

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών
www.eee.uniwa.gr

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226



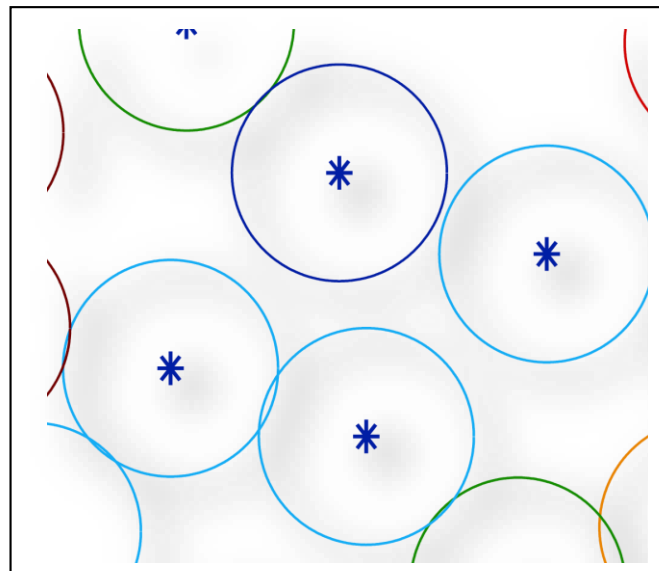
UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics Engineering
www.eee.uniwa.gr
250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece
Tel:+30 210 538-1225, Fax:+30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας

Master of Science By Research in
Electrical & Electronics Engineering

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

Ανάπτυξη σχημάτων βελτιστοποίησης για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων



Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Κωνσταντίνος Ταρνάρης, AM 0035

Επιβλέπων Διονύσης Κανδρής, Καθηγητής

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών
www.eee.uniwa.gr

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226



UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics Engineering
www.eee.uniwa.gr

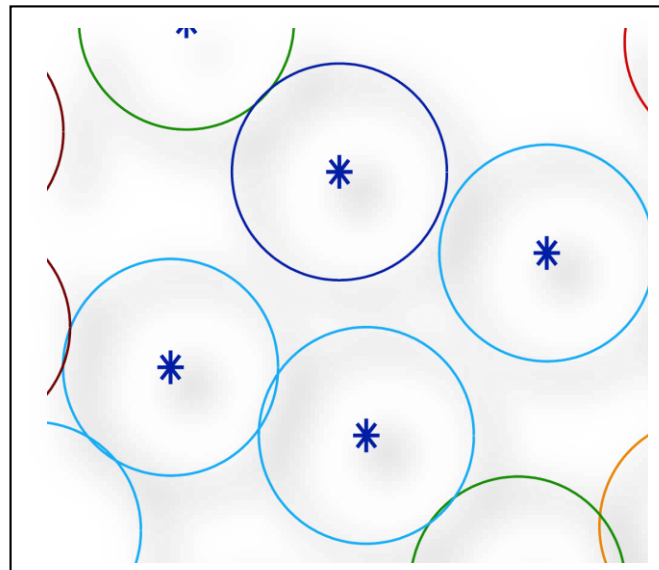
250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece
Tel:+30 210 538-1225, Fax:+30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας

Master of Science By Research in
Electrical & Electronics Engineering

MSc Thesis

Development of optimization schemes for Wireless Sensor Networks



Student: Konstantinos Tarnaris, Registration Number 0035

MSc Thesis Supervisor: Dionisis Kandris, Professor

Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή, εξετάστηκε και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων	Μέλος	Μέλος
		
Διονύσης Κανδρής	Αλέξανδρος Αλεξανδρίδης	Γεώργιος Χλούπης
Καθηγητής	Καθηγητής	Αναπληρωτής Καθηγητής

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κωνσταντίνος Ταρνάρης του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου MSCRES-35 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ηλεκτρικές και Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας» του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Τέλος, βεβαιώνω ότι η εργασία αυτή δεν έχει κατατεθεί στο πλαίσιο των απαιτήσεων για τη λήψη άλλου τίτλου σπουδών ή επαγγελματικής πιστοποίησης πλην του παρόντος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Κωνσταντίνος Ταρνάρης

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Κωνσταντίνος Ταρνάρης,

Φεβρουάριος 2022

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον/την συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος μέλους ΔΕΠ, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (ΑΔΑ) έχουν προσελκύσει τεράστιο ερευνητικό ενδιαφέρον. Ένα σημαντικό αντικείμενο της έρευνας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι το πρόβλημα κάλυψης. Πρόκειται για το πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης διάταξης με την οποία πρέπει να τοποθετηθούν οι αισθητήριοι κόμβοι σε ένα δίκτυο, οι οποίοι έχουν δεδομένη εμβέλεια ανίχνευσης, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το ποσοστό της περιοχής που καλύπτεται από αυτούς. Αντίστοιχα, το πρόβλημα της κ-κάλυψης αφορά τη διασφάλιση ότι μια περιοχή ενδιαφέροντος θα ανιχνεύεται πάντα ταυτόχρονα από τουλάχιστον κ αισθητήριους κόμβους.

Σκοπός αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής είναι η μελέτη υφιστάμενων μεθοδολογιών και η ανάπτυξη νέων μεθοδολογιών αυτού του είδους που αποσκοπούν στη μεγιστοποίηση της κάλυψης και της πολλαπλής κάλυψης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, βελτιστοποιώντας την τοποθέτηση των αισθητήριων κόμβων στον χώρο.

Ειδικότερα, αρχικά πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή αφενός μεν στο σχετικό θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά στην κάλυψη και την κ-κάλυψη στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, αφετέρου δε σε μεθόδους της υπολογιστικής νοημοσύνης και ειδικότερα στους εξελικτικούς αλγορίθμους και στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την ερευνητική εργασία για την ανάπτυξη καινοτόμων σχημάτων βελτιστοποίησης της κάλυψης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Στη συνέχεια, διερευνήθηκε η εύρεση λύσης στα συγκεκριμένα προβλήματα με χρήση γενετικών αλγορίθμων (genetic algorithms, GA), και του αλγόριθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization, PSO) που αποτελεί κατηγορία των αλγορίθμων που βασίζονται στην ευφυΐα σμήνους και μιμείται τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν σμήνη πτηνών ως προς την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής που θα ακολουθήσουν.

Μέσω μίας σειράς πειραμάτων κλιμακούμενης δυσκολίας, αξιολογήθηκε η απόδοση των σχημάτων ελέγχου που αναπτύχθηκαν. Ειδικότερα, στα αρχικά πειράματα διακριβώθηκε η δυνατότητα να επιτευχθεί η μεγιστοποίηση της κάλυψης του χώρου και στα επόμενα, διερευνήθηκε και η δυνατότητα των σχημάτων ελέγχου να επιτύχουν επιπρόσθετα και κ-κάλυψη. Τέλος, η απόδοση των σχημάτων ελέγχου που αναπτύχθηκαν συγκρίθηκε με αυτήν δύο δημοφιλών αλγορίθμων αυτού του είδους.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ: Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, Γενετικοί Αλγόριθμοι, Κάλυψη, κ-Κάλυψη, Υπολογιστική Νοημοσύνη

ABSTRACT

Wireless sensor networks (WSNs) have attracted enormous research interest. The coverage problem is an important subject of research in WSNs. This is the problem of finding the optimal arrangement with which the sensor nodes must be placed in a network, which have a given detection range, in order to maximize the percentage of the area covered by them. Accordingly, the problem of k-coverage is to ensure that an area of interest is always detected simultaneously by at least k sensor nodes.

The purpose of this master's thesis is the study of existing methodologies and the development of new methodologies of this kind that aim to maximize coverage and multiple coverage in wireless sensor networks, optimizing the placement of the sensor nodes existing within the network field.

In particular, at first the relevant theoretical background on both coverage and k-coverage in WSNs and specific methods of computational intelligence used in this thesis was established.

Next, the solution to the specific problems was investigated using genetic algorithms (GA), and the particle swarm optimization (PSO) algorithm.

Through a series of scalable experiments, the performance of the control schemes developed was evaluated. In particular, in the initial experiments the possibility of achieving the maximization of the coverage of the space was verified and in the subsequent ones, the possibility of the control schemes to achieve additional and k-coverage was investigated. Finally, the performance of the control schemes developed was compared with that of two popular algorithms of this kind.

KEYWORDS: Computational Intelligence, Coverage, Genetic Algorithms, k-Coverage, Particle Swarm Optimization Algorithm, Wireless Sensor Networks

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, καθηγητή κ. Διονύσιο Κανδρή, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τον καθηγητή κ. Αλέξανδρο Αλεξανδρίδη και τη συμφοιτήτριά μου κ. Ιωάννα Πρέκα για την επικοινωνιακή ερευνητική συνεργασία που είχα μαζί τους. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την εμπιστοσύνη και την υποστήριξή που μου έδειξαν.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT.....	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	10
1.1. Εισαγωγή	10
1.2. Αισθητήριος κόμβος – Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων	10
1.3. Κάλυψη και κ-κάλυψη	11
1.4. Αισθητήρια μοντέλα.....	11
1.4.1. Δυναμικό μοντέλο αίσθησης	12
1.4.2. Πιθανοτικό μοντέλο αίσθησης	12
1.5. Στρατηγικές τοποθέτησης των κόμβων.....	13
1.5.1. Τοποθέτηση στατικών κόμβων	13
1.5.2. Τοποθέτηση κινητών κόμβων	13
1.6. Κάλυψη (Coverage)	13
1.6.1. Τύποι κάλυψης.....	14
1.6.2. Προβλήματα κάλυψης	15
1.6.3. Κριτήρια αξιολόγησης των αλγορίθμων κάλυψης.....	16
1.7. Τεχνικές για τη διατήρηση και ενίσχυση της κάλυψης.....	17
1.8. Μεθοδολογίες βελτιστοποίησης της κάλυψης σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	18
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ.....	22
2.1. Εισαγωγή	22
2.2. Εισαγωγή στην υπολογιστική νοημοσύνη	22
2.3. Γενικός εξελικτικός αλγόριθμος	22
2.4. Γενετικοί αλγόριθμοι (GAs)	23
2.5. Υπολογιστική ευφυΐα σμήνους – (Computational swarm intelligence)	25
2.6. Αλγόριθμος PSO	26
3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ	28
3.1. Εισαγωγή	28
3.2. Εισαγωγικές Θεωρήσεις	28
3.3. Κωδικοποίηση της πληροφορίας	29
3.4. Συνάρτηση καταλληλότητας	30
3.5. Πειράματα προσομοίωσης και αποτελέσματα.....	33
3.5.1. Πείραμα 1.....	36

3.5.2.	Πείραμα 2.....	38
3.5.3.	Πείραμα 3.....	41
3.5.4.	Πείραμα 4.....	43
3.5.5.	Πείραμα 5.....	46
3.5.6.	Πείραμα 6.....	46
3.5.7.	Πείραμα 7.....	47
4.	ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	48
4.1.	Εισαγωγή.....	48
4.2.	Σύνοψη.....	48
4.3.	Συμπεράσματα.....	48
4.4.	Προτάσεις εξέλιξης.....	50
5.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ.....	52

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1. Συμπεριφορά του αισθητήριου κόμβου για το δυαδικό και το πιθανοτικό μοντέλο	12
Εικόνα 2. Τύποι κάλυψης.....	15
Εικόνα 3. 3-κάλυψη σε σημείο	18
Εικόνα 4. Βασική δομή των γενετικών αλγορίθμων	24
Εικόνα 5. Βασική δομή του αλγορίθμου σμήνους σωματιδίων	27
Εικόνα 6. Συνάρτηση κ-κάλυψης	31
Εικόνα 7. Συνάρτηση Υπολογισμού Κάλυψης	32
Εικόνα 8. Διάγραμμα ροής της συνάρτησης καταλληλότητας	33
Εικόνα 9. Βέλτιστη θέση των κόμβων με την χρήση του GA αλγορίθμου για το πείραμα 1	37
Εικόνα 10. Μέσες και καλύτερες τιμές συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε γενιά του GA στο πείραμα 1	37
Εικόνα 11. Βέλτιστη θέση των κόμβων με την χρήση του PSO αλγορίθμου για το πείραμα 1	38
Εικόνα 12. Καλύτερες τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε επανάληψη του PSO στο πείραμα 1	38
Εικόνα 13. Βέλτιστη θέση των κόμβων με την χρήση του GA αλγορίθμου για το πείραμα 2	39
Εικόνα 14. Μέσες και καλύτερες τιμές συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε γενιά του GA στο πείραμα 2	40
Εικόνα 15. Βέλτιστη θέση των κόμβων με την χρήση του PSO αλγορίθμου για το πείραμα 2	40
Εικόνα 16. Καλύτερες τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε επανάληψη του PSO στο πείραμα 2	41
Εικόνα 17. Βέλτιστη θέση των κόμβων με την χρήση του GA αλγορίθμου για το πείραμα 3	42
Εικόνα 18. Μέσες και καλύτερες τιμές συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε γενιά του GA στο πείραμα 3	42
Εικόνα 19. Βέλτιστη θέση των κόμβων με την χρήση του PSO αλγορίθμου για το πείραμα 3	43
Εικόνα 20. Καλύτερες τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε επανάληψη του PSO στο πείραμα 3	43
Εικόνα 21. Βέλτιστη θέση των κόμβων με την χρήση του GA αλγορίθμου για το πείραμα 4	44
Εικόνα 22. Μέσες και καλύτερες τιμές συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε γενιά του GA στο πείραμα 4	45
Εικόνα 23. Βέλτιστη θέση των κόμβων με την χρήση του PSO αλγορίθμου για το πείραμα 4	45
Εικόνα 24. Καλύτερες τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε επανάληψη του PSO στο πείραμα 4	46

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Κωδικοποίηση της πληροφορίας του χρωμοσώματος.....	29
Πίνακας 2. Παράμετροι ελέγχου για τον αλγόριθμο GA.....	34
Πίνακας 3. Παράμετροι ελέγχου για τον αλγόριθμο PSO	35
Πίνακας 4. Αποτελέσματα προσομοιώσεων του πειράματος 1.....	36
Πίνακας 5. Αποτελέσματα προσομοιώσεων του πειράματος 2.....	39
Πίνακας 6. Αποτελέσματα προσομοιώσεων του πειράματος 3.....	41
Πίνακας 7. Αποτελέσματα προσομοιώσεων του πειράματος 4.....	44
Πίνακας 8. Αποτελέσματα προσομοιώσεων του πειράματος 5.....	46
Πίνακας 9. Αποτελέσματα προσομοιώσεων του πειράματος 6.....	47
Πίνακας 10. Αποτελέσματα προσομοιώσεων του πειράματος 7.....	47

1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1.1. Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό στοχεύει στο να εξοικειώσει τον αναγνώστη με τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, την απαίτηση για τη μεγιστοποίηση της κάλυψης και της κ-κάλυψης σε αυτά και τις μεθοδολογίες που έχουν προταθεί και εφαρμοστεί για την επίτευξη αυτών των απαιτήσεων.

1.2. Αισθητήριος κόμβος – Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων

Ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων (Wireless Sensor Network- WSN) είναι ένα σύνολο από ασύρματα διασυνδεδεμένους μεταξύ τους αισθητήριους κόμβους (sensor nodes), οι οποίοι έχουν δυνατότητες συλλογής, επεξεργασίας, μετάδοσης και λήψης δεδομένων [1]. Η ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών καθώς και των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS) έδωσε τη δυνατότητα να κατασκευαστούν με χαμηλό κόστος αισθητήριοι κόμβοι οι οποίοι παρά το μικρό μέγεθός τους, έχουν υψηλές δυνατότητες αίσθησης, επεξεργασίας και επικοινωνίας.

Γενικά, με τη χρήση των WSN είναι δυνατή η παρακολούθηση των υφιστάμενων συνθηκών σε εκτεταμένες περιοχές ενδιαφέροντος και για το λόγο αυτό έχουν διαρκώς αυξανόμενη χρησιμοποίηση σε αναρίθμητους τομείς των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων [2]. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών των WSN σχετίζονται, μεταξύ άλλων, με τη στρατιωτική τεχνολογία [3], το περιβάλλον [4], τη γεωργία και την κτηνοτροφία [5], την υγεία [6], τη βιομηχανία [7], τις συγκοινωνίες [8], την πολιτική προστασία [9], την ασφάλεια [10], το έξυπνο σπίτι [11], τις έξυπνες πόλεις [12] κλπ.

Σε ένα WSN οι αισθητήριοι κόμβοι μπορεί να είναι στατικοί ή/και κινητοί. Ένας στατικός αισθητήριος κόμβος δε δύναται να μετακινηθεί με ίδια μέσα αφότου τοποθετηθεί. Αντίθετα, ένας κινητός αισθητήριος κόμβος έχει όλες τις λειτουργίες ενός στατικού αισθητήριου κόμβου αλλά επίσης έχει και την ικανότητα να κινείται στον χώρο.

Δεδομένου ότι η κάλυψη και η συνδεσιμότητα είναι ζωτικής σημασίας σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, η αποσύνδεση ενός αισθητήριου κόμβου από το δίκτυο μπορεί να προκαλέσει κενό στην κάλυψη καθώς και πρόβλημα στην επικοινωνία του δικτύου. Χάρης στη δυνατότητα κίνησής τους, οι κινητοί αισθητήριοι κόμβοι, μπορούν να αποκαταστήσουν αυτό το κενό κάλυψης και συνεπώς την ομαλή λειτουργία του δικτύου.

1.3. Κάλυψη και κ-κάλυψη

Σε ένα WSN η κάλυψη δικτύου ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής επιφάνειας στο χώρο ενδιαφέροντος η οποία καλύπτεται από τη συνδυαστική χρήση των αισθητήριων κόμβων (sensor nodes) του δικτύου προς το άθροισμα των επιφανειών που καλύπτουν μεμονωμένα ο καθένας από αυτούς του κόμβους [13].

Έστω ότι έχουμε ένα σύνολο αισθητήριων κόμβων , $S = s_1 , s_2 \dots s_n$, σε ένα χώρο X δύο διαστάσεων . Κάθε αισθητήριος κόμβος S_i ($i=1,\dots,n$) βρίσκεται στις συντεταγμένες (x_i , y_i) μέσα στον X και έχει ικανότητα αίσθησης r_i . Κάθε σημείο μέσα στον X θεωρείται ότι καλύπτεται από έναν αισθητήριο κόμβο εάν βρίσκεται μέσα στην ακτίνα αίσθησης του, και κάθε σημείο στον X θεωρείται ότι έχει κ- κάλυψη εάν είναι στην ακτίνα αίσθησης κ αισθητήριων κόμβων τουλάχιστον.

1.4. Αισθητήρια μοντέλα

Τα WSN έχουν διαφορετικά θεωρητικά και φυσικά χαρακτηριστικά . Για αυτό ένας μεγάλος αριθμός από μοντέλα που διαφέρουν σε πολυπλοκότητα έχουν κατασκευαστεί ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής καθώς και τις περιβαλλοντικές συνθήκες υπό τις οποίες θα εφαρμοστούν. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήριων μοντέλων είναι ότι η ικανότητα τους στην αίσθηση εξασθενεί όσο η απόσταση αυξάνεται [14].

