



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Παραμετροποιήσιμος αλγόριθμος ομαδοποίησης  
συσκευών με κριτήρια ενέργειας, κινητικότητας  
και ενδιαφέροντος επικοινωνίας για τη  
δημιουργία αποτελεσματικών δικτύων δημόσιας  
ασφάλειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΤΟΥ  
ΚΟΥΚΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Επιβλέπων Καθηγητής: Συμεών Παπαβασιλείου

Αθήνα, Ιανουάριος 2018





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Παραμετροποιήσιμος αλγόριθμος ομαδοποίησης  
συσκευών με κριτήρια ενέργειας, κινητικότητας  
και ενδιαφέροντος επικοινωνίας για τη  
δημιουργία αποτελεσματικών δικτύων δημόσιας  
ασφάλειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**ΚΟΥΚΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ**

**Επιβλέπων Καθηγητής:** Συμεών Παπαβασιλείου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2017

.....  
Συμεών Παπαβασιλείου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Θεοδώρα Βαρβαρίγου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

.....  
Ιωάννα Ρουσσάκη

Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π



.....

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΟΥΚΑΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κωνσταντίνος Κουκάς, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου 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 συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αλγόριθμου ο οποίος διαχειρίζεται την οργάνωση κινητών συσκευών, με σκοπό την δημιουργία ενός εκτεταμένου ασυρμάτου δικτύου που θα εξυπηρετεί αποτελεσματικά την ανάγκη για επικοινωνία σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Η εξασφάλιση της απρόσκοπτης λειτουργίας των δικτύων δημόσιας ασφάλειας ακόμα και σε περιπτώσεις απώλειας μέρους τους δικτύου κορμού, η ταχεία ανάκαμψή και η διασφάλιση της άμεσης και ταχείας επικοινωνίας μεταξύ των διασσωστικών φορέων, των οργάνων επαναφοράς της τάξης ή μεταξύ οποιαδήποτε άλλης ομάδας με αυξημένο ενδιαφέρον επικοινωνίας, είναι μερικά από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτουν. Ταυτόχρονα, η ιδιαίτερα αυξημένη κινητικότητα των συσκευών που παρατηρείται συχνά σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, επιβάλλει στον σχεδιαστή τέτοιων δικτύων να συμπεριλάβει μηχανισμούς διαχείρισης της κινητικότητας αυτής κατά την λήψη αποφάσεων δημιουργίας, οργάνωσης και συντήρησης του δικτύου. Μια ακόμα παράμετρος που είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη είναι το ενεργειακό προφίλ των τερματικών συσκευών του ασυρμάτου δικτύου που αναπτύσσεται καθώς η πλειοψηφία των κόμβων βασίζεται αποκλειστικά σε μπαταρίες για την παροχή της απαιτούμενης ενέργειας λειτουργίας και ως εκ τούτου έχει περιορισμένα αποθέματα. Από την άλλη πλευρά, ένα ακόμα ενδιαφέρον στοιχείο των δικτύων δημόσιας ασφάλειας που αποτέλεσε πρόκληση κατά την σχεδίαση ήταν η ετερογενής φύση του δικτύου που απαρτίζεται από ένα ευρύ φάσμα τερματικών συσκευών με διαφορετικά χαρακτηριστικά και ενεργειακές δυνατότητες. Για να αναπτύξουμε μια λύση που ανταποκρίνεται στους περιορισμούς που περιεγράφηκαν παραπάνω, θεωρήθηκε σκόπιμο οποιαδήποτε περαιτέρω σχεδίαση να βασισθεί στο μοντέλο των δικτύων συσκευής με συσκευή. Η κύρια συνεισφορά της εργασίας αυτής η οποία λαμβάνει την μορφή μιας αλγοριθμικής λύσης για την ομαδοποίηση των συσκευών με σκοπό την δημιουργία ενός δικτύου συσκευής με συσκευή, στα πλαίσια των δικτύων δημόσιας ασφάλειας. Ο αλγόριθμος αυτός αποσκοπεί να θέσει τις βάσεις για τη δημιουργία ενός δικτύου που θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις αυτές καθώς ταυτόχρονα προσαρμόζεται στους περιορισμούς που εμφανίζονται στα προαναφερθέντα δίκτυα. Τα κύρια προβλήματα που επιδιώκεται να αντιμετωπισθούν είναι η αυξημένη κινητικότητα των κόμβων του δικτύου, η αποτελεσματική χρήση της περιορισμένης ενέργειας, η ταχύτητα επανάκαμψης μετά από ενδεχόμενη βλάβη ή τυχόν καταστροφή κορμού του δικτύου και η διασφάλιση καθώς και επιτάχυνση της ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ συσκευών με αυξημένο ενδιαφέρον επικοινωνίας. Για να αξιολογηθεί η απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου έγιναν πολυάριθμες προσομοιώσεις με σκοπό την παροχή συγκριτικών δεδομένων απόδοσης.

