό θα επιβεβαιωθεί η προσομοίωση και θα εντοπιστούν τα μειονεκτήματα της.



---

## Βιβλιογραφία

- [1] J. Sanchez-Garcva, J. Garcva-Campos, S. Toral, D.G. Reina, F. Barrero (2016) An intelligent strategy for tactical movements of UAVs in disaster scenarios, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12 (3), 20 pages.
- [2] S. Hayat, E. Yanmaz, R. Muzaffar (2016) Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18 (4), 2624 -2661.
- [3] Andries P. Engelbrecht, *Computational Intelligence - An Introduction*, 2<sup>nd</sup> Edition, Wiley & Sons, England, 2007.
- [4] Aschenbruck N., Gerhards - Padilla E., Martini P. (2009) Modeling mobility in disaster area scenarios, *Performance Evaluation*, 66 (12), 773 - 790.
- [5] Conceição L., Curado M. (2013) Modelling mobility based on human behavior in disaster areas. In *Proceedings of Wired/Wireless Internet Communication: 11th International Conference, WWIC 2013*, St. Petersburg, Russia, June 5 -7, 2013. Vol. 7889 of Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, 56 - 59.
- [6] S. Pomportes, J. Tomasik, and V. V`eque (2010) Ad hoc network in a disaster area: a composite mobility model and its evaluation. In *Proceedings of the International Conference on Advanced Technologies for Communications*, IEEE, Ho Chi Minh City, Vietnam, October 2010, 17 - 22.
- [7] Munjal A., Camp T., Aschenbruck N. (2012) Changing Trends in Modeling Mobility, *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 1 - 16.
- [8] Aschenbruck N., Munjal A., Camp T. (2011) Trace-based mobility modeling for multi - hop wireless networks, *Computer Communications*, 34 (6), 704 -714.
- [9] Chen J., Tang Y., Hu C., Wang G. (2013) Characterizing Pairwise Social Relationships Quantitatively: Interest-Oriented Mobility Modeling for Human Contacts in Delay Tolerant Networks, *Journal of Applied Mathematics*, 1 - 15.
- [10] J.Sanchez-Garcva, D.G. Reina, S.L. Toral (2019) A distributed PSO-based exploration algorithm for a UAV network assisting a disaster scenario, *Future Generation Computer Systems*, 90, 129 - 148.
- [11] Sarimveis H., A. Alexandridis, S. Mazarakis, G. Bafas (2004) A new algorithm for developing dynamic radial basis function neural network models based on genetic algorithms, *Computers and Chemical Engineering*, 28, 209-217.
- [12] Alexandridis A., E. Paizis, E. Chondrodima, M. Stogiannos (2017) A particle swarm optimization approach in printed circuit board thermal design, *Integrated Computer-Aided Engineering*, 24(2), 143-155.
- [13] Alexandridis A., E. Chondrodima, H. Sarimveis (2016) Cooperative learning for radial basis function networks using particle swarm optimization, *Applied Soft Computing*, 49, 485-497.

- 
- [14] S. Hauert, S. Leven, J.C. Zufferey, D. Floreano (2010) Communication-based swarming for flying robots. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Workshop on Network Science and Systems Issues in Multi-Robot Autonomy*, Anchorage, Alaska, USA, 2010.
- [15] K.A. Ghamry, M.A. Kamel, Y. Zhang (2017) Multiple UAVs in forest fire fighting mission using particle swarm optimization. In *Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Miami, FL, USA, 2017.
- [16] Weng L., Liu Q., Xia M., Song Y. D. (2014) Immune network-based swarm intelligence and its application to unmanned aerial vehicle (UAV) swarm coordination, *Neurocomputing*, 125, 134 - 141.
- [17] Swarm Intelligence [<https://en.wikipedia.org/>, ανακτήθηκε 30/12/2019]
- [18] Saka M. P., Doğan E. & Aydogdu I. (2013) Analysis of Swarm Intelligence - Based Algorithms for Constrained Optimization, *Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation*, 25 - 48.
- [19] Bajer D. & Zorić B. (2019) An effective refined artificial bee colony algorithm for numerical optimization, *Information Sciences*, 504, 221 – 275.
- [20] Ljouad T., Amine A. & Rziza M. (2016) Mobile object tracking using the modified cuckoo search, *Bio-Inspired Computation and Applications in Image Processing*, 105 – 130.
- [21] J. Kennedy, R. Eberhart (1995) Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95 - IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, Australia, 1995.
- [22] A. Pramanik, B. Choudhury, T.S. Choudhury, W. Arif, J. Mehedi (2015) Simulative study of random waypoint mobility model for mobile ad hoc networks. In *Proceedings of Global Conference on Communication Technologies (GCCT)*, Thuckalay, India, 2015.
- [23] C. Bettstetter, G. Resta, P. Santi (2003) The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2 (3), 257 - 269.
- [24] Reina D. G., Tawfik H. & Toral S. L. (2018). Multi-subpopulation evolutionary algorithms for coverage deployment of UAV-networks, *Ad Hoc Networks*, 68, 16 - 32.
- [25] J. Kennedy (1997) The Particle Swarm: Social Adaptation of Knowledge. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 303 - 308.
- [26] Stogiannos M., A. Alexandridis, H. Sarimveis (2020) An enhanced decentralized artificial immune-based strategy formulation algorithm for swarms of autonomous vehicles, *Applied Soft Computing*, 89, 106 - 135.