Ας υποθέσουμε ότι ένας αισθητήριος κόμβος S_i τοποθετείται στο σημείο (x_i, y_i) . Για κάθε σημείο P στο (x, y) , η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του S_i και του P ορίζεται ως:

$$d(S_i , P) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (1)$$

Η εξίσωση (2) περιγράφει την ικανότητα αίσθησης $S(S_i , P)$ ενός S_i σε ένα τυχαίο σημείο P :

$$S(S_i , P) = \frac{\lambda}{[d(S_i , P)]^K} \quad (2)$$

όπου $d(S_i , P)$ είναι η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του αισθητήριου κόμβου S_i και του σημείου P και οι θετικές σταθερές λ και K είναι παράμετροι που σχετίζονται με το είδος της τεχνολογίας που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του αισθητήριου κόμβου [15].

Όσο μικρότερο το $d(S_i , P)$ τόσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα αίσθησης του αισθητήρα. Ευκολά προκύπτει όμως ότι ο παρονομαστής στην (2) δεν μπορεί να πάρει την τιμή μηδέν . Για αυτόν τον λόγο ο παρονομαστής της εξίσωσης παίρνει τη μορφή $[d(S_i , P) + \delta]^K$, όπου το δ είναι θετικό αλλά τείνει στο μηδέν .

1.4.1. Δυαδικό μοντέλο αίσθησης

Το πιο απλό μοντέλο αίσθησης είναι το δυαδικό μοντέλο. Σύμφωνα με αυτό κάθε αισθητήριο κόμβος είναι ικανός να αισθανθεί τα σημεία τα οποία βρίσκονται μέσα στην ακτίνα αίσθησης του και τίποτα πέρα από αυτήν. Για αυτό τον λόγο σε αυτό το μοντέλο η περιοχή αίσθησής του, περιγράφεται ως ένας κυκλικός δίσκος ακτίνας r [15].

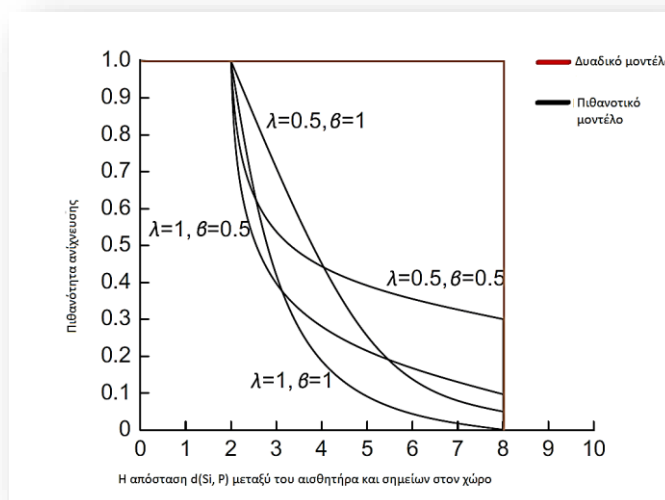
$$y(S_i) = \begin{cases} 1, & \text{αν } d(S_i, P) < r \\ 0, & \text{αν } d(S_i, P) \geq r \end{cases} \quad (3)$$

1.4.2. Πιθανοτικό μοντέλο αίσθησης

Το δυαδικό μοντέλο αίσθησης μπορεί να εξελιχθεί σε ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο, το πιθανοτικό μοντέλο αίσθησης το οποίο περιγράφεται από την εξίσωση:

$$C_{xy}(S_i) = \begin{cases} 0, & \text{αν } r + r_e \leq d(S_i, P) \\ e^{-\lambda \alpha^\beta}, & \text{αν } r - r_e < d(S_i, P) < r + r_e \\ 1, & \text{αν } r - r_e \geq d(S_i, P) \end{cases} \quad (4)$$

όπου r_e (με $r_e < r$) είναι μέτρο της αβεβαιότητας στην ανίχνευση του αισθητήρα, το $\alpha = d(S_i, P) - (r - r_e)$ και λ, β είναι παράμετροι οι οποίες μετρούν την πιθανότητα κατά την οποία το σημείο που ελέγχεται είναι σε μεγαλύτερη απόσταση από την r_e αλλά μέσα στην απόσταση αίσθησης του αισθητήρα. Στην Εικόνα 1 απεικονίζεται η συμπεριφορά του αισθητήριου κόμβου για το δυαδικό καθώς και για το πιθανοτικό μοντέλο για απόσταση ανάμεσα στον αισθητήριο κόμβο και το αντίστοιχο σημείο του χώρου ίση με οκτώ μονάδες.



Εικόνα 1. Συμπεριφορά του αισθητήριου κόμβου για το δυαδικό και το πιθανοτικό μοντέλο

Στο πιθανοτικό μοντέλο παρατηρείται ότι διαφορετικές τιμές στις μεταβλητές λ και β δημιουργούν διαφορετικές καμπύλες για την πιθανότητα ανίχνευσης του ίδιου αισθητήρα.

1.5. Στρατηγικές τοποθέτησης των κόμβων

Στα WSN, ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για μεγιστοποίηση της κάλυψης αλλά και για ύπαρξη συνεχούς επικοινωνίας των κόμβων είναι η σωστή τοποθέτησή τους στον χώρο. Όπως προαναφέρθηκε, τα είδη των κόμβων είναι δύο, στατικοί και κινητοί κόμβοι.

1.5.1. Τοποθέτηση στατικών κόμβων

Στην περίπτωση των στατικών κόμβων, ο αισθητήριος κόμβος δεν έχει την δυνατότητα να μετακινηθεί αφότου τοποθετηθεί. Η χρήση στατικών κόμβων έχει μικρό κόστος αγοράς καθώς και μικρή πολυπλοκότητα στην υλοποίηση του δικτύου, θεωρείται δε κατάλληλη όταν είναι γνωστές οι ιδιαιτερότητες του χώρου στον οποίο πρόκειται να εγκατασταθεί το ασύρματο δίκτυο. Οι ιδιαιτερότητες του χώρου μπορεί να σχετίζονται για παράδειγμα με το ανάγλυφο του εδάφους, εμπόδια που ίσως υπάρχουν, καθώς και τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες. Στην περίπτωση που κάποιο από τα χαρακτηριστικά του χώρου μεταβληθεί ή αν αποσυνδεθεί ένας ή περισσότεροι από τους αισθητήριους κόμβους (δυσλειτουργία ή απενεργοποίηση που μπορεί να οφείλεται σε έλλειψη ενέργειας) τότε θα δημιουργηθεί κενό κάλυψης στο δίκτυο το οποίο για να αποκατασταθεί απαιτεί εξωτερική παρέμβαση.

1.5.2. Τοποθέτηση κινητών κόμβων

Δεδομένου των προαναφερόμενων προβλημάτων που είναι συνακόλουθα της χρήσης στατικών αισθητήριων κόμβων, αναπτυχθήκαν τεχνικές κατά τις οποίες ένας αισθητήριος κόμβος έχει τη δυνατότητα μερικής ή ακόμα και ολικής μετακίνησης στο χώρο. Σε αυτές, οι αισθητήριοι κόμβοι συχνά ενσωματώνονται σε ρομποτικά οχήματα που τους δίνουν τη δυνατότητα κίνησης, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Αυτές οι μετακινήσεις όμως, καταναλώνουν πολλή από την συνολική διαθέσιμη ενέργεια του συστήματος. Για αυτόν το λόγο κάθε κίνηση τους πρέπει να είναι προμελετημένη, έτσι ώστε η κατανάλωση ενέργειας να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη και με τα μέγιστα δυνατά αποτελέσματα. Επομένως αναγεννάται η ανάγκη δημιουργίας αλγορίθμων για την υλοποίηση αυτών των μετακινήσεων.

1.6. Κάλυψη (Coverage)

Ο κύριος λόγος υλοποίησης ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων είναι η έγκυρη και έγκαιρη επιτήρηση ενός χώρου. Ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής, καθορίζεται ο τρόπος

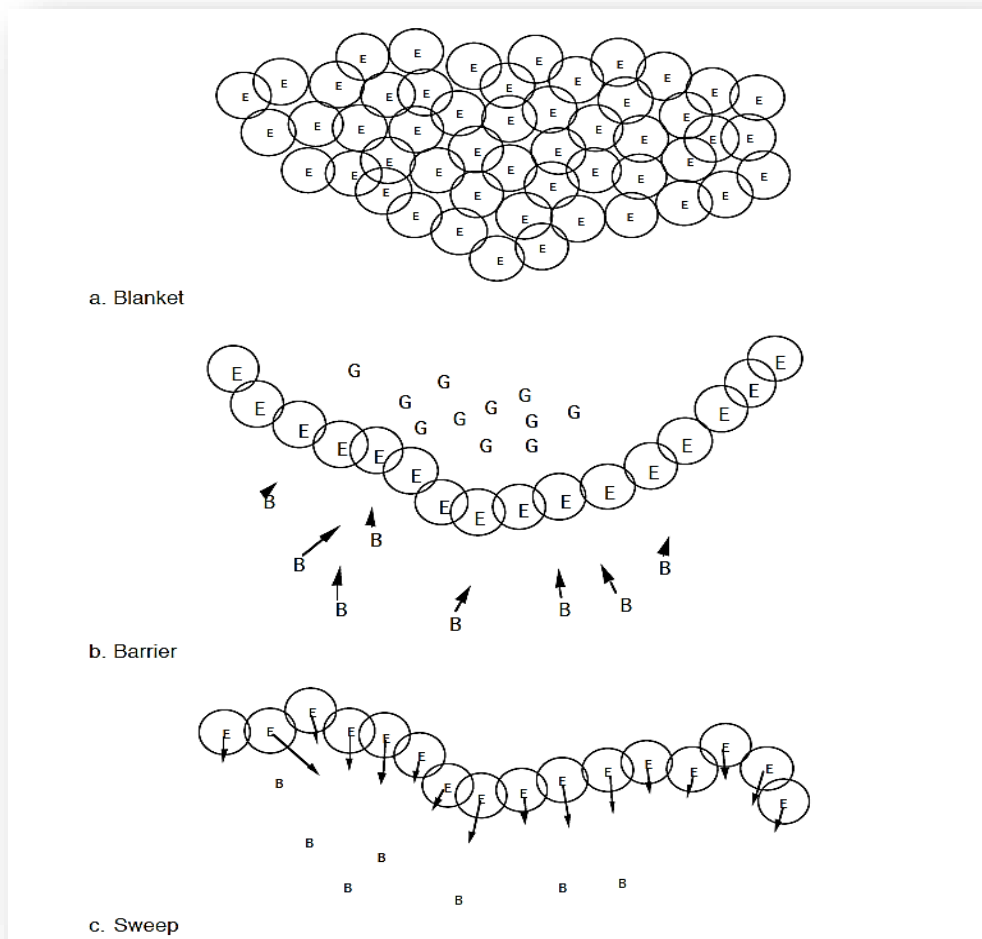
υλοποίησης του δικτύου καθώς επίσης και τα απαραίτητα μέτρα προστασίας, τα οποία είναι διαφορετικά κάθε φορά. Για παράδειγμα, μια ομάδα επιτήρησης θα πρέπει να είναι μεγάλη και διασκορπισμένη στο χώρο, εάν στόχος είναι η μεγιστοποίηση του αριθμού των συμβάντων που ανιχνεύονται ανά μονάδα χρόνου σε μια ευρεία περιοχή. Από την άλλη απαιτείται η δημιουργία μικρών και πυκνών ομάδων, αν ζητούμενο είναι η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας να μείνει κάποιο συμβάν απαρατήρητο μέσα σε μια μικρή περιοχή σάρωσης.

1.6.1. Τύποι κάλυψης

Ανάλογα με το είδος της κάλυψης που θέλουμε να προσφέρουμε σε μια εφαρμογή, έχουν προταθεί οι εξής τρεις μέθοδοι [15]:

- Κάλυψη τύπου Blanket: Στόχος είναι η μεγιστοποίηση της πιθανότητας ανίχνευσης στόχων μέσα σε μια περιοχή παρατήρησης, με στατική τοποθέτηση αισθητήρων σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου.
- Κάλυψη τύπου Barrier : Μέσω στατικής τοποθέτησης αισθητήριων κόμβων σε ένα δεδομένο χώρο «φράκτη», ελαχιστοποιείται η δυνατότητα να περάσει κάποιος στόχος μέσα από τον φράκτη στην περιοχή ενδιαφέροντος και να μείνει απαρατήρητος.
- Κάλυψη τύπου Sweep : Στόχος κατά την κάλυψη τύπου Sweep είναι η κίνηση ενός συνόλου αισθητήριων κόμβων στο δεδομένο χώρο κάλυψης, με αποτέλεσμα την εύρεση ισορροπίας μεταξύ της μεγιστοποίησης του αριθμού των παρατηρήσεων στον χρόνο και της ελαχιστοποίησης του αριθμού γεγονότων που δεν έχουν παρατηρηθεί. Αυτή η μέθοδος είναι παρόμοια με την κάλυψη τύπου «Barrier» με μόνη διαφορά ότι κατά την κάλυψη τύπου «Sweep», οι αισθητήριοι κόμβοι έχουν δυνατότητα κίνησης.

Στην Εικόνα 2 περιγράφεται ένα σενάριο κάλυψης από εχθρικές εισβολές χρησιμοποιώντας τα τρία είδη κάλυψης που περιεγράφηκαν παραπάνω. Με "Ε" σημειώνονται οι αισθητήριοι κόμβοι, "G" είναι τα φιλικά σημεία και "B" είναι τα εχθρικά.



Εικόνα 2. Τύποι κάλυψης

1.6.2. Προβλήματα κάλυψης

Όπως όλα τα μη ιδεατά συστήματα έτσι και αυτό, κατά την διάρκεια της λειτουργίας του εμφανίζει προβλήματα τα οποία μπορούν να οφείλονται είτε στους ίδιους τους κόμβους και στην μεθοδολογία που έχει επιλεγεί για την υλοποίηση του δικτύου, είτε σε εξωγενείς παράγοντες. Εύκολα προκύπτει ένας διαχωρισμός βασισμένος στην προέλευση του προβλήματος:

1.6.2.1. Πρόβλημα βασισμένο στους κόμβους

Σε ένα ιδανικό WSN, ο αριθμός των αισθητήριων κόμβων καθώς και η ακτίνα αίσθησης του καθ' ενός πρέπει είναι άπειρη. Σε μια τέτοια περίπτωση, θα υπήρχαν αισθητήριοι κόμβοι σε όλα τα σημεία του χώρου και δεν θα υπήρχαν κενά κάλυψης. Εύκολα προκύπτει ότι κάτι τέτοιο είναι αδύνατο να συμβεί, λόγω οικονομικού κόστους καθώς και περιορισμών στην τεχνολογία.

Ένα σημαντικό ζήτημα στα WSN είναι κατανάλωση ενέργειας. Το ιδανικό σύστημα WSN θα έπρεπε να έχει στη διάθεσή του για να λειτουργήσει άπειρη ενέργεια, αυτό όμως είναι αδύνατο λόγω του

ότι κάθε αισθητήριο κόμβος έχει περιορισμένη ενέργεια την οποία καταναλώνει για την λήψη μετρήσεων, επικοινωνία με άλλους κόμβους ή το κεντρικό υπολογιστικό σύστημα καθώς και για την μετακίνησή του στον χώρο στις περιπτώσεις κινητών κόμβων. Επιπρόσθετα μεγάλα προβλήματα δημιουργούνται κατά την τυχαία τοποθέτηση αισθητήριων κόμβων στο χώρο. Λόγω της ακανόνιστης θέσης που παίρνουν, αυξάνονται ραγδαία οι πιθανότητες να καλύπτουν τα ίδια σημεία του χώρου, χωρίς αυτό να αποτελεί απαίτηση του προβλήματος. Μεγάλα ποσά ενέργειας πρέπει να καταναλωθούν έτσι ώστε ο κινητός κόμβος να πάρει την βέλτιστη θέση στον χώρο και να μεγιστοποιήσει την κάλυψη.

1.6.2.2. Πρόβλημα βασισμένο στο περιβάλλον – εξωγενείς παράγοντες

Πολλές φορές οι συνθήκες στις οποίες είναι τοποθετημένο το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων δεν είναι ιδανικές. Τα καιρικά φαινόμενα, όπως χαλάζι ή ισχυρές βροχοπτώσεις μπορούν να επηρεάσουν τη δομή και τη λειτουργία του δικτύου. Επίσης, κινητά εμπόδια του χώρου στον οποίο εφαρμόζεται το WSN, σε συνδυασμό με την πανίδα της περιοχής και εχθρικές ενέργειες που μπορούν να λάβουν χώρα απέναντι στο δίκτυο, μπορούν να αλλοιώσουν τις μετρήσεις και ενδέχεται να προκαλέσουν υλικές ζημιές σε αυτό ή ακόμη και την πλήρη καταστροφή του.

1.6.3. Κριτήρια αξιολόγησης των αλγορίθμων κάλυψης

Η αξιολόγηση της δυνατότητας ενός αλγορίθμου να υπολογίζει την βέλτιστη κάλυψη ενός χώρου, καθορίζει τη χρησιμότητα και αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου. Βασικά κριτήρια αξιολόγησης θεωρούνται τα εξής:

α. Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS -Quality of Service) της κάλυψης:

Το QoS της κάλυψης είναι το κύριο κριτήριο για την ανιχνευτική ικανότητα του δικτύου με δεδομένες τις ανάγκες της εφαρμογής και αποτελεί βασικό κριτήριο αξιολόγησης του αλγορίθμου.

β. Αριθμός των ενεργών κόμβων:

Για την επίτευξη των απαιτήσεων κάλυψης, όσο λιγότεροι ενεργοί κόμβοι υπάρχουν, διατηρώντας πάντα την επιθυμητή κάλυψη, τόσο καλύτερη είναι η απόδοση του δικτύου ως προς την κατανάλωση ενέργειας.

γ. Γνώση ή άγνοια της τοποθεσίας:

Οι αλγόριθμοι που έχουν ως απαραίτητη μεταβλητή την εύρεση της τοποθεσίας των κόμβων, βασίζονται σε εξωτερικές προσθήκες (όπως GPS) ή σε άλλες τεχνικές εύρεσης της τοποθεσίας. Ο

υπολογισμός της τοποθεσίας όμως, παρουσιάζει πολλές φορές προβλήματα ακρίβειας στον υπολογισμό της θέσης και έχει ως αποτέλεσμα την επιπρόσθετη κατανάλωση ενέργειας. Γι' αυτό τον λόγο, αλγόριθμοι ελέγχου της κάλυψης που δεν περιλαμβάνουν πληροφορίες θέσης βρίσκονται σε πλεονεκτική θέση.

δ. Ενεργειακή αποδοτικότητα:

Στους αλγόριθμους κάλυψης δεν απαιτείται χαμηλή κατανάλωση ενέργειας μόνο σε μια συγκεκριμένη διαδικασία, αλλά είναι βασική η επίτευξη ενεργειακής ισορροπίας στο δίκτυο σε μια σειρά διαδικασιών.

ε. Προσαρμοστικότητα:

Τα WSN θα πρέπει να έχουν την δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές στη σύνθεση τους καθώς η τοπολογία του δικτύου ενδεχομένως να αλλάζει δυναμικά.

1.7. Τεχνικές για τη διατήρηση και ενίσχυση της κάλυψης

Σε ένα πρόβλημα κάλυψης βασικό ζητούμενο είναι η βέλτιστη κάλυψη του χώρου. Οι απαιτήσεις μπορεί να αλλάζουν ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Σύμφωνα με την εργασία [15] υπάρχουν τρία είδη βαθμών κάλυψης:

α. Υψηλός βαθμός κάλυψης:

Υλοποιείται σε εφαρμογές που είναι πολύ σημαντικές οι παρατηρήσεις του χώρου (στρατιωτικές εφαρμογές).