Λέξεις κλειδιά: <<δίκτυα δημόσιας ασφάλειας, αυξημένη κινητικότητα, περιορισμένη ενέργεια, ενεργειακό προφίλ, ενδιαφέρον επικοινωνίας, αλγοριθμική λύση, δίκτυα συσκευής με συσκευή, ομαδοποίηση των συσκευών.>>





## ABSTRACT

---

The main objective of this diploma thesis is the development of an algorithm, which manages the organization of wireless mobile devices into clusters, in order to create an extensive wireless ad hoc network that will serve the need for effective communication in any public safety and security scenario. Establishing and maintaining smooth operation even in situations where there is complete loss of coverage from the main network, fast network recovery after any catastrophic event and the maintenance of direct and fast communication between rescuing teams, other order restoration units or between any other group that has a high interest of communication, are some of the features a Public Safety Network must have. In addition, during most emergency situations and generally most public safety and security scenarios, increased mobility of the network nodes is often observed. Another parameter worth taking into consideration is the energy profile of the terminal devices of the wireless network, since the majority of the network nodes depends, almost exclusively, on batteries for their energy needs and thus there are limited amounts of available energy. On the other hand, another interesting element of the public safety networks that was found challenging during the design, is their heterogenic nature as these networks often consist of a wide range of terminal devices with different characteristics and energy efficiency profiles. To develop a solution that effectively addresses the limitations described above, it was considered necessary to base any further design, on the model of device to device networks (D2D networks), abandoning the conventional way of communication today's mobile devices use, which calls for a mediator of at least one base station (eNodeB) in every exchange of information. Hence, we first present the advantages provided by the device to device model of communication, along with the need to develop decentralized organization mechanisms in the absence of a central coordinating board. The main contribution of this document takes the form of a clustering algorithm that combines information from multiple parameters in order to provide the basis for designing a Public Safety Network. The clustering scheme we propose is energy and mobility aware. In addition to that, the proposed algorithm takes it account the interest of communication between the different devices of the networks when performing the clustering operations. Finally, a performance evaluation is presented in order to provide proof that the proposed scheme is operational and effective. Various graphs and diagrams produced during simulations are presented, providing evidence that the proposed algorithm is a well-balanced solution that assimilates the benefits from multiple types of clustering algorithms effectively fitting the specific needs of Public Safety Networks.

Keywords: << Public Safety Networks, ad hoc networks, D2D communication, algorithmic solution, energy and mobility aware, interest of communication >>



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ από καρδιάς, τον καθηγητή μου και επιβλέποντα τη διπλωματική αυτή εργασία κ. Συμεών Παπαβασιλείου, ο οποίος εμπιστεύθηκε στο πρόσωπό μου, την ανάθεση ενός ιδιαίτερα ενδιαφέροντος ερευνητικού έργου και με τίμησε σε κάθε στάδιο της εκπόνησης της εργασίας μου αυτής με αμέριστη ενθάρρυνση και συμπαράσταση.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την καθηγήτρια του Πανεπιστημίου Νέου Μεξικού των Η.Π.Α., κ. Ειρήνη-Ελένη Τσιροπούλου, η οποία αν και υπήρχε μεταξύ μας αυτή η μεγάλη απόσταση, εν τούτοις υπήρξε πάντα δίπλα μου φιλικός συμπαραστάτης και καθοδηγητής, ανταποκρινόμενη άμεσα σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή με γόνιμο διάλογο με σκοπό την εξεύρεση των καλύτερων δυνατών λύσεων.

Τέλος, θα ήθελα να δηλώσω την απεριόριστη ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου, η οποία την δημιουργική αυτή περίοδο, όπως και σε όλη την μέχρι τώρα πορεία μου, υπήρξε πάντα δίπλα μου στις καλές και στις δύσκολες στιγμές.

Αφιερώνεται στην  
οικογένεια μου

# Περιεχόμενα

---

|   |    |
|---|----|
| Περίληψη .....  | 7  |
| Abstract.....   | 9  |
| Περιεχόμενα .....   | 13 |
| Κεφάλαιο 1 .....  | 17 |
| Εισαγωγή.....   | 18 |
| 1.1 Πρόλογος.....   | 19 |
| 1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....  | 19 |
| 1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας .....  | 20 |
| Κεφάλαιο 2 .....  | 23 |
| Δίκτυα δημοσίας ασφάλειας .....   | 24 |
| 2.1 Σημασία δικτύων δημοσίας ασφάλειας .....  | 25 |
| 2.2 Απαιτήσεις δικτύων δημοσίας ασφάλειας .....   | 26 |
| 2.3 Περιοριστικοί παράγοντες .....  | 27 |
| Κεφάλαιο 3 .....  | 29 |
| Οργάνωση του δικτύου / δίκτυα συσκευής με συσκευή.....  | 30 |
| 3.1 Τρόποι παροχής συνδεσιμότητας σε περίπτωση απώλειας κάλυψης από το κύριο δίκτυο.....        | 31 |
| 3.2 Δίκτυα επικοινωνίας συσκευή με συσκευή(D2D networks) .....                                  | 32 |
| 3.3 Ομαδοποίηση των συσκευών(Clustering) και τα οφέλη που παρέχει.....                          | 33 |
| 3.4 Τύποι και αλγόριθμοι ομαδοποίησης συσκευών ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής, ..                | 33 |
| 3.4.1 Ομαδοποίηση με βάση το αναγνωριστικό κάθε κόμβου .....                                    | 33 |
| 3.4.2 Ομαδοποίηση με βάση την τοπολογία .....   | 34 |
| 3.4.3 Ομαδοποίηση με βάση την κινητικότητα.....   | 34 |
| 3.4.4 Ομαδοποίηση με βάση την ενέργεια .....  | 35 |
| 3.4.5 Ομαδοποίηση με βάση συνδυασμό μετρικών .....  | 36 |
| 3.5 Απαιτήσεις αλγορίθμων ομαδοποίησης συσκευών στο πλαίσιο των δικτύων δημοσίας ασφάλειας..... | 37 |
| Κεφάλαιο 4 .....  | 39 |
| Αλγόριθμος ομαδοποίησης συσκευών .....  | 40 |

|                                 |  |    |
|---------------------------------|--|----|
| 4.1                             | Στόχοι αλγορίθμου .....  | 41 |
| 4.2                             | Τοπολογία δικτύου .....  | 42 |
| 4.3                             | Περιγραφή και ανάλυση αλγορίθμου .....   | 44 |
| 4.3.1                           | Βήματα εκτέλεσης .....   | 44 |
| 4.3.2                           | Άλλες Παρατηρήσεις .....   | 49 |
| 4.3.3                           | Συμπεριφορά στο χρόνο.....   | 49 |
| 4.3.4                           | Διάλυσης ομάδας .....  | 50 |
| 4.3.5                           | Διορθωτικές ενέργειες.....   | 51 |
| 4.3.6                           | Κίνητρα παρούσας υλοποίησης ομαδοποίησης .....   | 51 |
| 4.3.7                           | Αναμενόμενα αποτελέσματα .....   | 54 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....                 |  | 57 |
| ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....    |  | 58 |
| 5.1                             | Ενεργειακή αξιολόγηση προτεινόμενου αλγορίθμου .....   | 59 |
| 5.1.1                           | Αξιολόγηση του τρόπου κατανάλωσης ενέργειας του προτεινόμενου αλγορίθμου και σύγκριση με άλλες μεθόδους..... | 59 |
| 5.1.2                           | Συνολική κατανάλωση ενέργειας του συστήματος .....   | 67 |
| 5.2                             | Αξιολόγηση σταθερότητας προτεινόμενου αλγορίθμου .....   | 69 |
| 5.3                             | Αξιολόγηση ομογένειας παραγόμενων ομάδων προτεινόμενου αλγορίθμου και σύγκριση με άλλες προσεγγίσεις. ....   | 73 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....                 |  | 77 |
| ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΕΠΟΜΕΝΟΙ ΣΤΟΧΟΙ..... |  | 78 |
| 6.1                             | Σύνοψη του αλγορίθμου και επόμενοι στόχοι.....   | 79 |
| References .....                |  | 80 |

## Κατάλογος Σχημάτων και Γραφημάτων

|  |    |
|--|----|
| Εικόνα 1 - Επικοινωνία με χρήση σταθμού βάσης(1) vs επικοινωνία συσκευής με συσκευή(2).      | 32 |
| Εικόνα 2 – Τοπολογία συστήματος .....  | 43 |
| Εικόνα 3 – Κίνηση με παρόμοια κατύθυση .....   | 52 |
| Εικόνα 4 - Κίνηση με έντονα διαφορετή κατύθυση .....   | 52 |
| Εικόνα 5 - Επίδραση θέσης Κόμβου Κεφάλης στην απαιτούμενη ενέργεια εκπομπής .....            | 54 |
| Εικόνα 6 – Εξέλιξη στο χρόνο της κατανομής διαθέσιμης ενέργειας κόμβων .....                 | 62 |
| Εικόνα 7 – Διακύμανση συναρτήσει του χρόνου ( $R_i \in [0.9,1]$ ).....                       | 65 |
| Εικόνα 8 – Διακύμανση συναρτήσει του χρόνου ( $R_i \in [0.7,1]$ ).....                       | 66 |
| Εικόνα 9 – Αριθμός “νέκρων” συσκευών συναρτήσει του χρόνου.....                              | 67 |
| Εικόνα 10 – Συνολική καταναλισκομένη ενέργεια συστήματος.....                                | 68 |
| Εικόνα 11 - Μέση τιμή διάρκειας ζωής ομάδων (50-100 κομβόι).....                             | 70 |
| Εικόνα 12 - Μέση τιμή διάρκειας ζωής ομάδων (160-220 κομβόι).....                            | 71 |
| Εικόνα 13 – Μέση τιμή διάρκειας ζωής ομάδων(cluster) συναρτήσει του αριθμού των κόμβων ..... | 72 |
| Εικόνα 14 – Ομοιογένεια παραγόμενων ομάδων.....  | 74 |
| Εικόνα 15 - Ομοιογένεια παραγόμενων ομάδων(ολικό άθροισμα) .....                             | 75 |