β. Χαμηλός βαθμός κάλυψης:

Βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις στις οποίες οι παρατηρήσεις δεν είναι πολύ σημαντικές (μέτρηση θερμοκρασίας).

γ. Δυναμικός βαθμός κάλυψης:

Οπού ο βαθμός κάλυψης αυξάνεται όταν απαιτηθεί από την εφαρμογή (ανίχνευση κάποιου εισβολέα).

Στα σενάρια με υψηλό βαθμό κάλυψης είναι απαραίτητη η συνεχής παρατήρηση του χώρου. Ένα συχνό φαινόμενο στα WSN είναι η απενεργοποίηση ενός κόμβου, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε έλλειψη ενέργειας, καταστροφή του κόμβου από εχθρικές ενέργειες (κατά κύριο λόγο σε

στρατιωτικές εφαρμογές) ή και σε άλλες δυσλειτουργίες του συστήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία προβλημάτων στην κάλυψη καθώς και στην επικοινωνία των κόμβων του δικτύου με μερική ή ολική απώλεια πληροφορίας.

Αυτή η κατάσταση μπορεί να προβλεφθεί, αν έχει γίνει από πριν μελέτη τέτοια ώστε σε κάθε σημείο ενδιαφέροντος να υπάρχει κ-κάλυψη. Επομένως κάποια σημεία του χώρου θα καλύπτονται ταυτόχρονα από πολλούς αισθητήριους κόμβους και σε περίπτωση αποσύνδεσης του ενός, το σημείο συνεχίζει να καλύπτεται. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3, σε περίπτωση απενεργοποίησης ενός, ή ακόμα και δύο αισθητήριων κόμβων, το σημείο παραμένει παρατηρήσιμο.



Εικόνα 3. 3-κάλυψη σε σημείο

Επιπλέον σε κάποιες εφαρμογές είναι απαραίτητη για την ορθή λήψη των δεδομένων K-κάλυψη με $K > 1$. Για παράδειγμα στο πρωτόκολλο εύρεσης τοποθεσίας βάση τριγωνισμού (triangulation) είναι απαραίτητοι τουλάχιστον τρεις αισθητήρες ($K \geq 3$) για την παρατήρηση ενός κινητού αντικειμένου [16].

1.8. Μεθοδολογίες βελτιστοποίησης της κάλυψης σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της κάλυψης ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές.

Στην εργασία [17] η μεγιστοποίηση της κάλυψης επιτυγχάνεται μέσω της σωστής τοποθέτησης των σταθερών κόμβων σε σχέση με τους κινητούς κόμβους. Η ολική περιοχή κάλυψης χωρίζεται σε μικρότερες περιοχές που ονομάζονται πλέγματα (grids) και υπολογίζεται το βάρος της κάθε περιοχής. Ο προορισμός καθενός κινητού κόμβου είναι προς την περιοχή με το μικρότερο βάρος σε σχέση με όλες τις περιοχές.

Στην εργασία [18] προτάθηκε το Bidding πρωτόκολλο, το οποίο εφαρμόζεται σε μια περιοχή όπου συνυπάρχουν σταθεροί και κινητοί κόμβοι. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο πρωτόκολλο, οι κινητοί κόμβοι αλλάζουν την θέση τους στον χώρο, με σκοπό να αυξήσουν την περιοχή κάλυψης καλύπτοντας τα κενά που αφήνουν οι στατικοί κόμβοι. Ο υπολογισμός αυτός επιτυγχάνεται μέσω διαγραμμάτων Voronoi, τα οποία δημιουργούνται με διαμοιρασμό του επιπέδου σε περιοχές που παρακείμενες σε συγκεκριμένα αντικείμενα ενδιαφέροντος.

Μια μεθοδολογία με εικονικές δυνάμεις (VFA) προτάθηκε στο [19], ως μια λύση για βελτιστοποίηση της κάλυψης του χώρου. Αρχικά οι κόμβοι τοποθετούνται τυχαία στον χώρο. Ελκτικές και απωστικές εικονικές δυνάμεις εφαρμόζονται πάνω στους κόμβους με σκοπό να αποκτήσουν νέες θέσεις στον χώρο και μόλις βρεθούν οι βέλτιστες θέσεις αυτές, τότε οι κόμβοι πραγματοποιούν μια κίνηση προς τη νέα βέλτιστη θέση τους.

Στο [20] ο επονομαζόμενος COVEN αλγόριθμος υπολογίζει τα κενά κάλυψης μετά από μια τυχαία τοποθέτηση των κόμβων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας μια διαδικασία δύο σταδίων, οι στατικοί κόμβοι συνεργάζονται έτσι ώστε να καθορίσουν τον απαραίτητο αριθμό κινητών κόμβων που πρέπει να προστεθούν στο δίκτυο, καθώς και τις τελικές θέσεις που θα πάρουν με σκοπό να πετύχουν μεγιστοποίηση της κάλυψης. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται μια εξισορρόπηση μεταξύ του κόστους και της κάλυψης μιας περιοχής.

Μια προσέγγιση για την τοποθέτηση των κόμβων, που προτάθηκε στην εργασία [21], λαμβάνει υπόψιν τόσο την παρακολούθηση μιας περιοχής όσο και την σωστή συλλογή και προώθηση των δεδομένων που συλλέγουν σε ένα κεντρικό υπολογιστικό σύστημα.

Στην πρόταση, που έγινε στην εργασία [16], το πρόβλημα της κάλυψης αντιμετωπίστηκε ως ένα πρόβλημα απόφασης που είχε ως στόχο να καθοριστεί για το αν κάθε σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος καλύπτεται από τουλάχιστον k αισθητήρες, όπου k είναι μια παράμετρος που δίνεται από πριν. Οι ακτίνες αίσθησης των αισθητήρων μπορεί να είναι ομοιόμορφες ή ανομοιόμορφες.

Στην εργασία [22] προτάθηκε ο αλγόριθμος C^3R που εφαρμόζεται σε περιπτώσεις κάποιας βλάβης ή δυσλειτουργίας ενός κόμβου αξιοποιώντας τη δυνατότητα που έχουν να μετακινούνται, καλύπτοντας το κενό που δημιουργήθηκε. Λόγω του ότι, σύμφωνα με παρόμοιες διαδικασίες που είχαν εφαρμοστεί στο παρελθόν από άλλους αλγόριθμους μετακίνησης του κόμβου, στην διαδικασία κάλυψης αυτού του κενού ο κόμβος που μετακινείται δημιουργεί και ο ίδιος πίσω του ένα κενό, δημιουργήθηκε ο αλγόριθμος C^3R που προσπάθησε να δώσει λύση στο μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας. Ποιο συγκεκριμένα, οι γείτονες του κόμβου, που εμφάνισε την δυσλειτουργία, συνεργάζονται για την αποκατάσταση του κενού. Κάθε κόμβος μετακινείται στην περιοχή αυτή για την αποκατάσταση τόσο της κάλυψης όσο και της συνδεσιμότητας και γυρνάει πίσω στην αρχική του θέση μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και στην συνέχεια αναλαμβάνει ο επόμενος γειτονικός κόμβος.

Οι συγγραφείς στην [23] πρότειναν έναν νέο αλγόριθμο προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η κάλυψη σε ένα ΑΔΑ χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο PSO μαζί με τα διαγράμματα Voronoi. Τα σημεία ενδιαφέροντος ορίζονται από τα διαγράμματα Voronoi ως τα σημεία στα άκρα των πολυγώνων Voronoi καθώς και τα σημεία στα όρια όπου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να υπάρχει μια οπή κάλυψης. Σύμφωνα με την απόσταση των σημείων ενδιαφέροντος από τους κόμβους, η περιοχή των οπών κάλυψης υπολογίζεται και ελαχιστοποιείται χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο PSO.

Στην εργασία [24] η βελτιστοποίηση της κάλυψης σε ΑΔΑ επιδιώκεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο PSO μαζί με μια στρατηγική που βασίζεται σε χρήση πλέγματος. Ειδικότερα, η διαμόρφωση τετράγωνου πλέγματος χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των σωματιδίων στις λειτουργίες καταλληλότητας που χρησιμοποιούνται. Επιπλέον, επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της κάλυψης και η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.

Στην εργασία [25] προτείνονται κάποια μοντέλα προγραμματισμού των κόμβων για μια περιοχή κάλυψης μέσω της δυνατότητας αλλαγής της ακτίνας αίσθησης. Βασικό στόχος είναι να μεγιστοποιείται η διάρκεια ζωής του δικτύου, διατηρώντας στο μέγιστο την κάλυψη ειδικά στις περιπτώσεις όπου υπάρχει περιορισμός στην παροχή ενέργειας.

Στο [26], ένας νέος αλγόριθμος προτάθηκε ο οποίος μεγιστοποιεί την κάλυψη μιας περιοχής ενώ από την άλλη ελαχιστοποιεί τον αριθμό των αισθητήριων κόμβων. Στην προσέγγιση αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι γενετικοί αλγόριθμοι για την επίλυση του προβλήματος. Δύο είναι οι βασικοί στόχοι του. Ο πρώτος είναι η μεγιστοποίηση της κάλυψης μια περιοχής και ο δεύτερος η ελαχιστοποίηση του αριθμού των κόμβων στο δίκτυο που αυτό συνεισφέρει επίσης και στην

μείωση των επικαλύψεων μεταξύ των κόμβων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι ο αλγόριθμος παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από άλλους όμοιους αλγορίθμους.

Στο [27] προσεγγίστηκε το πρόβλημα της κάλυψης ενός ΑΔΑ με βάση μια νέα μέθοδο, αυτή των εικονικών κόμβων. Αυτοί οι κόμβοι μπορούν να μετακινηθούν, να συγχωνευθούν, να επαναρυθμιστούν καθώς και να “καταστραφούν”. Αυτή η μέθοδος, στην οποία οι κόμβοι αποκαλούνται ως εικονικοί, μειώνει τον αριθμό των πραγματικών κόμβων ενώ διατηρείται πλήρως η κάλυψη μιας περιοχής. Παρόλα αυτά δεν έχει ως στόχο την μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του δικτύου.

Στην εργασία [28] έγινε μια προσέγγιση για τον υπολογισμό των ‘οπών’ κάλυψης, με την βοήθεια της υπολογιστικής γεωμετρίας. Ο υπολογισμός των οπών υπολογίστηκε με απλές αλλά αποδοτικές διαδικασίες γεωμετρικών μεθόδων.

Στην εργασία [29] προτάθηκε ένας αλγόριθμος βασισμένος στην μέθοδο Delaunay, ο οποίος έχει την ικανότητα να βρίσκει την συντομότερη διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει ένας κόμβος ώστε να διατηρηθεί πλήρης κάλυψη του χώρου στην περίπτωση που δημιουργηθεί οπή κάλυψης σε κάποιο σημείο του, χωρίς όμως να γνωρίζει την ακριβή θέση του κάθε κόμβου.

Στην εργασία [30] προτάθηκε ένας αλγόριθμος βασισμένο στους γενετικούς αλγορίθμους, ο οποίος έχει ως στόχο την εύρεση του ελάχιστου αριθμού θέσεων στον χώρο που πρέπει να τοποθετηθούν οι αισθητήριοι κόμβοι, έχοντας όμως πρώτα ικανοποιήσει την απαίτηση κ-κάλυψης του χώρου και μ-συνδεσιμότητας των κόμβων.

Στην εργασία [31], παρουσιάστηκαν μια σειρά, εμπνευσμένων από τη φύση, αλγορίθμων για την τοποθέτηση των κόμβων στο χώρο. Στόχος τους είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των κόμβων που πρέπει να τοποθετηθούν σε μια περιοχή ενδιαφέροντος, διασφαλίζοντας όμως πρώτα την ύπαρξη κ-κάλυψης και μ-συνδεσιμότητας.

Στην εργασία [32], διερευνήθηκε το πρόβλημα της κ-κάλυψης από την οπτική του πλεονασμού των κόμβων στο χώρο, με στόχο τόσο την διατήρηση της ενέργειας όσο και την πλήρη κάλυψη του χώρου. Ο αλγόριθμος που προτάθηκε, βασίζεται στον πλεονασμό των κόμβων και μπορεί με ακρίβεια να αποφασίσει τον απαραίτητο αριθμό κόμβων καθώς και την ακρίβεια της κάλυψης με πολύ χαμηλό κόστος.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ

2.1. Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό στοχεύει στο να εξοικειώσει τον αναγνώστη με τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, την απαίτηση για τη μεγιστοποίηση της κάλυψης και της κ-κάλυψης σε αυτά και τις μεθοδολογίες που έχουν προταθεί και εφαρμοστεί για την επίτευξη αυτών των απαιτήσεων.

2.2. Εισαγωγή στην υπολογιστική νοημοσύνη

Πολλοί και διαφορετικοί ορισμοί έχουν διατυπωθεί σε σχέση με τον όρο Υπολογιστική Νοημοσύνη (Computational Intelligence). Αυτό συμβαίνει, διότι ο όρος “νοημοσύνη” από μόνος του, είναι αρκετά δύσκολο να προσδιοριστεί χωρίς να συνδέεται με τα στοιχεία της ανθρώπινης νοημοσύνης, καθώς και λόγω του γεγονότος ότι υπάρχει αδυναμία στην απόδοση γενικών χαρακτηρισμών για το ποιες υπολογιστικές διεργασίες θεωρούνται έξυπνες και ποιες όχι.

Σύμφωνα με μία από τις υφιστάμενες προσεγγίσεις, Υπολογιστική Νοημοσύνη είναι η μελέτη μηχανισμών, οι οποίοι έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται και να επιτρέπουν ή να διευκολύνουν την «έξυπνη» συμπεριφορά ενός συστήματος σε πολύπλοκα περιβάλλοντα ή σε περιβάλλοντα που αλλάζουν, μιμούμενοι μηχανισμούς που υπάρχουν στη φύση [33]. Γίνεται προσπάθεια μοντελοποίησης του προβλήματος σε ένα σύστημα το οποίο να μπορεί να μαθαίνει, να προσαρμόζεται σε νέες καταστάσεις, να κάνει γενικεύσεις, να εξερευνά.

Καίριο λοιπόν ζήτημα, αποτελεί η σχεδίαση αλγορίθμων, οι οποίοι προσπαθούν να μοντελοποιήσουν πτυχές της βιολογικής ευφυίας και να δημιουργήσουν τα λεγόμενα «έξυπνα συστήματα». Αυτοί οι «ευφυείς» αλγόριθμοι περιλαμβάνουν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Neural Networks – NN), εξελικτικούς αλγορίθμους (Evolutionary Computation - EC), αλγορίθμους που βασίζονται στην ευφυία σμήνους (Swarm Intelligence - SI), τεχνητά συστήματα που μιμούνται τη λειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος (Artificial Immune Systems - AIS) και ασαφή συστήματα (Fuzzy Systems - FS) και αποτελούν κομμάτι του κλάδου της Τεχνητής Νοημοσύνης.

2.3. Γενικός εξελικτικός αλγόριθμος

Η έννοια του εξελικτικού υπολογισμού χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει μία οικογένεια αλγορίθμων όπου ο κάθε ένας από αυτούς βασίζεται σε έναν πληθυσμό (population) υποψήφια λύσεων, η κάθε μία από τις οποίες ονομάζεται άτομο (individual).

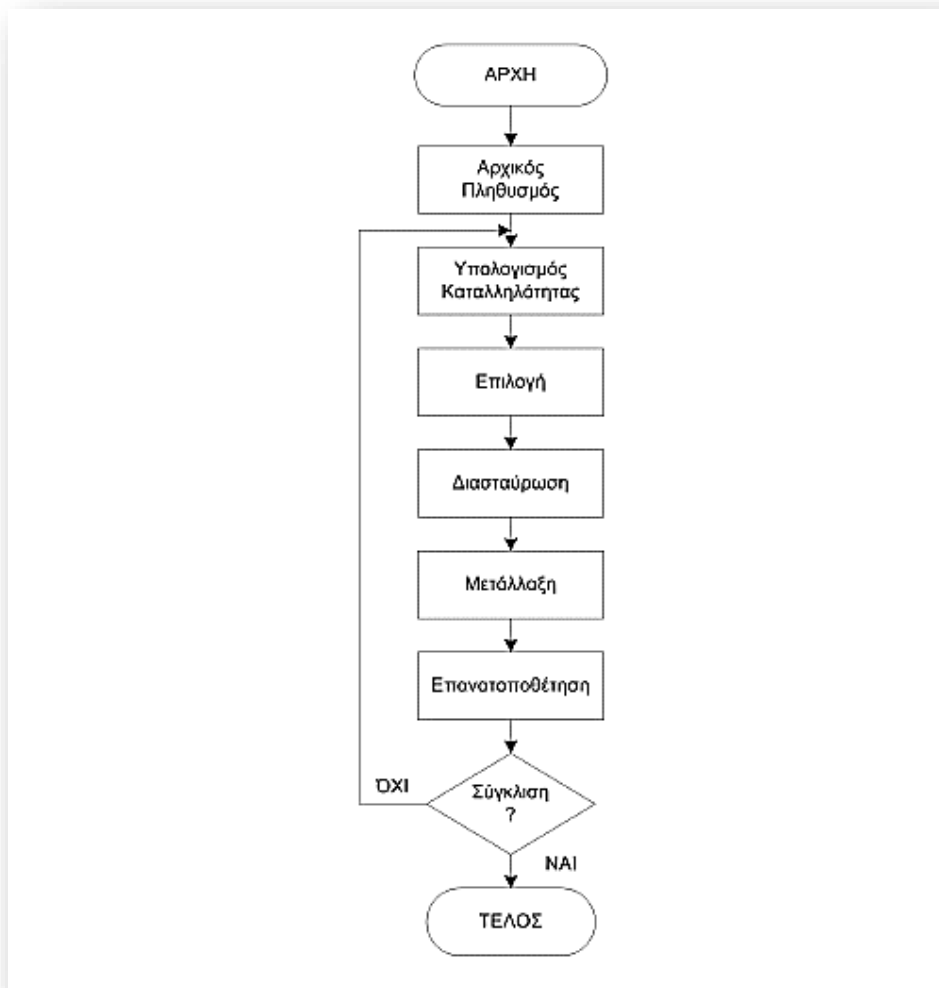
Η βάση του είναι οι αρχές που διέπουν τη θεωρία της Εξέλιξης των ειδών, που εισήγαγε με πιο ολοκληρωμένο τρόπο το 1859 ο Δαρβίνος με το βιβλίο του «The origin of species by means of natural selection» [34]. Σύμφωνα με τον Δαρβίνο μεταξύ των ατόμων που απαρτίζουν έναν πληθυσμό διεξάγεται ένας αγώνας επιβίωσης. Η επιτυχία στον αγώνα για επιβίωση εξαρτάται από το είδος των χαρακτηριστικών που έχει κληρονομήσει ένας οργανισμός από τους προγόνους του. Έτσι, τα άτομα που έχουν κληρονομήσει χαρακτηριστικά που τους βοηθούν να προσαρμόζονται καλύτερα στο περιβάλλον τους επιβιώνουν και αφήνουν μεγαλύτερο αριθμό απογόνων σε σχέση με άτομα που έχουν κληρονομήσει λιγότερο ευνοϊκά για την επιβίωσή τους χαρακτηριστικά (survival of the fittest). Τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά μεταβιβάζονται στην επόμενη γενιά με μεγαλύτερη συχνότητα από τα λιγότερο ευνοϊκά, αφού οι φορείς τους επιβιώνουν και αφήνουν μεγαλύτερο αριθμό απογόνων.