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

---

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

- 
- 1.1 Πρόλογος
  - 1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας
  - 1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας
-

## 1.1 ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει αλλάξει τα δεδομένα στον χώρο της επικοινωνίας. Τα ασύρματα δίκτυα σήμερα έχουν γίνει πολύ αξιόπιστα και οι άνθρωποι έχουν μάθει να βασίζονται σε αυτά για το μεγαλύτερο μέρος της επικοινωνίας τους. Πλέον η πλειοψηφία του πληθυσμού, σε αρκετές χώρες χρησιμοποιεί έξυπνα τηλέφωνα και άλλες φορητές συσκευές επικοινωνίας σε καθημερινή βάση[1]. Στα πλαίσια αυτά είναι αναμενόμενο, σε συνθήκες έκτακτης ανάγκης (λ.χ. φυσικών καταστροφών κλπ.) όπου η επικοινωνία είναι ζωτικής σημασίας, οι άνθρωποι να στραφούν στα δίκτυα αναζητώντας την μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία. Σε τέτοιες κρίσιμες καταστάσεις, τυχόν έλλειψη ή δυσχέρεια επικοινωνίας μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτες ζημιές, ενώ αντιθέτως η λειτουργία και πλήρης διαθεσιμότητα ενός γρήγορου και αξιόπιστου δικτύου είναι βέβαιο ότι μπορεί να διασφαλίσει την προστασία της ανθρώπινης ζωής και περιουσίας, αλλά και την εύρυθμη λειτουργία της κρατικής διοίκησης και της εν γένει πολιτικής προστασίας. Τα ασύρματα δίκτυα που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα, παρότι εξασφαλίζουν υπό ομαλές συνθήκες αρκετά αξιόπιστη επικοινωνία στο μεγαλύτερο μέρος του χρόνου λειτουργίας τους, εμφανίζουν παράλληλα και αρκετά σημεία αδυναμίας. Αποτελεί λοιπόν μεγάλη πρόκληση η ανάπτυξη ενός νέου τύπου δικτύου επικοινωνίας που θα ξεπερνά τους περιορισμούς των διαθέσιμων συμβατικών ασυρμάτων δικτύων που χρησιμοποιούνται έως σήμερα και θα είναι σε θέση να δώσει λύσεις τη στιγμή που τούτο είναι επιτακτικά αναγκαίο μέσα σε κρίσιμες και απρόβλεπτες συνθήκες έκτακτης ανάγκης. Ταυτόχρονα το γεγονός ότι μεγάλο μέρος του πληθυσμού διαθέτει ήδη στην κατοχή του συσκευές ασύρματης επικοινωνίας αποτελεί πραγματικά μεγάλη ευκαιρία για την ανάπτυξη έξυπνων δικτύων που να διαθέτουν τα προαναφερόμενα χαρακτηριστικά. Τα δίκτυα συσκευής με συσκευή είναι ιδιαίτερα δημοφιλή στις μέρες μας και αποτελούν το μέλλον των ασυρμάτων δικτύων κινητών συσκευών(Ad-hoc networks). Ήδη αναπτύσσονται οι απαιτούμενες τεχνολογίες(Wi-Fi Direct, LTE Direct) [2] ώστε τα δίκτυα αυτά να ενταχθούν στα υπάρχοντα μοντέλα ασύρματης επικοινωνίας [3][4]. Η ανάπτυξη ενός πρωτοκόλλου επικοινωνίας που κάνει χρήση τέτοιων τεχνολογιών, με σκοπό την δημιουργία δικτύων δημοσίας ασφάλειας, είναι πιο επίκαιρη από ποτέ.

## 1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία έχει στόχο να προσεγγίσει το κομβικό αυτό πρόβλημα της δημιουργίας και οργάνωσης έξυπνων δικτύων για αποτελεσματική επικοινωνία συσκευών στο πλαίσιο των δικτύων δημοσίας ασφάλειας. Το κέντρο ενδιαφέροντος εντοπίζεται στην

δημιουργία δικτύων συσκευής με συσκευή, με στόχο την ανάπτυξη αξιόπιστων δικτύων που θα παρέχουν την απαραίτητη επικοινωνία σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Γενικότερα, στα ασύρματα δίκτυα συσκευής με συσκευή, η οργάνωση τους αποτελεί σημαντικό ερευνητικό πρόβλημα για το οποίο έχει προταθεί πληθώρα λύσεων. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχει μια λύση που καλύπτει όλες τις περιπτώσεις. Το γεγονός ότι στα προαναφερθέντα δίκτυα δεν υπάρχει μια κεντρική οντότητα που συντονίζει όλους τους κόμβους του δικτύου, όπως στα συμβατικά ασύρματα δίκτυα, καθιστά το πρόβλημα ιδιαίτερα δυσχερές. Στο πρώτο μέρος της έρευνας επιχειρείται να αναλυθούν διεξοδικά τα δίκτυα δημοσίας ασφάλειας, ώστε να εντοπιστούν οι ιδιαίτερες απαιτήσεις τους και με βάση αυτές να καθοδηγηθεί οποιαδήποτε περαιτέρω σχεδίαση. Περιορισμοί και ιδιαιτερότητες που εμφανίζονται σε αυτά δίνουν την κατευθυντήρια γραμμή στην συνέχεια της εργασίας. Επόμενο βήμα της μελέτης αποτελεί η ανάλυση των δικτύων συσκευής με συσκευή, ώστε να εντοπιστούν οι κατάλληλες προσεγγίσεις που ταιριάζουν, αλλά και αυτές που είναι αδύνατο ή ασύμφορο να εφαρμοστούν στο πλαίσιο των παραπάνω δικτύων. Με βάση τις προαναφερόμενες αναλύσεις αναπτύσσεται μια αλγοριθμική προσέγγιση για την οργάνωση των συσκευών. Πιο συγκεκριμένα τα προβλήματα της ομαδοποίησης των συσκευών, αλλά και της επιλογής του κόμβου κεφαλής της κάθε ομάδας αντιμετωπίζονται με ένα καινοτόμο τρόπο που ενοποιεί κατάλληλες τεχνολογίες και δημιουργεί σταθερά και συγχρόνως αποδοτικά δίκτυα δημοσίας ασφάλειας.