Η διαδικασία με την οποία τα άτομα που είναι περισσότερο προσαρμοσμένα στο περιβάλλον τους επιβιώνουν και αναπαράγονται ονομάζεται φυσική επιλογή. Για την εξελικτική θεωρία, η φυσική επιλογή δρα στον πληθυσμό και συνεπώς ο πληθυσμός αντιπροσωπεύει τη μικρότερη μονάδα που μπορεί να εξελιχθεί. Ένα μεμονωμένο άτομο μπορεί να παρουσιάσει ένα νέο χαρακτηριστικό είτε λόγω μεταβολής του γενετικού υλικού του (μετάλλαξη), είτε λόγω της επίδρασης του περιβάλλοντός του (επίκτητο γνώρισμα).

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι αναφέρονται σε υπολογιστικά συστήματα τα οποία σχεδιάζονται να λύνουν προβλήματα, χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν εξελικτικές διαδικασίες όπως η φυσική επιλογή, η επιβίωση του καλύτερου και η αναπαραγωγή, ως βασικά συστατικά τους.

2.4. Γενετικοί αλγόριθμοι (GAs)

Οι γενετικοί αλγόριθμοι προτάθηκαν από τον John Holland και τους μαθητές του το 1975. Αποτελούν μία από τις πιο βασικές κατηγοριοποιήσεις των εξελικτικών αλγορίθμων και η βασική λειτουργική δομή τους παρουσιάζεται στην Εικόνα 4 [35]:



Εικόνα 4. Βασική δομή των γενετικών αλγορίθμων

Πριν την εκτέλεση των γενετικών αλγορίθμων θα πρέπει να προηγηθεί μια κατάλληλη κωδικοποίηση των χρωμοσωμάτων ώστε αυτά να αντικατοπτρίζουν το συγκεκριμένο πρόβλημα. Επίσης απαιτείται ο ορισμός μιας κατάλληλης αντικειμενικής συνάρτησης (fitness function) που να περιγράφει το πρόβλημα αυτό, η οποία αποδίδει έναν βαθμό καταλληλότητας σε κάθε κωδικοποιημένη λύση. Κατά την εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου, επιλέγονται οι καλύτεροι γονείς για διασταύρωση και παραγωγή γόνων. Είναι σημαντικό τέτοιου τύπου αλγόριθμοι να κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η ποικιλομορφία ανάμεσα στα άτομα του πληθυσμού. Έτσι μπορεί να αποφευχθεί η πρόωρη σύγκλιση του αλγορίθμου σε μία λύση του προβλήματος (premature convergence). Ένας από τους τελεστές που ενισχύουν την ποικιλομορφία στον γενετικό αλγόριθμο- και επομένως εμποδίζει την πρόωρη σύγκλισή του- είναι ο τελεστής της μετάλλαξης, με την εφαρμογή του οποίου μπορεί να παρατηρηθεί τυχαία εμφάνιση κάποιου χρωμοσώματος το οποίο θα ήταν αδύνατο να εμφανιστεί μέσω της διασταύρωσης. Στη συνέχεια,

για να εξισορροπηθεί ο αριθμός των ατόμων της νέας γενιάς με την προηγούμενη, γίνεται επανατοποθέτηση κάποιων από τους γονείς στον παραγόμενο πληθυσμό ώστε το συνολικό μέγεθός του να παραμείνει σταθερό.

2.5. Υπολογιστική ευφυΐα σμήνους – (Computational swarm intelligence)

Βασικό χαρακτηριστικό της συλλογικότητας είναι η συνεργασία των μελών που την απαρτίζουν. Οι οντότητες που την δημιουργούν, αλληλεπιδρούν για την επίλυση του κοινού τους στόχου, ανταλλάσσοντας μεταξύ τους πληροφορίες ώστε το κάθε πρόβλημα που προκύπτει να μπορεί να λυθεί με πιο αποτελεσματικό τρόπο απ' ότι μπορεί να γίνει από μία μόνο οντότητα. Στη φύση έχουν παρατηρηθεί πολλές τέτοιες συλλογικότητες, πολλές από τις οποίες οργανώνονται σε σμήνη [33].

Ως σμήνος λοιπόν, θα μπορούσε να ορισθεί μία ομάδα από κινητά συνήθως σωματίδια- οντότητες, τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους άμεσα ή έμμεσα, δρώντας παράλληλα στο περιβάλλον τους.

Η ευφυΐα σμήνους αναφέρεται στον τρόπο επίλυσης προβλημάτων που πηγάζει από την αλληλεπίδραση μεταξύ των σωματιδίων, και η υπολογιστική ευφυΐα σμήνους αναφέρεται σε αλγοριθμικά μοντέλα που προκύπτουν από αυτόν τον τρόπο επίλυσης προβλημάτων.

Μελέτες της κοινωνικής συμπεριφοράς ζώων και εντόμων έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλών υπολογιστικών μοντέλων ευφυΐας σμήνους. Τέτοιου τύπου υπολογιστικά μοντέλα είναι εμπνευσμένα από αποικίες μυρμηγκιών και τερμιτών, σμήνη μελισσών και πτηνών, κοπάδια ψαριών και ζώων της ξηράς. Η επικοινωνία και η αλληλεπίδραση των οντοτήτων μέσα στη συλλογικότητα είναι μία πολύπλοκη διαδικασία που δεν μπορεί να προβλέψει κανείς εύκολα. Η συμπεριφορά κάθε οντότητας μέσα στο σύνολο διαμορφώνει τη συλλογικότητα και αντίστροφα, ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η συλλογικότητα επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο θα λειτουργήσει η κάθε οντότητα μέσα σε αυτή και τη βοηθά να κατανοήσει καλύτερα το περιβάλλον στο οποίο ενεργεί. Γι' αυτό το λόγο μπορεί κανείς να πει ότι το πιο σημαντικό «συστατικό» στην ευφυΐα σμήνους είναι η αλληλεπίδραση και η συνεργασία μεταξύ των οντοτήτων.

Ο σκοπός των αλγορίθμων που έχουν βασιστεί στην ευφυΐα σμήνους, είναι να μοντελοποιήσουν την απλή συμπεριφορά των σωματιδίων (οντοτήτων) καθώς και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους και με το περιβάλλον τους ώστε να μπορούν στη συνέχεια να προβλεφθούν πιο πολύπλοκες συμπεριφορές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη λύση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης.

2.6. Αλγόριθμος PSO

Ο αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO), αποτελεί έναν από τους πιο γνωστούς αλγορίθμους που βασίζονται στην υπολογιστική ευφυΐα σμήνους. Ο αλγόριθμος PSO προτάθηκε από τους Eberhart και Kennedy (1995) και βασίζεται στην προσομοίωση της κοινωνικής συμπεριφοράς των πτηνών που απαρτίζουν ένα σμήνος [36] και μοντελοποιεί δύο απλές συμπεριφορές:

- κάθε σωματίδιο κινείται στην κατεύθυνση κάποιου γειτονικού σωματιδίου που βρίσκεται σε καλύτερη θέση από αυτό
- κάθε σωματίδιο κινείται στην κατεύθυνση που βρίσκεται η καλύτερη θέση που είχε βρει μόνο του.

Με αυτό τον τρόπο συνεργασίας των σωματιδίων, προκύπτει στο τέλος η καλύτερη θέση από όλες.

Η αρχική ιδέα για τη δημιουργία του αλγορίθμου, ήταν η δημιουργία μιας προσομοίωσης της απρόβλεπτης 'χορογραφίας' ενός κοπαδιού πτηνών και η ανακάλυψη μοτίβων που διέπουν την ικανότητα των πτηνών να πετούν με συγχρονισμό και να ανασυντάσσονται με τον βέλτιστο τρόπο όταν αλλάζουν ξαφνικά κατεύθυνση.

Τα σωματίδια στον PSO συνεργάζονται προσπαθώντας να μιμηθούν την επιτυχία των γειτονικών τους σωματιδίων με στόχο να ανακαλύψουν τις καλύτερες θέσεις του χώρου που εξερευνούν.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους θεωρεί ένα σμήνος από σωματίδια όπου κάθε ένα από αυτά αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση στο πρόβλημα. Η έννοια του σμήνους μπορεί να παρομοιαστεί με την έννοια του πληθυσμού στον Εξελικτικό Υπολογισμό, ενώ η έννοια του σωματιδίου είναι παρόμοια με αυτή του ατόμου (χρωμοσώματος)

Στον αλγόριθμο αυτό, τα σωματίδια πετάνε στο χώρο καταλαμβάνοντας συγκεκριμένες θέσεις, που προκύπτουν από την εμπειρία που έχουν αποκτήσει από το δικό τους πέταγμα, αλλά και από αυτό των γειτόνων τους.

Ειδικότερα, ένας συγκεκριμένος αριθμός σωματιδίων τοποθετούνται αρχικά τυχαία στο χώρο και αξιολογούν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για την παρούσα θέση.

Η αντικειμενική συνάρτηση στον αλγόριθμο PSO είναι απόρροια της μαθηματικής μοντελοποίησης του εκάστοτε φυσικού προβλήματος που χρήζει επίλυσης και αποτελεί ένα κριτήριο αξιολόγησης της απόδοσης του αλγορίθμου ως προς την επίτευξη της βέλτιστης λύσης για το πρόβλημα.

Έπειτα, για έναν προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων του αλγορίθμου, κάθε σωματίδιο μετακινείται σε μία καινούργια θέση για την οποία η αντικειμενική συνάρτηση δίνει καλύτερη τιμή σε σχέση με την προηγούμενη. Το κάθε σωματίδιο διατηρεί ένα ιστορικό που περιλαμβάνει τη βέλτιστη- μέχρι στιγμής- θέση που έχει καταλάβει (pbest position), η οποία συγκρίνεται σε κάθε νέα επανάληψη με τις βέλτιστες θέσεις που έχουν καταληφθεί από τα γειτονικά σωματίδια του σμήνους και καταγράφεται η καλύτερη από αυτές (gbest position).

Συνεπώς, όσο αυξάνεται ο αριθμός των επαναλήψεων, το σμήνος συνολικά επιτυγχάνει την καλύτερη λύση στο πρόβλημα που έχει κληθεί να λύσει, με έναν καθορισμένο αριθμό σωματιδίων να συνεργάζονται για την επίτευξη του κοινού τους στόχου. Η εύρεση βέλτιστης λύσης μέσω του PSO είναι μία επαναλαμβανόμενη διαδικασία η οποία εκτελείται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού. Ως κριτήριο τερματισμού μπορεί να καθοριστεί:

- ο αριθμός των επαναλήψεων του αλγορίθμου,
- η εύρεση μίας αποδεκτής λύσης για το πρόβλημα και
- η μη βελτίωση του αποτελέσματος του αλγορίθμου μετά από συνεχόμενες επαναλήψεις.

Ο βασικός αλγόριθμος PSO παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.

```
Αρχικοποίηση παραμέτρων ελέγχου (N, c1, c2, Wmin, Wmax, Vmax, MaxIter )
Αρχικοποίηση πληθυσμού N σωματιδίων
ΑΡΧΗ_ΕΠΑΝΑΛΗΨΗΣ:
    ΓΙΑ_ΚΑΘΕ σωματίδιο:
        Υπολογισμός της καταλληλότητας του σωματιδίου
        Ανανέωση του PBEST αν χρειαστεί
        Ανανέωση του GBEST αν χρειαστεί
    ΤΕΛΟΣ
    Ανανέωση του αδρανειακού βάρους W
    ΓΙΑ_ΚΑΘΕ σωματίδιο:
        Ανανέωση της ταχύτητας του σωματιδίου (V)
        Ανανέωση της θέσης του σωματιδίου (X)
    ΤΕΛΟΣ
ΜΕΧΡΙΣ_ΟΤΟΥ ικανοποιηθεί κάποια από τις συνθήκες τερματισμού
ΕΠΙΣΤΡΟΦΗ του GBEST ως η καλύτερη εκτίμηση της βέλτιστης τιμής
```

Εικόνα 5. Βασική δομή του αλγορίθμου σμήνους σωματιδίων

3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ

3.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η δομή των σχημάτων ελέγχου που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής για τη μεγιστοποίηση της κάλυψης και της κ-κάλυψης σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και αξιολογείται η αποτελεσματικότητά τους σε συγκεκριμένα σενάρια λειτουργίας που προσομοιώθηκαν.

3.2. Εισαγωγικές Θεωρήσεις

Όπως αναφέρθηκε ήδη σε προγενέστερο σημείο, σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η εύρεση βέλτιστης λύσης στο πρόβλημα, το οποίο αφορά τη μεγιστοποίηση της κάλυψης ενός τετραγωνικού δισδιάστατου χώρου που ελέγχεται από ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

Για την εύρεση λύσης σε αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, οι γενετικοί αλγόριθμοι και ο αλγόριθμος PSO, που είναι βασισμένοι σε νόμους και αρχές που διέπουν φυσικά φαινόμενα και ζωντανούς οργανισμούς.

Βασική προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία των αλγορίθμων ελέγχου αποτελεί η γνώση των χαρακτηριστικών του χώρου στον οποίο τοποθετείται το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, καθώς και το πλήθος και η συμπεριφορά των αισθητήρων που το αποτελούν. Στη συγκεκριμένη εργασία, θεωρήθηκε ότι ο χώρος στον οποίο βρίσκονται οι αισθητήρες είναι τετραγωνικός, δισδιάστατος και δεν υπάρχουν εμπόδια στο εσωτερικό του. Επομένως οι αισθητήρες του δικτύου δεν περιορίζονται ως προς τη θέση στην οποία μπορούν να τοποθετηθούν εφόσον παραμένουν μέσα στα όρια του χώρου, και η ακτίνα αίσθησής τους δεν επηρεάζεται από εξωγενείς παράγοντες. Σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τις τελικές θέσεις των αισθητήρων, είναι η ύπαρξη σημείων υψηλού ενδιαφέροντος στο χώρο, τα οποία απαιτούν κ- κάλυψη. Η λειτουργία των αισθητήρων βασίζεται στο δυαδικό μοντέλο αίσθησης, σύμφωνα με το οποίο οι αισθητήρες έχουν πλήρη ικανότητα ανίχνευσης μέσα στην ακτίνα αίσθησής τους. Ο καθένας από τους αλγόριθμους, που σχεδιάστηκαν με βάση αυτά τα δεδομένα, εκτελείται σε ένα κεντρικό υπολογιστικό σύστημα και αποσκοπεί στο να:

- Μεγιστοποιεί την κάλυψη ενός χώρου με χρήση ενός συγκεκριμένου αριθμού αισθητήρων
- Επιτυγχάνει κ- κάλυψη σε προκαθορισμένα σημεία του χώρου ενδιαφέροντος

Βασικά σημεία κατά την επίλυση τέτοιου τύπου προβλημάτων με χρήση μεθόδων υπολογιστικής νοημοσύνης αποτελούν η κωδικοποίηση της πληροφορίας εισόδου και η εύρεση κατάλληλης συνάρτησης που να περιγράφει την συμπεριφορά του προβλήματος.

3.3. Κωδικοποίηση της πληροφορίας

Ένα από τα βασικά σημεία κατά τη μοντελοποίηση ενός φυσικού προβλήματος, είναι ο τρόπος με τον οποίο θα κωδικοποιηθούν οι παράγοντες που το επηρεάζουν. Επίσης, αποτελεί βασική προϋπόθεση το να δοθεί η δυνατότητα στον χρήστη να ελέγχει κάποιες από τις παραμέτρους ώστε να διαμορφωθεί το προς επίλυση σενάριο.

Στον αλγόριθμο GA, σε κάθε χρωμόσωμα κωδικοποιείται και μία πιθανή λύση για το πρόβλημα της κάλυψης και κ-κάλυψης και η τελική λύση του προβλήματος αντιπροσωπεύει τις βέλτιστες θέσεις στις οποίες θα πρέπει να τοποθετηθούν οι αισθητήρες. Η θέση του κάθε αισθητήρα στον δισδιάστατο χώρο, προσδιορίζεται από ένα ζεύγος συντεταγμένων (x, y) και αν ο αριθμός των αισθητήριων κόμβων που συμμετέχουν στο δίκτυο είναι M , τότε για τον προσδιορισμό της θέσης τους απαιτούνται M ζεύγη συντεταγμένων. Επίσης, αν υπάρχουν N σημεία που απαιτούν κ- κάλυψη, τότε χρειάζονται N τριάδες τιμών, όπου κάθε τριάδα αποτελείται από τις συντεταγμένες του σημείου στο χώρο και τον αριθμό k που ορίζει την απαραίτητη κάλυψη για το σημείο. Όλες οι παραπάνω μεταβλητές, μαζί με κάποιες ακόμη που είναι απαραίτητες για τους υπολογισμούς του αλγορίθμου, αποτελούν την πληροφορία που κωδικοποιείται σε κάθε χρωμόσωμα του αλγορίθμου GA και απεικονίζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Κωδικοποίηση της πληροφορίας του χρωμοσώματος

VAR	BOUND	Sampling Analysis	kC	lxy-uxy	kCx	kCy	kCc	rs
------------	--------------	--------------------------	-----------	----------------	------------	------------	------------	-----------

όπου:

- **VAR** : ο αριθμός των αισθητήριων κόμβων
- **BOUND**: τα όρια του τετραγωνικού χώρου
- **Sampling Analysis**: ο ρυθμός δειγματοληψίας του χώρου
- **kC**: ο αριθμός των σημείων που απαιτούν κ-κάλυψη
- **lxy-uxy**: πίνακας που περιέχει τα άνω και κάτω όρια των τιμών των (x, y) συντεταγμένων των αισθητήριων κόμβων
- **kCx**: πίνακας που περιέχει τις x συντεταγμένες των σημείων που απαιτούν κ- κάλυψη

- **kCy**: πίνακας που περιέχει τις γ συντεταγμένες των σημείων που απαιτούν κ- κάλυψη
- **kCc**: πίνακας που περιέχει την κ-κάλυψη των σημείων
- **rs**: πίνακας που περιέχει τις ακτίνες αίσθησης των αισθητήριων κόμβων

Στον αλγόριθμο PSO αντίστοιχα, η ίδια πληροφορία κωδικοποιείται στα σωματίδια του σμήνους.

3.4. Συνάρτηση καταλληλότητας

Η συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function) αξιολογεί την ποιότητα της λύσης που είναι κωδικοποιημένη στο χρωμόσωμα ή στο σωματίδιο. Η πληροφορία που υπάρχει κωδικοποιημένη στην είσοδο της συνάρτησης καταλληλότητας, αποκωδικοποιείται δίνοντας τη δυνατότητα στη συνάρτηση να επεξεργαστεί τις μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος.

Το πρόβλημα που υπολογίζει ο αλγόριθμος είναι πρόβλημα ελαχιστοποίησης, όπου στόχος είναι η ελαχιστοποίηση των κενών κάλυψης, δεδομένου ότι έχει ικανοποιηθεί η απαίτηση της κ-κάλυψης. Έτσι, χρησιμοποιούνται δύο αλγόριθμοι, ένας που υπολογίζει την κ- κάλυψη και ένας που υπολογίζει το εμβαδόν κάλυψης.

Υπολογισμός κ- κάλυψης:

Ο αλγόριθμος υπολογισμού της, ελέγχεται ο αριθμός των σημείων που απαιτούν κ- κάλυψη και στη συνέχεια ο βαθμός κάλυψης που απαιτεί το κάθε ένα από αυτά. Ο αλγόριθμος, δεσμεύει τον απαραίτητο αριθμό αισθητήρων από τους συνολικά διαθέσιμους, ο οποίος είναι ίσος με τον βαθμό κάλυψης του κάθε σημείου, με αυθαίρετο τρόπο, κρατώντας στη μνήμη του τους αισθητήρες που έχει ήδη χρησιμοποιήσει για την κάλυψη προηγούμενων σημείων. Ελέγχεται κάθε φορά η Ευκλείδεια απόσταση που απέχει από το κάθε σημείο η δεσμευμένη –για κάλυψη του σημείου– ομάδα αισθητήρων. Αν πραγματοποιηθεί η απαιτούμενη κάλυψη του σημείου τότε, μετά τον έλεγχο προκύπτει απόσταση ίση με μηδέν. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, υπολογίζεται το άθροισμα των αποστάσεων των αισθητήρων από το σημείο. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα σημεία που απαιτούν κ- κάλυψη. Η τιμή που επιστρέφει η συνάρτηση είναι το αλγεβρικό άθροισμα όλων των αποστάσεων που έχουν υπολογιστεί από όλα τα σημεία. Εύκολα προκύπτει ότι αν καλυφθούν όλα τα σημεία, τότε η συνάρτηση επιστρέφει την τιμή μηδέν. Η λογική με βάση την οποία υλοποιήθηκε ο αλγόριθμος υπολογισμού της κ-κάλυψης παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.

KcoverageCalculation:

Άθροισμα = 0

Απόσταση = 0

Για κάθε σημείο ενδιαφέροντος που απαιτεί κ- κάλυψη

Για K ίσο με τον απαιτούμενο αριθμό κ- κάλυψης του σημείου ενδιαφέροντος

δ = Υπολογισμός της απόστασης μεταξύ του κόμβου και του σημείου ενδιαφέροντος

Αν ο κόμβος δεν καλύπτει το σημείο

Απόσταση = Απόσταση + δ

Τέλος

Τέλος

Τέλος

Επίστρεψε την Απόσταση

Τέλος

Εικόνα 6. Συνάρτηση κ- κάλυψης

Υπολογισμός εμβαδού κάλυψης:

Η λογική που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό του εμβαδού κάλυψης βασίζεται στη δειγματοληψία του χώρου. Ειδικότερα, όσο περισσότερα είναι τα σημεία του χώρου που καλύπτονται από αισθητήρες, τόσο μεγαλύτερη είναι και η κάλυψη του χώρου. Αρχικά, για κάθε σημείο, εξετάζεται αν έστω και ένας από τους διαθέσιμους αισθητήρες το καλύπτει. Εάν υπάρχει κάλυψη στο σημείο, τότε το εμβαδόν κάλυψης αυξάνεται κατά ένα, διαφορετικά αυξάνεται το κενό κάλυψης. Αφού έχει γίνει έλεγχος για όλα τα σημεία του χώρου, ο αλγόριθμος επιστρέφει το εμβαδόν κάλυψης.

Η δομή του αλγορίθμου εμφανίζεται στην Εικόνα 7:

CoverageCalculation:

κάλυψη = 0

Για κάθε σημείο του τετραγωνικού χώρου

Για κάθε κόμβο που έχει τοποθετηθεί

Αν ο κόμβος καλύπτει το σημείο

κάλυψη = κάλυψη+ 1

Τέλος

Τέλος

Τέλος

Επέστρεψε την κάλυψη

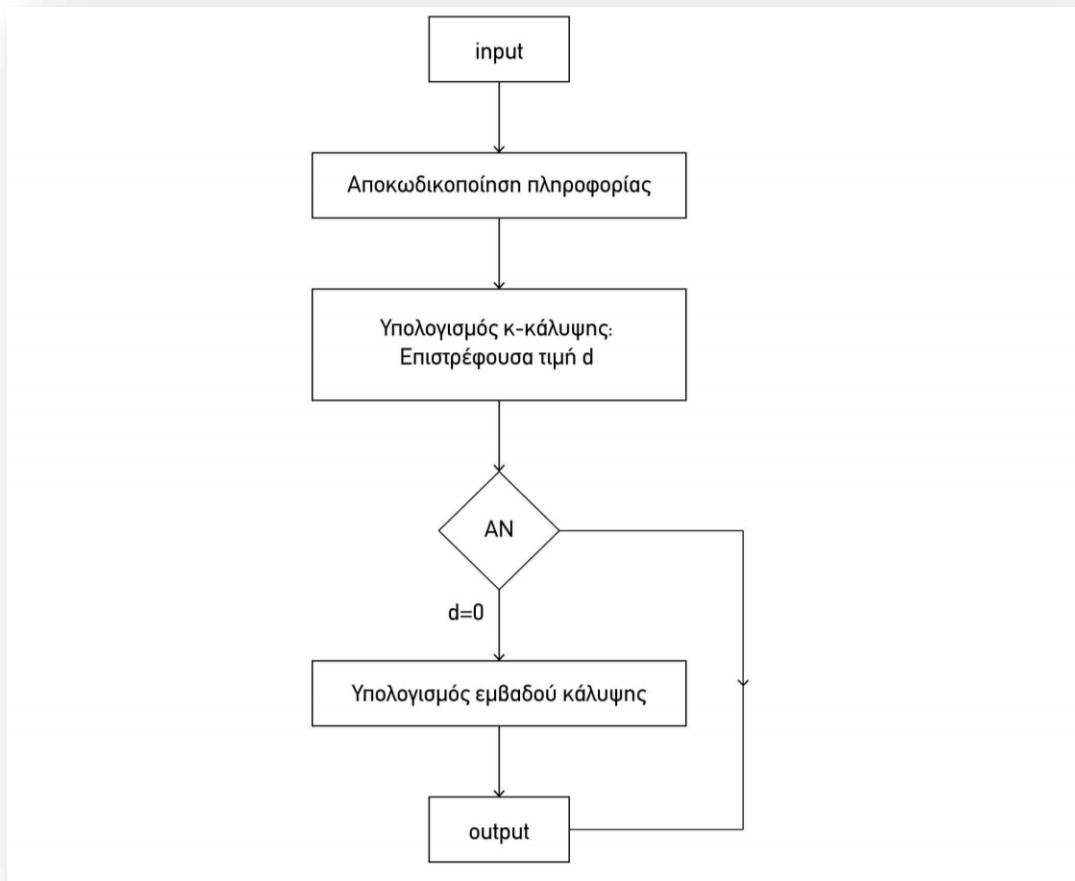
Τέλος

Εικόνα 7. Συνάρτηση Υπολογισμού Κάλυψης

Υπολογισμός συνάρτησης καταλληλότητας:

Πρώτο βήμα κατά την εκτέλεση της συνάρτησης καταλληλότητας είναι ο υπολογισμός της κ- κάλυψης των σημείων που έχουν καθοριστεί από τον χρήστη. Αν η έξοδος της, είναι διαφορετική του μηδενός, ο αλγόριθμος τερματίζεται επιστρέφοντας την τιμή αυτή. Στην περίπτωση που η έξοδος της συνάρτησης πάρει την τιμή μηδέν, τότε μόνο συνεχίζει στον υπολογισμό του εμβαδού κάλυψης. Η μεθοδολογία αυτή επιλέχθηκε διότι ικανοποιεί με ιεραρχία τους στόχους του προβλήματος εξασφαλίζοντας ότι πρώτα θα βρεθεί λύση για την κ- κάλυψη των σημείων και με δεδομένο ότι αυτή υπάρχει, θα προχωρήσει σε εύρεση λύσης για την ελαχιστοποίηση του κενού κάλυψης.

Μέσω της εκτέλεσης των αλγορίθμων GA και PSO, γίνεται προσπάθεια ελαχιστοποίησης του αποτελέσματος της εξόδου της συνάρτησης καταλληλότητας. Έτσι, οι περιπτώσεις στις οποίες δεν έχει ικανοποιηθεί η κ- κάλυψη των σημείων, ή το εμβαδόν κάλυψης είναι μικρό, δεν αποτελούν καλές λύσεις του προβλήματος και απορρίπτονται. Η λογική πάνω στην οποία βασίστηκε η υλοποίηση της συνάρτησης καταλληλότητας παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8. Διάγραμμα ροής της συνάρτησης καταλληλότητας

3.5. Πειράματα προσομοίωσης και αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο, υπολογίζεται η αποδοτικότητα των γενετικών αλγορίθμων (GA) καθώς και του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) για την μεγιστοποίηση της κάλυψης και της κ-κάλυψης μιας τετραγωνικής περιοχής δύο διαστάσεων μέσα από την εκτέλεση πειραμάτων προσομοίωσης στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab.

Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν τέσσερα σενάρια όπου οι δύο προαναφερόμενοι αλγόριθμοι συγκρίνονται μεταξύ τους και τρία σενάρια στα οποία πραγματοποιείται μια σύγκριση με τα αποτελέσματα των πειραμάτων που προέκυψαν από την εργασία [24]. Για κάθε συνδυασμό παραμέτρων, πραγματοποιήθηκε μια σειρά 30 εκτελέσεων των πειραμάτων, όπου από εκεί επιλέχθηκαν οι τιμές με τα καλύτερα αποτελέσματα ως οι τελικές τιμές για τις παραμέτρους ελέγχου.

Οι τελικές τιμές που επιλέχθηκαν ως παράμετροι ελέγχου για τον GA αλγόριθμο συνοψίζονται στον Πίνακα 2:

Πίνακας 2. Παράμετροι ελέγχου για τον αλγόριθμο GA

Παράμετροι ελέγχου	Συναρτήσεις / τιμές
Συνάρτηση δημιουργίας αρχικού πληθυσμού	'CreationLinearFeasible'
Συνάρτηση επιλογής	'SelectionStochUnif'
Συνάρτηση διασταύρωσης	'CrossoverScattered'
Αναλογία διασταύρωσης	0.5
Συνάρτηση μετάλλαξης	'MutationAdaptFeasible'
Μέγεθος πληθυσμού	[200 , 600]
Συνάρτηση ελάχιστης μεταβολής της συνάρτησης καταλληλότητας	0.01 (για 50 γενιές)

Ο αρχικός πληθυσμός χρωμοσωμάτων δημιουργείται με τυχαίο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται τα όρια και οι γραμμικοί περιορισμοί, αν υπάρχουν. Στη συνέχεια, για την επιλογή των καλύτερων γονέων χρησιμοποιείται μία στοχαστική μέθοδος κατά την οποία τα χρωμοσώματα του πληθυσμού τοποθετούνται ως διαδοχικά ευθύγραμμα τμήματα πάνω σε μία ευθεία γραμμή ώστε το μήκος κάθε τμήματος να είναι ανάλογο της καταλληλότητας του αντίστοιχου χρωμοσώματος. Ο αλγόριθμος κινείται κατά μήκος της γραμμής κάνοντας βήματα ίσου μεγέθους και σε κάθε βήμα επιλέγει τον γονέα που αντιστοιχίζεται στο ευθύγραμμο τμήμα πάνω στο οποίο προσγειώνεται. Το πρώτο βήμα είναι ένας τυχαίος αριθμός, μικρότερος από το μέγεθος βήματος. Έπειτα, κατά τη διαδικασία της διασταύρωσης δημιουργείται ένα τυχαίο δυαδικό διάνυσμα ίδιου μεγέθους με τα χρωμοσώματα και στα σημεία στα οποία το τυχαίο διάνυσμα έχει την τιμή 1 επιλέγονται γονίδια του πρώτου γονέα, ενώ όπου έχει τιμή 0 επιλέγονται τα γονίδια του δεύτερου γονέα. Τα επιλεγμένα γονίδια συνδυάζονται ώστε να προκύψει το χρωμόσωμα- γόνος. Για τη διαδικασία της μετάλλαξης επιλέχθηκε μία συνάρτηση τέτοια ώστε να λαμβάνει υπόψιν τα όρια και τους περιορισμούς που ενδεχομένως να υπάρχουν. Το μέγεθος του πληθυσμού διαφέρει ανάλογα με την πολυπλοκότητα του προβλήματος.

Αντίστοιχα, στις βασικές παραμέτρους ελέγχου του αλγορίθμου PSO δόθηκαν οι τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Παράμετροι ελέγχου για τον αλγόριθμο PSO

Συνάρτηση δημιουργίας αρχικού σμήνους	'pswcreationuniform'
Αδρανειακό βάρος (w)	[0,1 , 1,1]
Συντελεστής γνωστικού όρου c_1 (νοσταλγία)	1,49
Συντελεστής κοινωνικού όρου c_2 (ζήλεια)	1,49
Μέγεθος σμήνους	[200 , 600]
Συνάρτηση ελάχιστης μεταβολής της συνάρτησης καταλληλότητας	0,01 (για 20 συνεχόμενες επαναλήψεις)

Ο αρχικός πληθυσμός του σμήνους αρχικά τοποθετήθηκε, έχοντας τα σωματίδια πάρει ομοιόμορφα κατανεμημένες τυχαίες θέσεις στον χώρο λαμβάνοντας υπόψιν τα όρια του. Οι σταθερές του κοινωνικού και του γνωστικού όρου (c_1 και c_2) επιλέχθηκαν να έχουν την ίδια τιμή, καθώς τα σωματίδια είναι πιο αποδοτικά όταν αυτές οι σταθερές συνυπάρχουν αρμονικά. Από την άλλη μεριά το αδρανειακό βάρος αλλάζει γραμμικά έτσι ώστε η αρχική τιμή, η οποία είναι υψηλή, να βοηθάει στην ολική εξερεύνηση, ενώ αυτή η τιμή μειώνεται στην διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου με στόχο να ενισχύσει την τοπική εξερεύνηση. Το πλήθος του σμήνους ποικίλει ανάλογα με την συνθετότητα του προβλήματος. Γι' αυτόν τον λόγο στα δύο πρώτα προβλήματα, τα οποία ήταν σχετικά πιο εύκολα, το μέγεθος του σμήνους επιλέχθηκε να είναι ίσο με 200 σωματίδια, ενώ στα τελευταία δύο πιο δύσκολα προβλήματα, το μέγεθος σμήνους επιλέχθηκε ίσο με 600 σωματίδια. Στα προβλήματα 1 και 3 όλοι οι κόμβοι είχαν ομοιόμορφη ακτίνα αίσθησης, ενώ στα 2 και 4 οι κόμβοι παρουσίαζαν ανομοιόμορφη ακτίνα αίσθησης.

Σε κάθε πρόβλημα, οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν 30 φορές και η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση καθώς και ο μέσος χρόνος υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται στους αντίστοιχους πίνακες μαζί με την καλύτερη τιμή που υπολογίστηκε για το εμβαδόν κάλυψης σε κάθε ένα από τα προβλήματα που εξετάστηκαν. Επιπρόσθετα στον ίδιο πίνακα αναγράφονται πληροφορίες που αφορούν στο πόσες φορές αξιολογήθηκε η συνάρτηση καταλληλότητας καθώς και στην τυπική απόκλιση της μέτρησης της καταλληλότητας για κάθε πείραμα. Επίσης οι τελικές βέλτιστες - από άποψη μεγιστοποίησης της κάλυψης- θέσεις που παίρνουν οι κόμβοι στον χώρο μετά από τις 30 επαναλήψεις απεικονίζονται σε ανάλογα γραφήματα. Επιπλέον παρουσιάζεται μια γραφική

παράσταση που απεικονίζει την καταλληλότητα σε σχέση με τις επαναλήψεις του αλγορίθμου, για την καλύτερη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας που υπολογίστηκε ανάμεσα στις 30 εκτελέσεις του πειράματος. Όσον αφορά στα τέσσερα πρώτα πειράματα, πρέπει να σημειωθεί ότι η σειρά με την οποία παρουσιάζονται ακολουθεί μια κλιμακούμενη δυσκολία ξεκινώντας από το πιο εύκολο, ενώ τα τρία τελευταία παρουσιάζονται με την ίδια σειρά που ακολουθήθηκε και στο [24]. Τέλος σε όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν, το ιδανικό εμβαδόν κάλυψης υπολογίζεται ως το άθροισμα των εμβαδών κάλυψης των διαθέσιμων κόμβων, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι επικαλύψεις που δημιουργούνται ανάμεσά τους. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, έγινε σύγκριση της απόδοσης των αλγορίθμων. Ειδικότερα, στις τέσσερις πρώτες, οι ανταγωνιστικές μεθοδολογίες είναι αυτές του GA αλγορίθμου και του PSO αλγορίθμου, ενώ στις τρεις τελευταίες η σύγκριση γίνεται μεταξύ των δύο προτεινόμενων αλγορίθμων και των αλγορίθμων που παρουσιάζονται στις εργασίες [23] και [24]. Η σύγκριση αυτή διεξήχθη χρησιμοποιώντας την t-test μεθοδολογία. Αυτή η μεθοδολογία βασίζεται στον υπολογισμό της τιμής p-value, που δείχνει πόσο συμβατά είναι τα δεδομένα, με μια υπόθεση γνωστή ως μηδενική υπόθεση. Ως μηδενική υπόθεση θεωρείται ότι οι δύο ανταγωνιστικοί αλγόριθμοι παράγουν το ίδιο αποτέλεσμα.

3.5.1. Πείραμα 1

Στόχος του πρώτου πειράματος είναι η μεγιστοποίηση της κάλυψης σε έναν τετραγωνικό χώρο δύο διαστάσεων 20 x 20. Ο αριθμός των διαθέσιμων κόμβων είναι ίσος με 35 και η ακτίνα αίσθησης ίση με 1,5. Το μέγεθος του πληθυσμού στον GA αλγόριθμο επιλέχθηκε να είναι ίσο με 200 και αντίστοιχα, το πλήθος του σμήνους στον PSO αλγόριθμο να είναι ίσο με 200.