### **1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Στην αρχή της εργασίας αυτής γίνεται μια πρώτη εισαγωγή στα δίκτυα δημοσίας ασφάλειας, ώστε να εξοικειωθεί ο αναγνώστης με το πεδίο έρευνας στα προαναφερθέντα δίκτυα. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά η σημασία των δικτύων αυτών στην σημερινή εποχή. Παρουσιάζονται οι απαιτήσεις τους και οι προδιαγραφές που είναι επιθυμητό να πληρούν, αλλά και οι παράγοντες που περιορίζουν τον σχεδιασμό τους και διαμορφώνουν τις ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας τους. Ολοκληρώνοντας, το κεφάλαιο αυτό ο αναγνώστης έχει μια βασική γνώση πάνω στα δίκτυα δημοσίας ασφάλειας, γεγονός που του επιτρέπει εν συνεχεία να κατανοήσει τα κίνητρα πίσω από τον σχεδιασμό του αλγορίθμου που αποτελεί την κύρια συνεισφορά της εργασίας αυτής.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τρόποι παροχής συνδεσιμότητας σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης και γίνεται μια πρώτη εισαγωγή στο δίκτυα συσκευής με συσκευή. Αρχικά αναλύονται οι διάφοροι τρόποι οργάνωσης του δικτύου που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία και ακολούθως επισημαίνονται πολλαπλές κατηγορίες αλγορίθμων ομαδοποίησης. Από αυτούς ξεχωρίζουμε τους κατάλληλους για την παρούσα έρευνα και δίνεται μια πρώτη εικόνα της προσέγγισης που θα ακολουθήσουμε.

Το τέταρτο κεφάλαιο είναι το τμήμα της εργασίας στο οποίο παρουσιάζεται ο αλγόριθμος ομαδοποίησης που προτείνεται. Ξεκινώντας συνοπτικά περιγράφουμε τους στόχους του αλγορίθμου. Έπειτα αναπτύσσεται η περιγραφή της τοπολογίας και του ειδικού περιβάλλοντος στο οποίο καλείται να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος. Έτσι, έχοντας πλέον ορίσει με σαφήνεια το πρόβλημα παρουσιάζουμε το κύριο μέρος της εργασίας, στο οποίο παρατίθεται ο αλγόριθμος ομαδοποίησης.

Ακολουθεί το κεφάλαιο πέντε, στο οποίο εμφανίζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που δίνει η εφαρμογή του αλγορίθμου, μετά από προσομοίωση σε διάφορα δίκτυα και υπό διαφορετικές παραμετροποιήσεις.

Τελικά, στο κεφάλαιο 6 γίνεται μια σύντομη σύνοψη της έρευνας που εκπονήθηκε. Παρουσιάζονται τμήματα του προβλήματος της ανάπτυξης δικτύων έκτακτης ανάγκης που δεν προσεγγίστηκαν και εντοπίζονται νέα πιθανά αντικείμενα περαιτέρω έρευνας.

Στις τελευταίες σελίδες της εργασίας αυτής, εμφανίζονται όλες οι παραπομπές σε άλλες εργασίες και κείμενα που αποτέλεσαν έμπνευση για την ανάπτυξη αυτής και συνετέλεσαν στη διαμόρφωση των τελικών συμπερασμάτων



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

---

- 
- 2.1 Σημασία δικτύων δημοσίας ασφάλειας
  - 2.2 Απαιτήσεις δικτύων δημοσίας ασφάλειας
  - 2.3 Περιοριστικοί παράγοντες
-