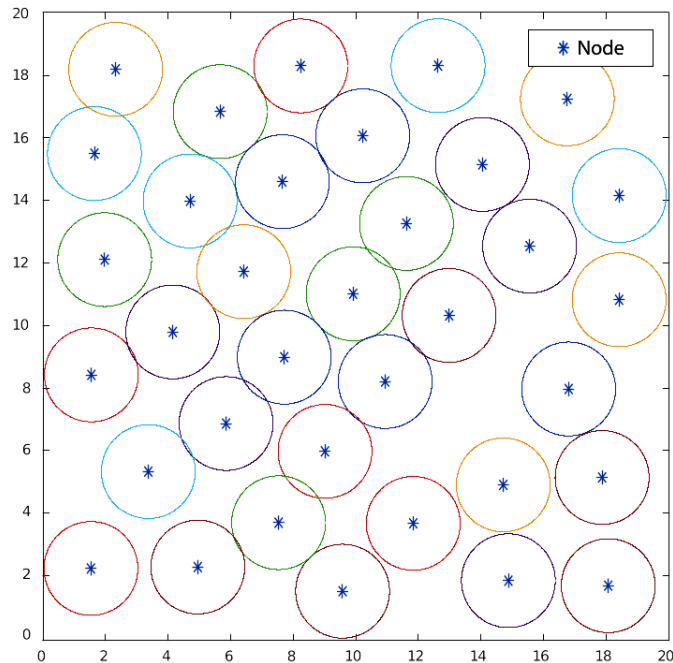
Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα προσομοιώσεων του πειράματος 1

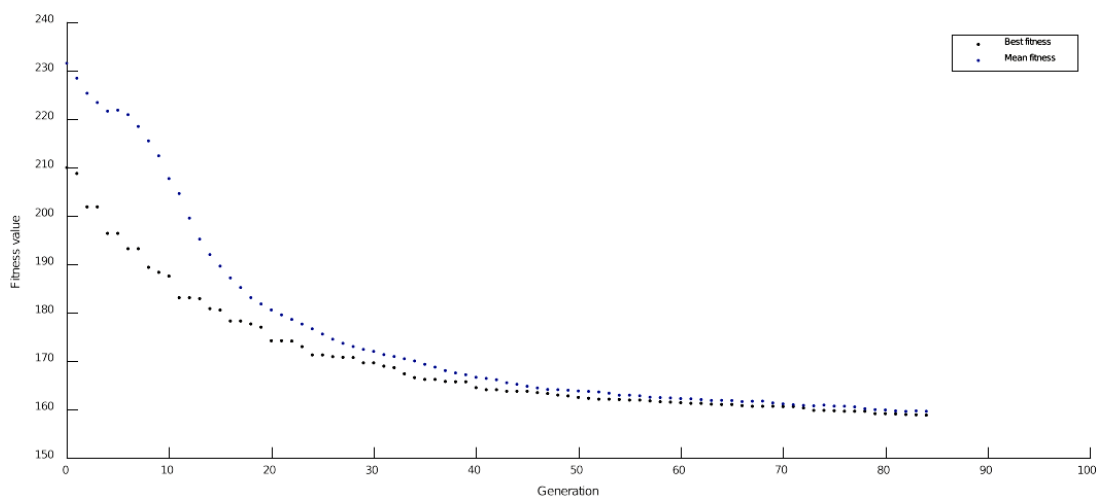
Παράμετροι	GA	PSO
Μέση τιμή	61.17	60.92
Τυπική απόκλιση	0.28	0.46
Μέσος χρόνος (sec)	1.52	2.18
Μέση τιμή συνάρτησης καταλληλότητας	17,200	27,400
Τυπική απόκλιση συνάρτησης καταλληλότητας	865	2300
Καλύτερη τιμή συνάρτησης καταλληλότητας	61.56	61.49

p-value	0.00
Ιδανικό εμβαδό κάλυψης	61.85

Επιπρόσθετα, οι βέλτιστες θέσεις του δικτύου που υπολογίστηκαν με την χρήση του GA αλγορίθμου παρουσιάζονται στην Εικόνα 9 ενώ η καλύτερη καθώς και η μέση τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε γενιά παρουσιάζονται στην Εικόνα 10.

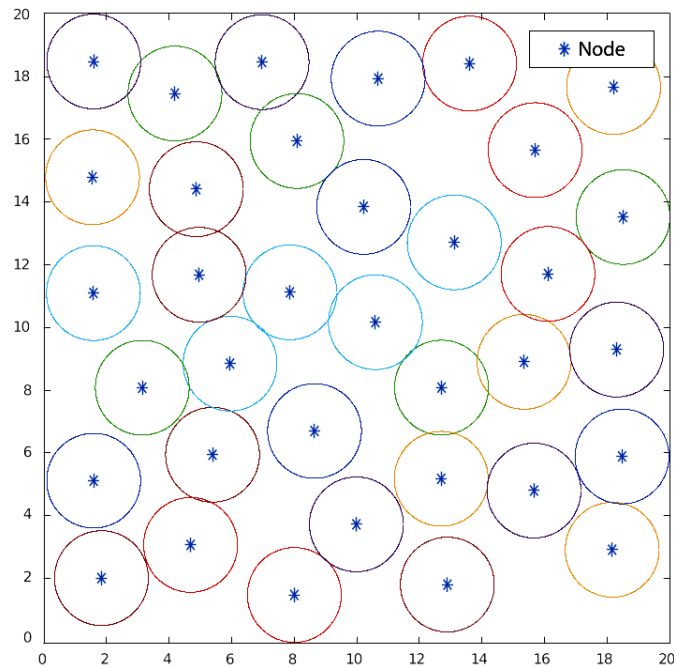


Εικόνα 9. Βέλτιστη θέση των κόμβων με την χρήση του GA αλγορίθμου για το πείραμα 1

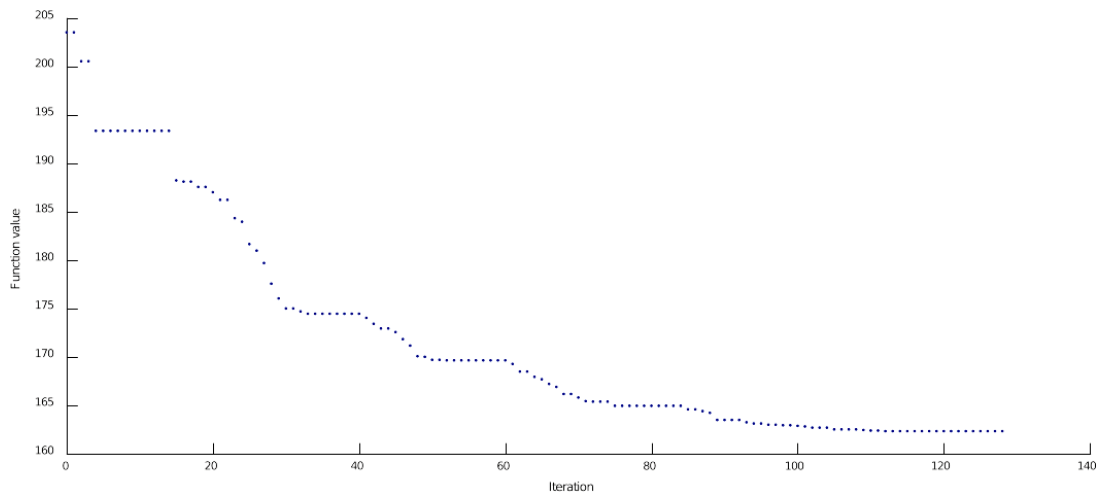


Εικόνα 10. Μέσες και καλύτερες τιμές συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε γενιά του GA στο πείραμα 1

Ομοίως, οι βέλτιστες θέσεις του δικτύου που υπολογίστηκαν με την χρήση του PSO αλγορίθμου παρουσιάζονται στην Εικόνα 11 ενώ η καλύτερη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε επανάληψη παρουσιάζεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 11. Βέλτιστη θέση των κόμβων με την χρήση του PSO αλγορίθμου για το πείραμα 1



Εικόνα 12. Καλύτερες τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε επανάληψη του PSO στο πείραμα 1

3.5.2. Πείραμα 2

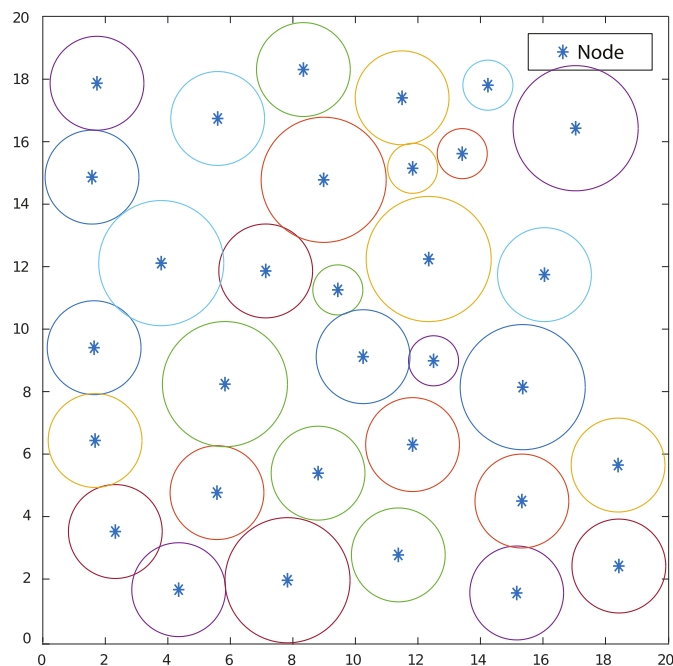
Στόχος του δεύτερου πειράματος είναι η μεγιστοποίηση της κάλυψης σε έναν τετραγωνικό χώρο δύο διαστάσεων 20×20 . Ο αριθμός των διαθέσιμων κόμβων είναι ίσος με 32 και η ακτίνα αίσθησης εναλλάσσεται μεταξύ 0.8 και 2. Ειδικότερα, πέντε κόμβοι έχουν ακτίνα αίσθησης ίση με 0,8, είκοσι κόμβοι ίση με 1,5 και οι τελευταίοι επτά ίση με 2. Το μέγεθος του πληθυσμού στον GA αλγόριθμο επιλέχθηκε να είναι ίσο με 200 και το πλήθος του σμήνους στον PSO αλγόριθμο να είναι ίσο με 200 αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 5.

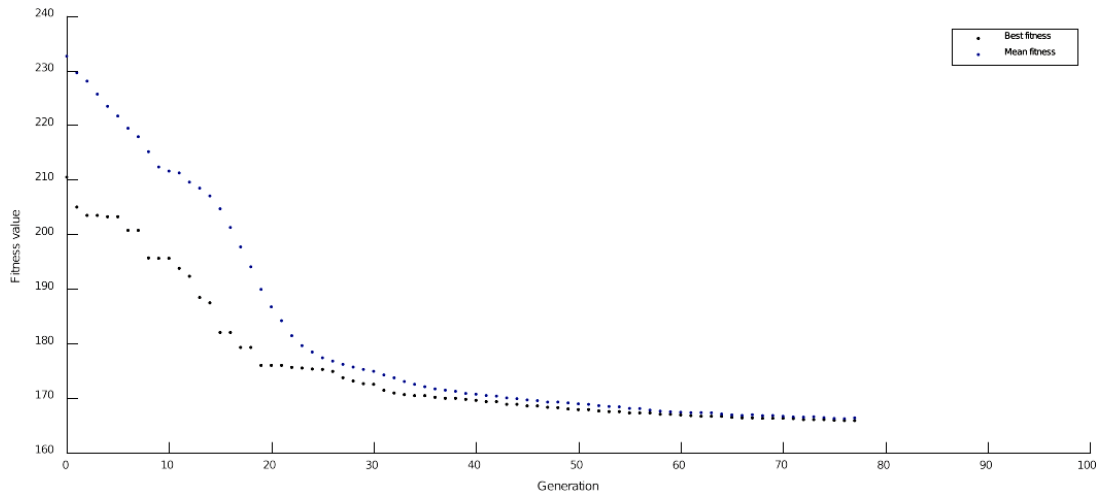
Πίνακας 5. Αποτελέσματα προσομοιώσεων του πειράματος 2

Παράμετροι	GA	PSO
Μέση τιμή	59.37	58.83
Τυπική απόκλιση	0.18	0.38
Μέσος χρόνος (sec)	1.43	2.18
Μέση τιμή συνάρτησης καταλληλότητας	16,000	27,200
Τυπική απόκλιση συνάρτησης καταλληλότητας	693	3020
Καλύτερη τιμή συνάρτησης καταλληλότητας	59.69	59.32
p-value	0.00	
Ιδανικό εμβαδό κάλυψης	59.85	

Επιπρόσθετα, οι βέλτιστες θέσεις του δικτύου που υπολογίστηκαν με την χρήση του GA αλγορίθμου παρουσιάζονται στην Εικόνα 13 ενώ η καλύτερη καθώς και η μέση τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε γενιά παρουσιάζονται στην Εικόνα 14.

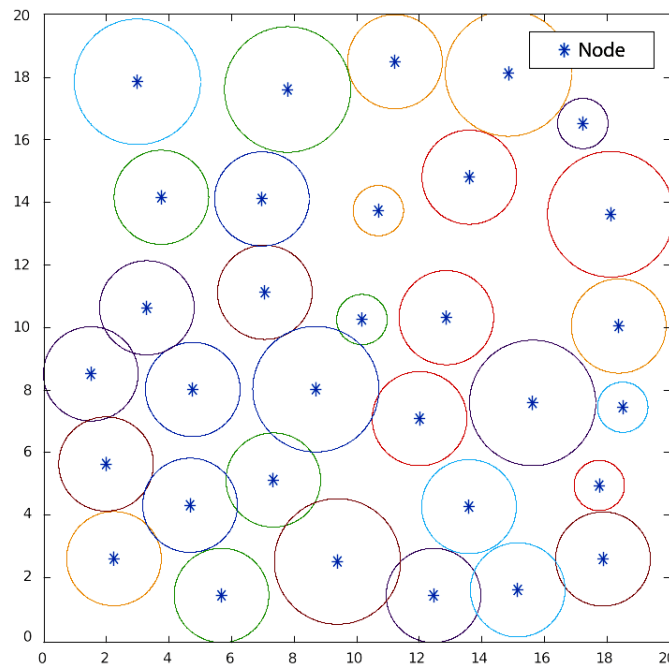


Εικόνα 13. Βέλτιστη θέση των κόμβων με την χρήση του GA αλγορίθμου για το πείραμα 2

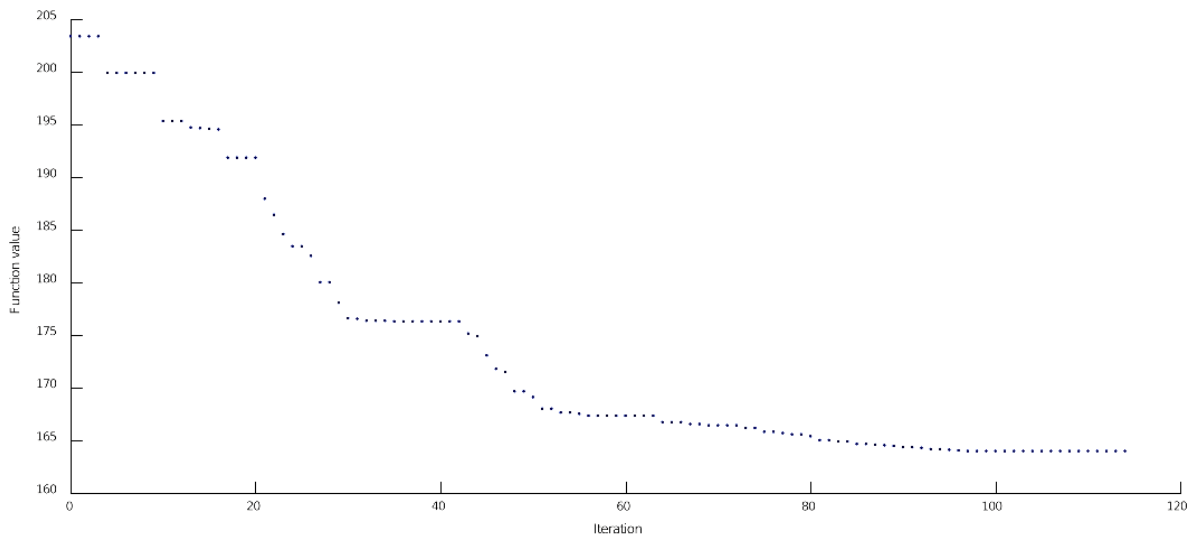


Εικόνα 14. Μέσες και καλύτερες τιμές συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε γενιά του GA στο πείραμα 2

Ομοίως, οι βέλτιστες θέσεις του δικτύου που υπολογίστηκαν με την χρήση του PSO αλγορίθμου παρουσιάζονται στην Εικόνα 15 ενώ οι καλύτερη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε επανάληψη παρουσιάζεται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 15. Βέλτιστη θέση των κόμβων με την χρήση του PSO αλγορίθμου για το πείραμα 2



Εικόνα 16. Καλύτερες τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε επανάληψη του PSO στο πείραμα 2

3.5.3. Πείραμα 3

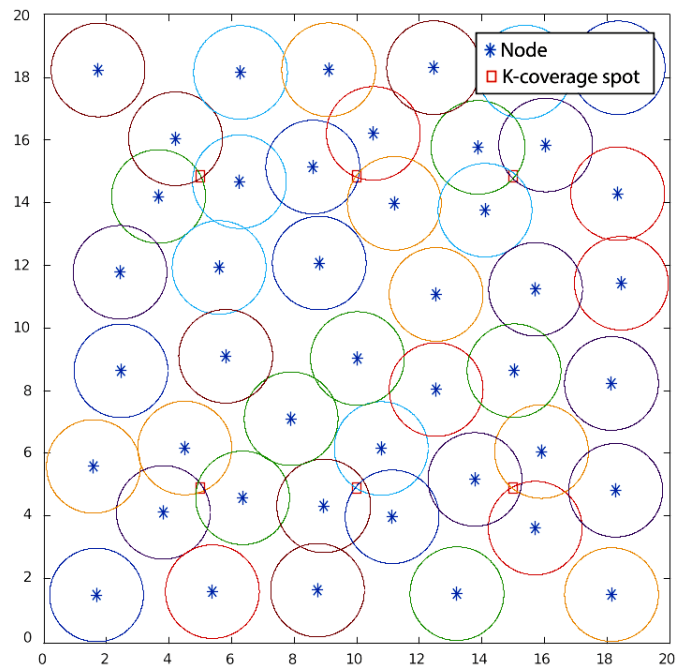
Στόχος του τρίτου πειράματος είναι η μεγιστοποίηση της κάλυψης σε έναν τετραγωνικό χώρο δύο διαστάσεων 20×20 δεδομένου ότι ικανοποιεί την κ-κάλυψη σε έξι προκαθορισμένα σημεία. Ειδικότερα, τα σημεία $(5, 5)$, $(10, 5)$, $(15, 5)$, $(5, 15)$, $(10, 15)$ και $(15, 15)$ πρέπει να έχουν τρία-κάλυψη το καθένα. Ο αριθμός των διαθέσιμων κόμβων είναι ίσος με 45 και η ακτίνα αίσθησης ίση με 1,5. Το μέγεθος του πληθυσμού στον GA αλγόριθμο επιλέχθηκε να είναι ίσο με 600 και το πλήθος του σμήνους στον PSO αλγόριθμο ίσο με 600 αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 6.