## 2.1 ΣΗΜΑΣΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Με τον όρο δίκτυα δημόσιας ασφάλειας αναφερόμαστε σε κάθε μορφή διασύνδεσης τερματικών συσκευών που αποσκοπεί στην ανταλλαγή πληροφοριών σε καταστάσεις έκτακτης εκτατής ανάγκης. Τα δίκτυα αυτά λειτουργούν παράλληλα με το υπάρχον κύριο δίκτυο κορμού και εξυπηρετούν κατά κύριο λόγο τις ανάγκες επικοινωνίας αστυνομικών, πυροσβεστικών, διασωστικών σωμάτων και άλλων φορέων υπευθύνων για την εξομάλυνση οποιασδήποτε κατάστασης έκτακτης ανάγκης που ενδέχεται να παρουσιαστεί ή για την παροχή βοήθειας και υποστήριξης στον πληγέντα πληθυσμό. Ταυτόχρονα, τα δίκτυα αυτά είναι αναγκαίο να παρέχουν συνδεσιμότητα και στον απλό χρήστη, όταν υπάρχει επικείμενος κίνδυνος και το κύριο δίκτυο κορμού αποτυγχάνει να λειτουργήσει για οποιοδήποτε λόγο, ώστε να ενημερωθούν οι αρχές και να εκκινηθεί έγκαιρα η διαδικασία οργάνωσης των κατάλληλων ενεργειών επέμβασης για την άρση του κινδύνου και την αποκατάσταση της κρίσιμης κατάστασης. Ο χρόνος απόκρισης των αρμοδίων φορέων εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα επίτευξης της συνδεσιμότητας για την πληροφόρηση τους και φυσικά επηρεάζει καθοριστικά την έκβαση κάθε δράσης ή επιχείρησης που αποσκοπεί στην επαναφορά της κατάστασης και την αποτροπή του κινδύνου. Επιπροσθέτως, η έλλειψη επικοινωνίας κατά την εξέλιξη ενός καταστροφικού φαινομένου ή συμβάντος που απειλεί την δημόσια ασφάλεια είναι πολύ πιθανό να συντελέσει στην σύγχυση του κοινού σχετικά την εξέλιξη των γεγονότων, οδηγώντας κατ' αυτό τον τρόπο στην διάδοση αναξιόπιστων πληροφοριών που ενδέχεται να σπείρουν τον πανικό.

Είναι γεγονός ότι η ύπαρξη δικτύων δημόσιας ασφάλειας στις μέρες μας κρίνεται απαραίτητη καθώς το δίκτυο κορμού που χρησιμοποιείται σήμερα, αδυνατεί να εγγυηθεί την απρόσκοπτη λειτουργία του σε όλες τις περιπτώσεις. Συχνά παρατηρείται υπολειτουργία του δικτύου ή και μαζική απώλεια κάλυψης κατά την εξέλιξη εκδηλώσεων, όπου συγκεντρώνεται μεγάλος αριθμός ανθρώπων σε ένα σχετικά μικρό χώρο όπως συναυλίες, ομιλίες ή αθλητικές εκδηλώσεις[5]. Σε τέτοια περιβάλλοντα είναι ιδιαίτερα σημαντικό να διατηρείται το δίκτυο λειτουργικό καθώς η χρήση του για την επικοινωνία των αρχών που συντονίζουν την εκδήλωση και διασφαλίζουν την ασφάλεια του κόσμου είναι απαραίτητη. Επιπλέον είναι γεγονός ότι συχνά, σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, το δίκτυο κορμού αδυνατεί να παράσχει την απαιτούμενη επικοινωνία, διότι οι απαιτήσεις εύρους ζώνης αυξάνονται σημαντικά. Γενικά, το δίκτυο ενδέχεται να καταστεί μη λειτουργικό όταν δέχεται πλημμύρα αιτήσεων για επικοινωνία, κάτι που συμβαίνει όταν πολλοί χρήστες προσπαθούν να επικοινωνήσουν ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας τον ίδιο σταθμό βάσης. Από την άλλη πλευρά, το συμβατικό δίκτυο επικοινωνίας είναι ιδιαίτερα ευάλωτο, καθώς η λειτουργία του εξαρτάται από την ακεραιότητα του εξοπλισμού δικτύωσης που χρησιμοποιείται (σταθμοί βάσης, δίκτυο κορμού) και οποιαδήποτε καταστροφή του εξοπλισμού αυτού, είτε από φυσικά φαινόμενα, είτε από

κακόβουλες ενέργειες δύναται να καταστήσει το δίκτυο στο σύνολο του μη λειτουργικό. Παρότι, έχουν μελετηθεί οι πιθανές αστοχίες των συμβατικών δικτύων[6] και έχουν αναπτυχθεί τρόποι βελτίωσης της αξιοπιστίας τους[7] [8], αποτελεί κοινή παραδοχή του μεγαλύτερου μέρους της επιστημονικής κοινότητας ότι τα χρησιμοποιούμενα ασύρματα δίκτυα σήμερα δεν επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών επικοινωνίας σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.

## **2.2 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ**

Τα δίκτυα αυτά, λόγω του σκοπού που επιτελούν πρέπει να έχουν ορισμένες προδιαγραφές, ώστε να εξασφαλίζεται η δυνατότητα να παρέχουν υποστήριξη, τόσο στους χρήστες που ενδέχεται να βρίσκονται σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης, όσο και στους εκάστοτε αρμόδιους ή υπεύθυνους φορείς για την εξομάλυνση της κατάστασης αυτής. Στην βιβλιογραφία[9][10][11] έχουν μελετηθεί αναλυτικά οι ανάγκες και γενικότερα οι προκλήσεις που παρουσιάζει η σχεδίαση δικτύων δημόσιας ασφάλειας καθώς και τρόποι με τους οποίους οι υπάρχουσες προσεγγίσεις μπορούν να βελτιωθούν [12]. Εδώ, παρουσιάζονται κάποια από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένα τέτοιο δίκτυο.

Αρχικά το δίκτυο δημόσιας ασφάλειας θα πρέπει να είναι σε θέση να προσφέρει ανθεκτική λειτουργία ακόμα και σε περιπτώσεις καταστροφής σημαντικού μέρους του κυρίου δικτύου. Για παράδειγμα, το δίκτυο θα πρέπει να μπορεί να διατηρεί την λειτουργία του ακόμα και αν καταστραφούν όλοι οι σταθμοί βάσης σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Είναι γεγονός ότι τα περισσότερα ασύρματα δίκτυα σήμερα βασίζονται στο μοντέλο επικοινωνίας κάθε χρήστη με κάποιο σταθμό βάσης, ώστε να επιτυγχάνεται διασύνδεση. Σε ένα τέτοιο μοντέλο πιθανή καταστροφή του σταθμού βάσης καθιστά άμεσα το δίκτυο εντελώς ανίκανο να εξυπηρετήσει. Έτσι είναι φανερό ότι πρέπει να βρεθούν νέοι τρόποι οργάνωσης, ανθεκτικοί σε φυσικές καταστροφές ή άλλες κακόβουλες ενέργειες οι οποίες θα αχρήστευαν τα χρησιμοποιούμενα δίκτυα ασύρματης επικοινωνίας.

Επιπλέον είναι απαραίτητο, σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, οι πληροφορίες να ταξιδεύουν γρήγορα. Η ταχύτητα διάδοσης σημαντικών πληροφοριών ενδέχεται να κρίνει την επιτυχία μιας διασωστικής ενέργειας. Ταχεία επικοινωνία μπορεί να βοηθήσει στην έγκαιρη και κυρίως ορθή λήψη αποφάσεων για δράση, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα των ομάδων διάσωσης, αλλά και των οργάνων ελέγχου της δημόσιας τάξης .

## 2.3 ΠΕΡΙΟΡΙΣΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Σε ένα δίκτυο που αποτελείται κατά κύριο λόγο από φορητές συσκευές εισάγονται περιορισμοί οι οποίοι επηρεάζουν την σχεδίαση με καθοριστικό τρόπο. Αρχικά, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι φορητές συσκευές είναι κυρίως τροφοδοτούμενες από μπαταρίες, γεγονός που σημαίνει ότι έχουν περιορισμένη διαθέσιμη ενέργεια. Είναι όμως σημαντικό η ενέργεια αυτή να χρησιμοποιείται έξυπνα, ώστε να υπάρχει όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη κατανάλωση από όλες ανεξαιρέτως τις συσκευές του δικτύου, έτσι ώστε να αυξάνεται η διάρκεια ζωής των μονάδων και να διασφαλίζεται παράλληλα η αξιοπιστία και η χρησιμότητα του δικτύου στο σύνολό του.

Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να επισημανθεί είναι η αυξημένη κινητικότητα των συσκευών/κόμβων του δικτύου. Ειδικότερα σε περιστάσεις έκτακτης ανάγκης η κινητικότητα των συσκευών είναι ιδιαίτερα αυξημένη και έτσι είναι καθοριστικής σημασίας το δίκτυο κατά την οργάνωση του να λαμβάνει αυτή την ιδιότητα υπόψιν. Είναι αναγκαίο, το δίκτυο να έχει την δυνατότητα να προσαρμόζεται στην ταχύτατα μεταβαλλόμενη τοπολογία, προβαίνοντας στις κατάλληλες ενέργειες κατά την οργάνωση του.

Τέλος, ένας επιπλέον παράγοντας που παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον είναι η έλλειψη ενός κεντρικού συντονιστικού μέρους του δικτύου. Στα σημερινά δίκτυα η κάθε συσκευή επικοινωνεί με ένα σταθμό βάσης ο οποίος με τη σειρά του προωθεί την εισερχόμενη πληροφορία στο δίκτυο κορμού, λειτουργώντας έτσι ως συντονιστής του δικτύου. Σε ένα μοντέλο δικτύου στο οποίο δεν υπάρχει κάποιος κεντρικός σταθμός βάσης, το δίκτυο πρέπει να οργανώνεται από μόνο του. Έτσι, εν απουσία ενός κεντρικού συντονιστικού μέρους του δικτύου, η αυτοοργάνωση είναι αναγκαία, είναι δε απαραίτητο να γίνεται με τρόπο αποκεντρωμένο και αυτόνομο.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