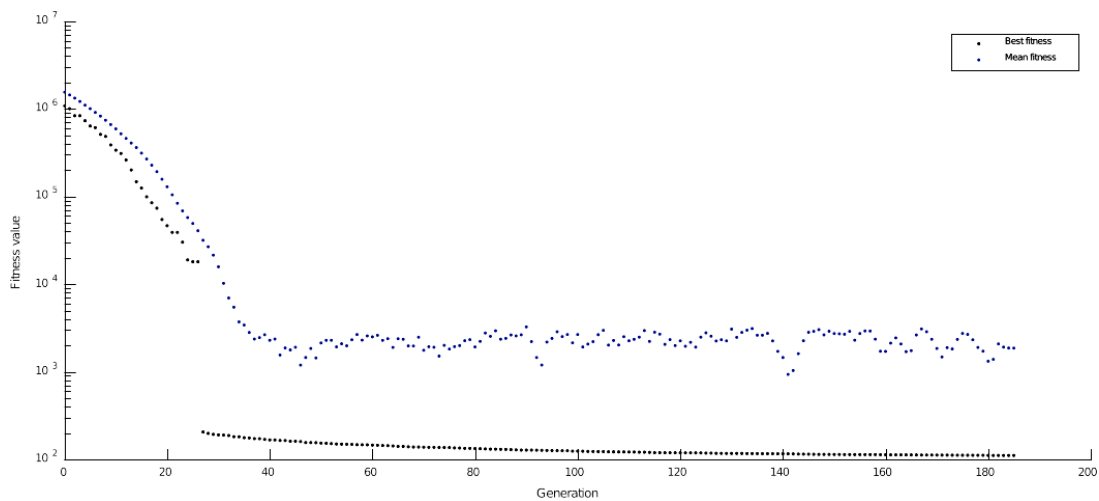
Πίνακας 6. Αποτελέσματα προσομοιώσεων του πειράματος 3

Παράμετροι	GA	PSO
Μέση τιμή	73.07	72.13
Τυπική απόκλιση	0.66	0.85
Μέσος χρόνος (sec)	7.6	5.15
Μέση τιμή συνάρτησης καταλληλότητας	114,260	139,960
Τυπική απόκλιση συνάρτησης καταλληλότητας	12,300	12,700
Καλύτερη τιμή συνάρτησης καταλληλότητας	74.28	73.77
p-value	0.00	
Ιδανικό εμβαδό κάλυψης	79.52	

Επιπρόσθετα, οι βέλτιστες θέσεις του δικτύου που υπολογίστηκαν με την χρήση του GA αλγορίθμου παρουσιάζονται στο Εικόνα 17 ενώ η καλύτερη καθώς και η μέση τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε γενιά παρουσιάζονται στην Εικόνα 18.

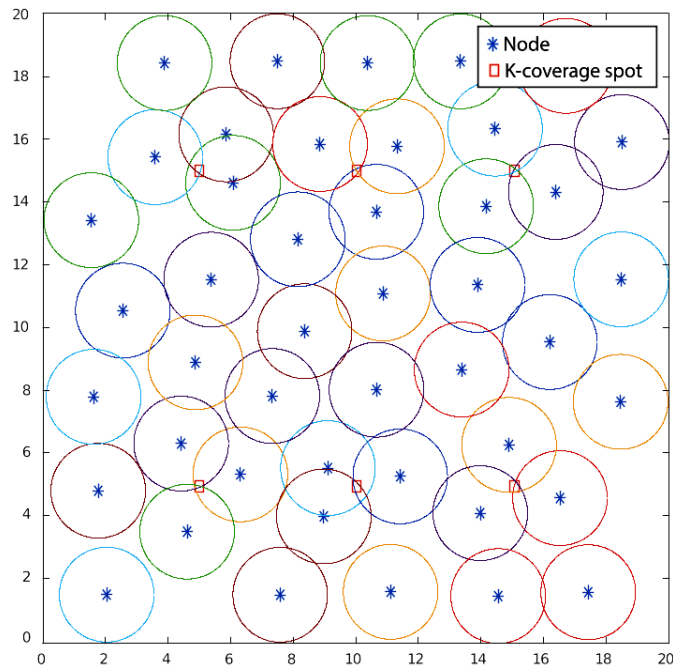


Εικόνα 17. Βέλτιστη θέση των κόμβων με την χρήση του GA αλγορίθμου για το πείραμα 3

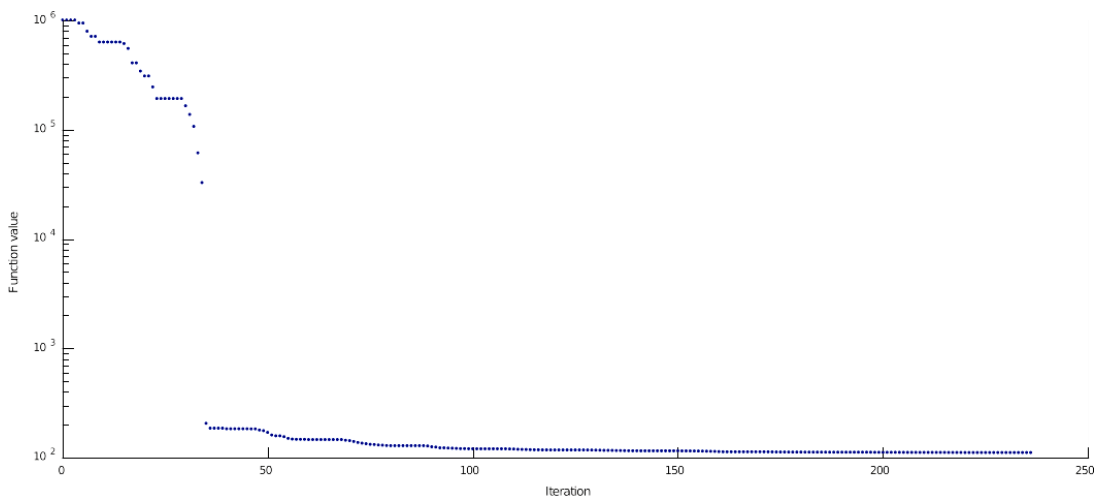


Εικόνα 18. Μέσες και καλύτερες τιμές συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε γενιά του GA στο πείραμα 3

Ομοίως, οι βέλτιστες θέσεις του δικτύου που υπολογίστηκαν με την χρήση του PSO αλγορίθμου παρουσιάζονται στην Εικόνα 19 ενώ η καλύτερη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε επανάληψη παρουσιάζεται στην Εικόνα 20.



Εικόνα 19. Βέλτιστη θέση των κόμβων με την χρήση του PSO αλγορίθμου για το πείραμα 3



Εικόνα 20. Καλύτερες τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε επανάληψη του PSO στο πείραμα 3

3.5.4. Πείραμα 4

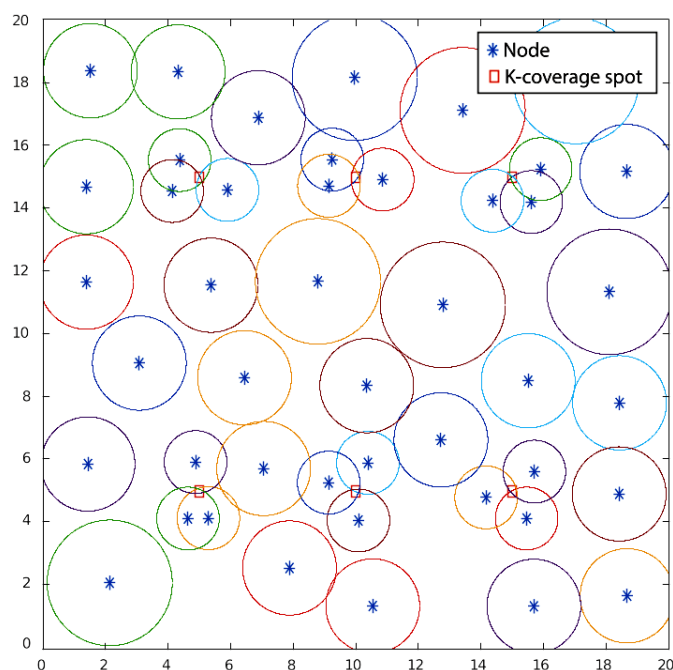
Στόχος του τέταρτου πειράματος είναι η μεγιστοποίηση της κάλυψης σε έναν τετραγωνικό χώρο δύο διαστάσεων 20 x 20 δεδομένου ότι ικανοποιεί την κ-κάλυψη σε έξι προκαθορισμένα σημεία. Ειδικότερα, τα σημεία (5, 5), (10, 5), (15, 5), (5, 15), (10, 15) και (15, 15) πρέπει να έχουν τρία-κάλυψη το καθένα. Ο αριθμός των διαθέσιμων κόμβων είναι ίσος με 45 και η ακτίνα αίσθησης εναλλάσσεται μεταξύ 1 και 2. Επίσης, δεκαοκτώ κόμβοι έχουν ακτίνα αίσθησης ίση με 1, είκοσι κόμβοι ίση με 1,5 και οι τελευταίοι επτά ίση με 2. Το μέγεθος του πληθυσμού στον GA αλγόριθμο επιλέχθηκε να είναι ίσο με 600 και το πλήθος του σμήνους στον PSO ίσο με 600 αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 7.

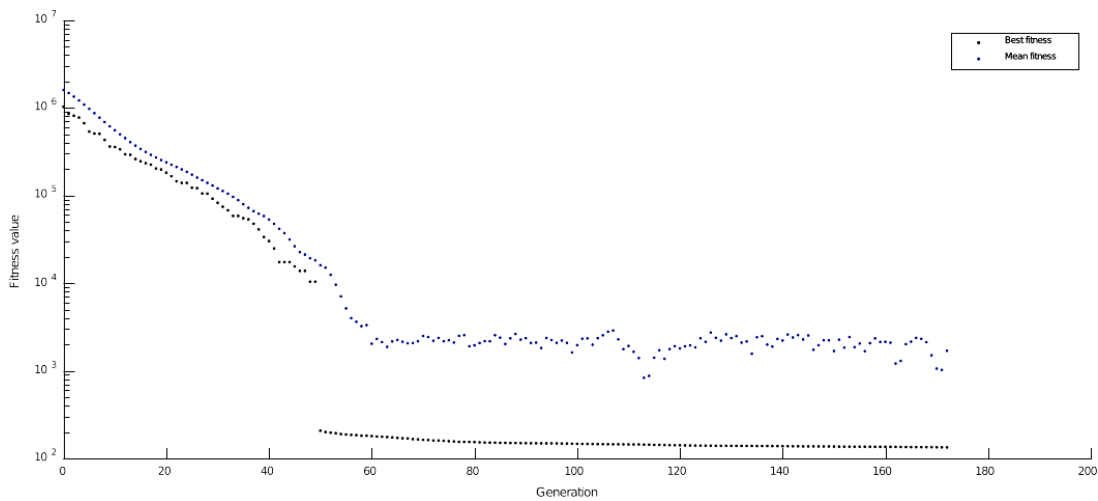
Πίνακας 7. Αποτελέσματα προσομοιώσεων του πειράματος 4

Παράμετροι	GA	PSO
Μέση τιμή	67.39	69.89
Τυπική απόκλιση	0.45	1.15
Μέσος χρόνος (sec)	5.69	6.10
Μέση τιμή συνάρτησης καταλληλότητας	96,340	136,180
Τυπική απόκλιση συνάρτησης καταλληλότητας	1.31 x 10 ⁴	1.88 x 10 ⁴
Καλύτερη τιμή συνάρτησης καταλληλότητας	68.24	71.64
p-value		0.00
Ιδανικό εμβαδό κάλυψης		71.47

Επιπρόσθετα, οι βέλτιστες θέσεις του δικτύου που υπολογίστηκαν με την χρήση του GA αλγορίθμου παρουσιάζονται στο Εικόνα 21 ενώ η καλύτερη καθώς και η μέση τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε γενιά παρουσιάζεται στην Εικόνα 22.

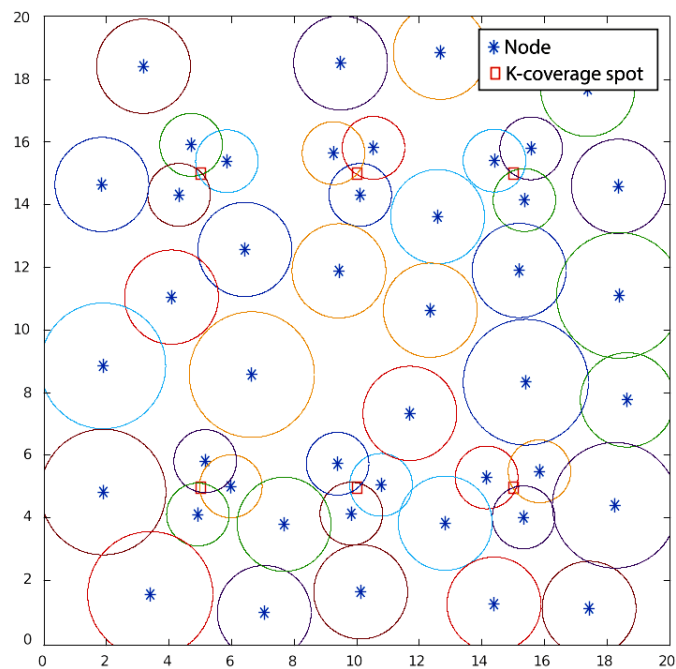


Εικόνα 21. Βέλτιστη θέση των κόμβων με την χρήση του GA αλγορίθμου για το πείραμα 4

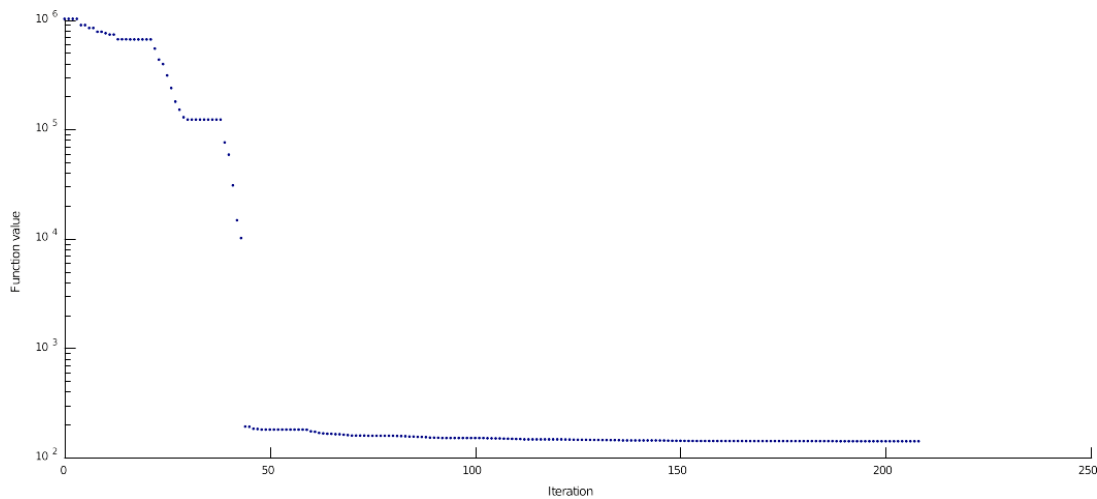


Εικόνα 22. Μέσες και καλύτερες τιμές συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε γενιά του GA στο πείραμα 4

Ομοίως, οι βέλτιστες θέσεις του δικτύου που υπολογίστηκαν με την χρήση του PSO αλγορίθμου παρουσιάζονται στην Εικόνα 23 ενώ η καλύτερη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας για επανάληψη παρουσιάζονται στην Εικόνα 24.



Εικόνα 23. Βέλτιστη θέση των κόμβων με την χρήση του PSO αλγορίθμου για το πείραμα 4



Εικόνα 24. Καλύτερες τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε επανάληψη του PSO στο πείραμα 4

3.5.5. Πείραμα 5

Στόχος του πέμπτου πειράματος είναι η μεγιστοποίηση της κάλυψης σε έναν τετραγωνικό χώρο δύο διαστάσεων 50 x 50. Ο αριθμός των διαθέσιμων κόμβων είναι ίσος με 40 και η ακτίνα αίσθησης ίση με 5. Η ανάλυση της δειγματοληψίας είναι 1x1 και το μέγεθος του πληθυσμού στον GA αλγόριθμο επιλέχθηκε να είναι ίσο με 600 και αντίστοιχα, το πλήθος του σμήνους στον PSO αλγόριθμο να είναι ίσο με 600.

Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8. Αποτελέσματα προσομοιώσεων του πειράματος 5

Παράμετροι	GA	PSO	PSO Grid [23]	PSO Voronoi [24]
Μέση τιμή	96.40	95.53	91.74	89.83
Τυπική απόκλιση	0.59	0.66	0.01	0.01
Μέσος χρόνος (sec)	217.59	200.99	645.33	61.28
p-value (GA)	-	0.00	0.00	0.00
p-value (PSO)	0.00	-	0.00	0.00
Ιδανικό εμβαδό κάλυψης			100 %	

3.5.6. Πείραμα 6

Στόχος του έκτου πειράματος είναι η μεγιστοποίηση της κάλυψης σε έναν τετραγωνικό χώρο δύο διαστάσεων 50 x 50. Ο αριθμός των διαθέσιμων κόμβων είναι ίσος με 20 και η ακτίνα αίσθησης ίση με 5. Η ανάλυση της δειγματοληψίας είναι 1x1 και το μέγεθος του πληθυσμού στον GA αλγόριθμο

επιλέχθηκε να είναι ίσο με 600 και αντίστοιχα, το πλήθος του σμήνους στον PSO αλγόριθμο να είναι ίσο με 600.

Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 9.

Πίνακας 9. Αποτελέσματα προσομοιώσεων του πειράματος 6

Παράμετροι	GA	PSO	PSO Grid [23]	PSO Voronoi [24]
Μέση τιμή	62.50	62.38	61.07	59.24
Τυπική απόκλιση	0.23	0.18	0.00	0.00
Μέσος χρόνος (sec)	149.12	89.06	362.44	27.67
p-value (GA)	-	0.10	0.00	0.00
p-value (PSO)	0.10	-	0.00	0.00
Ιδανικό εμβαδό κάλυψης			62.83	

3.5.7. Πείραμα 7

Στόχος του έβδομου πειράματος είναι η μεγιστοποίηση της κάλυψης σε έναν τετραγωνικό χώρο δύο διαστάσεων 30 x 30. Ο αριθμός των διαθέσιμων κόμβων είναι ίσος με 20 και η ακτίνα αίσθησης ίση με 5. Η ανάλυση της δειγματοληψίας είναι 1x1 και το μέγεθος του πληθυσμού στον GA αλγόριθμο επιλέχθηκε να είναι ίσο με 600 και αντίστοιχα, το πλήθος του σμήνους στον PSO αλγόριθμο να είναι ίσο με 600.

Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10. Αποτελέσματα προσομοιώσεων του πειράματος 7

Παράμετροι	GA	PSO	PSO Grid [23]	PSO Voronoi [24]
Μέση τιμή	99.76	99.55	97.89	97.96
Τυπική απόκλιση	0.10	0.17	0.02	0.01
Μέσος χρόνος (sec)	39.24	44.98	125.18	27.17
p-value (GA)	-	0.00	0.00	0.00
p-value (PSO)	0.00	-	0.00	0.00
Ιδανικό εμβαδό κάλυψης				

4. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

4.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζεται το έργο που εκπονήθηκε στο πλαίσιο αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής, επισημαίνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν και καταγράφονται προτάσεις μελλοντικής εξέλιξης.

4.2. Σύνοψη

Στόχος της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διατριβής ήταν η ανάπτυξη σχημάτων βελτιστοποίησης της κάλυψης μιας περιοχής σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ειδικότερα, σχεδιάστηκαν κατάλληλα ένας γενετικός αλγόριθμος και ένας αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων ώστε να επιτύχουν τη μεγιστοποίηση της κάλυψης και της κ-κάλυψης.

Η αποτίμηση της απόδοσης των δύο αλγορίθμων υπολογιστικής νοημοσύνης που αναπτύχθηκαν, πραγματοποιήθηκε μέσω προσομοίωσης χρησιμοποιώντας στατιστικές δοκιμές σε διάφορα σενάρια που εξετάστηκαν. Σε αυτά συγκρίθηκε η αποτελεσματικότητα του καθενός τόσο με το έτερο από τα δύο σχήματα, όσο και με δύο αντίστοιχα σχήματα ελέγχου που ήδη χρησιμοποιούνται.

Το ερευνητικό έργο που εκπονήθηκε συνοψίστηκε στην επιστημονική δημοσίευση [37].

4.3. Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν και οι δύο αλγόριθμοι δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την κάλυψη και την κ-κάλυψη μιας περιοχής, καθώς επιτυγχάνουν τιμές κάλυψης που είναι πολύ κοντά στις ιδανικές.

Επίσης, διαπιστώθηκε ότι σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα των λύσεων καθώς και τον χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι το μέγεθος του πληθυσμού που επιλέχθηκε για το GA αλγόριθμο και το μέγεθος του σμήνους για PSO αλγόριθμο. Η επιλογή μεγάλου αριθμού πιθανών λύσεων που να εξερευνούν τον χώρο αναζήτησης αυξάνει την ποικιλομορφία, οδηγώντας σε λιγότερες επαναλήψεις του αλγορίθμου ώστε να συγκλίνει στην βέλτιστη λύση ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η πιθανότητα εγκλωβισμού του αλγορίθμου σε κάποιο τοπικό ακρότατο. Από την άλλη, αυτή η επιλογή του μεγάλου πληθυσμού τόσο στον GA όσο και στον PSO αλγόριθμο, αύξησε κατά

πολύ την πολυπλοκότητα των υπολογισμών. Και στις δύο περιπτώσεις, επιλέχθηκαν μεγάλοι αριθμοί πληθυσμών και σμήνους καθώς το να βρεθεί η βέλτιστη λύση στην κάλυψη και κ-κάλυψη είχε προτεραιότητα σε σχέση με την γρήγορη εκτέλεση του αλγορίθμου.

Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε ότι όσο η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξανόταν ενώ παρέμενε ίδιο το μέγεθος του πληθυσμού στον GA αλγόριθμο και το σμήνος στον PSO αλγόριθμο, η τυπική απόκλιση των πειραμάτων μεγάλωνε. Γι' αυτό τον λόγο σε δυσκολότερα προβλήματα επιλέχθηκαν μεγαλύτερες τιμές πληθυσμού. Μεγάλο ενδιαφέρον έδειξε η ικανότητα του PSO να προσαρμόζεται και να λύνει τα πιο απαιτητικά προβλήματα ειδικά όταν ήταν απαραίτητη και η κ-κάλυψη ενώ ο GA αλγόριθμος με τον ίδιο πληθυσμό δεν κατάφερε να βρει λύση στο πρόβλημα. Παρ' όλα αυτά, για λόγους σύγκρισης επιλέχθηκαν ίδιοι αριθμοί πληθυσμών σε όλα τα προβλήματα που εξετάστηκαν.

Επίσης, παρατηρήθηκε ότι στα απλούστερα παραδείγματα που εξετάστηκαν, ο GA πέτυχε ελάχιστα καλύτερα αποτελέσματα ως προς τη μέση τιμή της κάλυψης συγκριτικά με τη μέση τιμή που υπολογίστηκε στον PSO αλγόριθμο. Στις περιπτώσεις στις οποίες ήταν απαραίτητη και η κ-κάλυψη κάποιων σημείων, η διαφορά της μέσης τιμής της κάλυψης μειώθηκε και τελικά στα πιο σύνθετα προβλήματα, ο PSO βρέθηκε να δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τον GA.

Επίσης, διαπιστώθηκε ότι όσο η πολυπλοκότητα των υπολογισμών αυξάνεται λόγω του μεγάλου αριθμού των πιθανών λύσεων, τόσο αυξάνεται και ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι χρόνοι εκτέλεσης επηρεάζονται επίσης και από τον αριθμό των κόμβων και όχι τόσο πολύ από την κ-κάλυψη που απαιτεί το κάθε σημείο.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τον χρόνο εκτέλεσης είναι το βήμα δειγματοληψίας που αναμφισβήτητα συνεισφέρει στη βελτίωση των αποτελεσμάτων. Πολύ σημαντικό είναι να βρεθεί το ιδανικό βήμα δειγματοληψίας καθώς παρατηρήθηκε ότι μετά από ένα σημείο, η μείωση του βήματος δειγματοληψίας έχει ως αποτέλεσμα μόνο την αύξηση του χρόνου εκτέλεσης, χωρίς την αντίστοιχη αύξηση του εμβαδού κάλυψης του χώρου.

Πάντως, οι δοκιμές προσομοίωσης κατέδειξαν ότι στα πιο απλά παραδείγματα ο αλγόριθμος GA παρουσίαζε μικρότερες τιμές χρόνου εκτέλεσης σε σχέση με αυτές του PSO αλγορίθμου. Αντίθετα, όσο η πολυπλοκότητα αυξανόταν, οι γενετικοί αλγόριθμοι χρειάζονταν περισσότερο χρόνο και μεγαλύτερες τιμές πληθυσμού για να πετύχουν ισάξια αποτελέσματα με αυτά του PSO αλγορίθμου.

Σε κάθε πρόβλημα τα αποτελέσματα προέκυψαν μετά από ένα σύνολο 30 επαναλήψεων και σε όλες τις περιπτώσεις, η τυπική απόκλιση που υπολογίστηκε ήταν αρκετά μικρή. Βασισμένοι λοιπόν

σε αυτές τις μικρές τυπικές αποκλίσεις, βγαίνει το συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα του αλγορίθμου και στις δύο περιπτώσεις εμφανίζουν μεγάλη επαναληψιμότητα.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα έχουν πολύ κοντινές τιμές με αυτές του ιδανικού εμβαδού κάλυψης. Παρόλο που σε κάποιες περιπτώσεις όπου το πρόβλημα απαιτούσε κ-κάλυψη κάποιων σημείων και η ύπαρξη επικαλύψεων ανάμεσα στους κόμβους είναι αναπόφευκτη, τα αποτελέσματα της βέλτιστης τιμής ήταν πολύ κοντά στις ιδανικές τιμές. Επομένως προκύπτει ότι τόσο με τον GA όσο και με τον PSO αλγόριθμο επιτυγχάνεται υψηλός βαθμός ακρίβειας αν λάβουμε υπόψιν τα αποτελέσματα που έχουν επιτευχθεί.

Η αξιολόγηση των τριών τελευταίων προβλημάτων έδειξε ότι και οι δύο αλγόριθμοι έχουν μικρότερο χρόνο εκτέλεσης σε σχέση με τον 'grid-based' αλγόριθμο που προτάθηκε στο [23] αλλά όχι τόσο μικρό όσο στην προσέγγιση 'Voronoι-based' που προτάθηκε στο [24]. Αυτό είναι λογικό καθώς η ανάπτυξη ενός 'Voronoι' διαγράμματος είναι πολύ συντομότερη διαδικασία σε σχέση με αυτήν της μεθόδου της δειγματοληψίας. Παρόλα αυτά, και οι δύο αλγόριθμοι που προτείνονται στην παρούσα εργασία έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα - σε σχέση με τους δύο παλαιότερους - σε όλα τα προβλήματα, ως προς την μεγιστοποίηση της κάλυψης. Η ανωτερότητα των δύο αλγορίθμων σε σχέση με αυτούς που προτείνονται στις εργασίες [23] και [24] είναι σημαντική, με στατιστική βεβαιότητα μεγαλύτερη από 99%, τιμή που προέκυψε μετά την εφαρμογή της στατιστικής μεθοδολογίας t-test στα αποτελέσματα των πειραμάτων.

4.4. Προτάσεις εξέλιξης

Η απαίτηση για τη μεγιστοποίηση της κάλυψης ή/και της κ-κάλυψης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων σε πολλές περιπτώσεις ικανοποιείται σε βάρος της απαίτησης για τη διατήρηση της συνδεσιμότητας μεταξύ των κόμβων τους. Για το λόγο αυτό η ανάπτυξη σχημάτων ελέγχου που αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση της ταυτόχρονης επίτευξης των δύο συγκεκριμένων απαιτήσεων είναι αναγκαία [38].

Επιπρόσθετα, η αναπόφευκτα περιορισμένη ενεργειακή επάρκεια των ασυρμάτων κόμβων καθιστά επιτακτική την εξοικονόμηση των ενεργειακών πόρων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων [39]. Για το λόγο αυτό, συνιστάται η χρήση υβριδικών αλγορίθμων ελέγχου που εκτός από τη μεγιστοποίηση της κάλυψης επιδιώκουν και την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, μέσω χρήσης σχημάτων χαμηλής ισχύος [40], ή ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης [41], ή συμπίεσης δεδομένων [42], [43], ή εξισορρόπησης φορτίου [44].

Στην ίδια λογική, υβριδικά σχήματα ελέγχου μπορούν να λαμβάνουν υπόψη και πολλές άλλες απαιτήσεις για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων όπως είναι η αποφυγή της συμφόρησης [45], [46], η προάσπιση της ασφάλειας , και η επίτευξη υψηλής ποιότητας υπηρεσιών [47]. Ο συνυπολογισμός πολλών τέτοιων παραμέτρων ικανοποιείται μέσω της ανάπτυξης αλγορίθμων πολλαπλών στόχων [48].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ

- [1] I. F. S. W. Akyildiz, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38 , no. 4, pp. 393-422, 2002.
- [2] D. Kandris, C. Nakas, D. Vomvas και G. Koulouras, «Applications of wireless sensor networks: an up-to-date survey,» *Applied System Innovation*, vol. 3, no. 1, p. 14, 2020.
- [3] M. Đurišić, Z. Tafa, G. Dimić και V. Milutinović, «A Survey of Military Applications of Wireless Sensor Networks,» in the 2012 Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Bar, Montenegro, 2012.
- [4] S. Mansour, N. Nasser, L. Karim και A. Ali, «Wireless Sensor Network-based air quality monitoring system,» in *Proceedings of the 2014 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Honolulu, HI, USA, 2014.
- [5] S. Nikolidakis, D. Kandris, D. Vergados και C. Douligeris, «Energy efficient automated control of irrigation in agriculture by using wireless sensor networks,» *Comput. Electron. Agric.*, vol. 113, p. 154–163, 2015.
- [6] P. Kakria, N. Tripathi και P. Kitipawang, «A Real-Time Health Monitoring System for Remote Cardiac Patients Using Smartphone and Wearable Sensors,» *International journal of telemedicine and applications*, p. 1–11., 2015.
- [7] B. Lu, L. Wu, T. Habetler, R. Harley και J. Gutierrez, «On the application of wireless sensor networks in condition monitoring and energy usage evaluation for electric machines,» in *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, 2005.
- [8] F. Zantalis, G. Koulouras, S. Karabetsos και D. Kandris, «A review of machine learning and IoT in smart transportation,» *Future Internet*, vol. 11, no. 4, p. 94, 2019.
- [9] N. Pantazis, S. Nikolidakis, D. Kandris και D. Vergados, «An Automated System for Integrated Service Management in Emergency Situations,» in *15th Panhellenic Conference on Informatics*, Kastonia, Greece, 2011.
- [10] N. Papadakis, N. Koukoulas, I. Christakis, S. I. και D. Kandris, «An IoT-Based Participatory Antitheft System for Public Safety Enhancement in Smart Cities,» *Smart Cities*, vol. 4, no. 2, pp. 919-937, 2021.
- [11] S. K. Wang, S. P. Chew, M. T. Jusoh, A. Khairunissa, K. Y. Leong και A. A. Azid, «WSN based indoor air quality monitoring in classrooms,» in *AIP Conference Proceedings*, 2017.
- [12] A. Lavric, V. Popa και S. Sfichi, «Street lighting control system based on large-scale WSN: A step towards a smart city,» in *The 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, Iasi, Romania, 16–18 October 2014.
- [13] J. Yadav και S. Mann, «Coverage in wireless sensor networks: A survey,» *Int. J. Electron. Comput. Sci. Eng.*, vol. 2, p. 465–471, 2013.
- [14] R. Mulligan και H. M. Ammari, «Coverage in wireless sensor networks: a survey,» *Netw. Protoc. Algorithms*, vol. 2, no. 2, pp. 27-53, 2010.
- [15] A. Ghosh και S. Das, «Coverage and connectivity no.s in wireless sensor networks: A survey,» *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 4, no. 3, pp. 303-334, 2008.
- [16] C. F. Huang και Y. C. Tseng, «The coverage problem in a wireless sensor network,» *Mobile networks and Applications*, vol. 10, no. 4, pp. 519-528, 2005.
- [17] A. Rakavi, M. Manikandan και K. Hariharan, «Grid based mobile sensor node deployment for improving area coverage in Wireless Sensor Networks,» in *Proceedings of the 3rd International Conference on Signal Processing, Communication and Networking*, 2015.
- [18] G. Wang, G. Cao, P. Berman και T. La Porta, «Bidding Protocols for Deploying Mobile Sensors,» *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 6, p. 563–576, 2007.
- [19] Y. Zou και K. Chakrabarty, «Sensor deployment and target localization in distributed sensor networks,» *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.* , vol. 3, p. 61–91, 2004.
- [20] A. Ghosh, «Estimating coverage holes and enhancing coverage in mixed sensor networks,» in *Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*, Tampa, FL, USA, 16–18 November 2004.
- [21] X. Wang, S. Han, Y. Wu και X. Wang, «Coverage and Energy Consumption Control Mobile Heterogeneous Wireless Sensor Networks,» *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 58, pp. 975 - 988, 2014.
- [22] N. Tamboli και M. Younis, «Coverage-aware connectivity restoration in mobile sensor networks,» *Journal of network and computer applications*, vol. 33, no. 4, pp. 363-374, 2010.
- [23] X. Wang, L. Shu, J. Yang, H. Xu, J. Cho και S. Lee, «Swarm based sensor deployment optimization in ad hoc sensor networks,» in *Proceedings of the Second international conference on Embedded Software and Systems*, Xi'an, China, 16–18 December 2005.

- [24] N. A. B. Ab Aziz, A. W. Mohemmed και M. Y. Alias, «A wireless sensor network coverage optimization algorithm based on particle swarm optimization and Voronoi diagram.,» in 2009 International Conference on Networking, Sensing and Control, 2009.
- [25] M. Cardei, J. Wu, M. Lu και M. O. Pervaiz, «Maximum network lifetime in wireless sensor networks with adjustable sensing ranges.,» in WiMob'2005, IEEE International Conference on Wireless And Mobile Computing, Networking And Communications, 2005.
- [26] H. ZainEldin, M. Badawy, M. Elhosseini, H. Arafat και A. Abraham, «An improved dynamic deployment technique based-on genetic algorithm (IDDT-GA) for maximizing coverage in wireless sensor networks.,» Journal of Ambient Intelligence and Humanized C, vol. 11, no. 10, pp. 4177-4194, 2020.
- [27] A. N. Njoya, C. Thron, J. Barry, W. Abdou, E. Tonye, N. S. L. Konje και A. Dipanda, «Efficient scalable sensor node placement algorithm for fixed target coverage applications of wireless sensor networks.,» IET Wireless Sensor Systems, vol. 7, no. 2, pp. 44-54, 2017.
- [28] R. Singh και M. S. Manu, «An energy efficient grid based static node deployment strategy for wireless sensor networks.,» International Journal of Electronics and Information Engineering., vol. 7, no. 1, pp. 32-40, 2017.
- [29] H. C. Ma, P. K. Sahoo και Y. W. Chen, « Computational geometry based distributed coverage hole detection protocol for the wireless sensor networks.,» Journal of network and computer applications3, vol. 4, no. 5, pp. 1743-1756, 2011.
- [30] C. Qiu και H. Shen, «A delaunay-based coordinate-free mechanism for full coverage in wireless sensor networks.,» IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 25, no. 4, pp. 828-839, 2013.
- [31] S. K. Gupta, P. Kuila και P. K. Jana, «Genetic algorithm approach for k -coverage and m -connected node placement in target based wireless sensor networks.,» Computers & Electrical Engineering, vol. 56, p. 544–556, 2016.
- [32] S. Harizan και P. Kuila, «Nature-inspired algorithms for k-coverage and m-connectivity problems in wireless sensor networks.,» in Design frameworks for wireless networks, Singapore, Springer, 2020, pp. 281-301 .
- [33] A. Engelbrecht, Computational intelligence, An Introduction, 2nd ed. επιμ., Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2007, pp. 3-4.
- [34] C. Darwin, The origin of species by means of natural selection, John Murray, 1859.
- [35] Β. Καμπουρλάζος και Γ. Παπακόστας, Εισαγωγή στην Υπολογιστική Νοημοσύνη, Αθήνα: Εκδόσεις Κάλλιπος, 2015.
- [36] M. Juneja και S. K. Nagar, «Particle swarm optimization algorithm and its parameters: A review.,» in 2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM), 2016.
- [37] K. Tarnaris, I. Preka, D. Kandris και A. Alexandridis, « Coverage and k-coverage optimization in wireless sensor networks using computational intelligence methods: a comparative study.,» Electronics, vol. 9, no. 4, p. 675, 2020.
- [38] Y. Wang, Y. Zhang, J. Liu και R. & Bhandari, «Coverage, connectivity, and deployment in wireless sensor networks.,» in Recent development in wireless sensor and ad-hoc networks, New Delhi, Springer, 2015, pp. 25-44.
- [39] D. Kandris, P. Tsioumas, A. Tzes, N. Pantazis και D. D. Vergados, «Hierarchical energy efficient routing in wireless sensor networks.,» in 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, Ajaccio, France, 2008.
- [40] N. Pantazis και D. Kandris, «Power Control Schemes in Wireless Sensor Networks.,» WSEAS Transactions on Communications, vol. 4, no. 10, pp. 1100-1107, 2005.
- [41] C. Nakas, D. Kandris και G. Visvardis, «Energy efficient routing in wireless sensor networks: A comprehensive survey.,» Algorithms., vol. 13, no. 3, p. 72, 2020.
- [42] G. Nikolakopoulos, D. Kandris και A. Tzes, «Adaptive compression of slowly varying images transmitted over wireless sensor networks.,» Sensors, vol. 10, no. 8, pp. 7170-7191, 2010.
- [43] G. Nikolakopoulos, P. Stavrou, D. Tsitsipis, D. Kandris, A. Tzes και T. Theocharis, « A dual scheme for compression and restoration of sequentially transmitted images over Wireless Sensor Networks.,» Ad Hoc Networks, vol. 11, no. 1, pp. 410-426, 2013.
- [44] S. A. Nikolidakis, D. Kandris, D. D. Vergados και C. Douligeris, «Energy efficient routing in wireless sensor networks through balanced clustering.,» Algorithms, vol. 6, no. 1, pp. 29-42, 2013.
- [45] S. E. Ploumis, A. Sgora, D. Kandris και D. D. Vergados, «Congestion avoidance in wireless sensor networks: a survey.,» in 16th Panhellenic Conference on Informatics , 2012.
- [46] D. Kandris, G. Tselikis, E. Anastasiadis, E. Panaousis και T. Dagiuklas, «COALA: a protocol for the avoidance and alleviation of congestion in wireless sensor networks.,» Sensors, vol. 17, no. 11, p. 2502, 2017.
- [47] D. Kandris, M. Tsagaropoulos, I. Politis, A. Tzes και S. Kotsopoulos, «A hybrid scheme for video transmission over wireless multimedia sensor networks.,» in 17th Mediterranean Conference on Control and Automation, Thessaloniki, Greece, 2009.

- [48] D. Kandris, A. Alexandridis, T. Dagiuklas, E. Panaousis και D. D. Vergados, «Multiobjective Optimization Algorithms for Wireless Sensor Networks,» *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020.
- [49] D. Kandris, M. Tsagkaropoulos, I. Politis, A. Tzes και S. Kotsopoulos, «A hybrid scheme for video transmission over wireless multimedia sensor networks,» in *17th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2009.