---

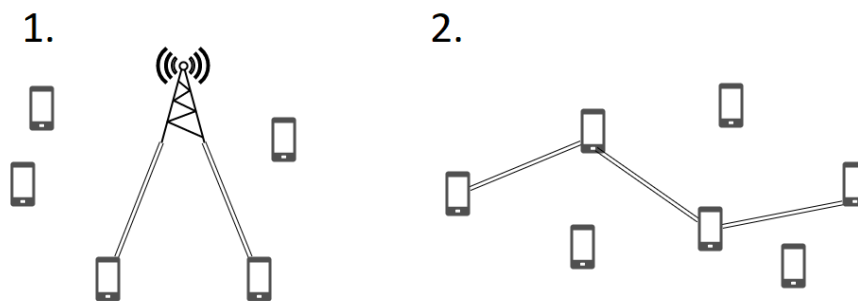
- 
- 3.1 Τρόποι παροχής συνδεσιμότητας σε περίπτωση απώλειας κάλυψης από το κύριο δίκτυο.
  - 3.2 Δίκτυα επικοινωνίας συσκευή με συσκευή(D2D networks)
  - 3.3 Ομαδοποίηση των συσκευών(Clustering) και τα οφέλη που παρέχει
  - 3.4 Τύποι και αλγόριθμοι ομαδοποίηση συσκευών ανάλογα το πεδίο εφαρμογής.
  - 3.5 Απαιτήσεις αλγόριθμων ομαδοποίησης συσκευών στο πλαίσιο των δικτύων δημοσίας ασφάλειας.
-

### **3.1 ΤΡΟΠΟΙ ΠΑΡΟΧΗΣ ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΚΥΡΙΟ ΔΙΚΤΥΟ.**

Σε περίπτωση απώλειας κάλυψης υπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις διαθέσιμες για την επίλυση του προβλήματος.

A.Η πιο προφανής λύση είναι η επιστράτευση επιπλέον εξοπλισμού, ώστε να αντικαταστήσει τον κατεστραμμένο/μη λειτουργικό. Τέτοιες προσεγγίσεις περιλαμβάνουν αποστολή ειδικών επίγειων ή εναέριων οχημάτων, επανδρωμένων ή μη. Αυτός ο τρόπος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός καθώς δεν απαιτεί αναδιοργάνωση του δικτύου από την πλευρά των συνδεδεμένων τερματικών συσκευών. Δοκιμές έχουν δείξει ότι με την παρούσα τεχνολογία ένα μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα μπορεί να παραμείνει στον αέρα μέχρι και δεκατέσσερις μέρες[13]. Επιπλέον, οι τεχνολογίες αυτές συνεχώς παρουσιάζουν νέες βελτιώσεις. Από την άλλη πλευρά όμως, οι τεχνικές αυτές είναι ιδιαίτερα δαπανηρές και δεν ενδείκνυνται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες το δίκτυο πρέπει να επανέλθει σε λειτουργία το συντομότερο δυνατό. Ο χρόνος που απαιτείται για να επαναλειτουργήσει το δίκτυο μετά από μια καταστροφή κάποιου κεντρικού σταθμού βάσης με τη βοήθεια τέτοιων οχημάτων είναι αυξημένος, λόγω του γεγονότος ότι πρέπει να μετακινηθεί ο εξοπλισμός στο σημείο που είναι επιθυμητό να παρέχει κάλυψη. Ακόμα και ένα εναέριο μη επανδρωμένο όχημα χρειάζεται αρκετά λεπτά για να μετακινηθεί στην απαιτούμενη θέση. Σε μια κατάσταση όμως έκτακτης ανάγκης, ο χρόνος αυτός, είναι ζωτικής σημασίας για την οργάνωση τυχόν διασωστικών ενεργειών ή έγκαιρων επεμβάσεων προς άρση επικείμενου κινδύνου.

B.Η δεύτερη προσέγγισή για την επίλυση του προβλήματος απώλειας κάλυψης από το κύριο δίκτυο δεν απαιτεί καμία επιστράτευση επιπλέον υλικού και συνεπώς δεν απαιτεί επιπλέον κόστος για την αγορά πρόσθετου εξοπλισμού. Η λύση που προτείνεται βασίζεται στο γεγονός ότι οι άνθρωποι που επιθυμούν να επικοινωνήσουν έχουν ήδη στην κατοχή τους συσκευές, οι οποίες με κατάλληλη προσαρμογή του λογισμικού τους μπορούν να δημιουργήσουν ένα νέο αυτοοργανούμενο δίκτυο. Κατ' αυτό τον τρόπο γίνεται πλέον λόγος για επικοινωνία συσκευής με συσκευή, σε αντίθεση με το γνωστό και ήδη εφαρμοσμένο μοντέλο επικοινωνίας κάθε μεμονωμένης συσκευής με το σταθμό βάσης.



Εικόνα 1 - Επικοινωνία με χρήση σταθμού βάσης(1) vs επικοινωνία συσκευής με συσκευή(2)

Σε αυτό το μοντέλο η κάθε συσκευή επικοινωνεί με τις γειτονικές της και αυτές με τη σειρά τους επικοινωνούν με τους δικούς τους γείτονες, δημιουργώντας έτσι μια αλυσίδα μέσω της οποίας τελικά επικοινωνούν οι τερματικές συσκευές. Η παραδοσιακή αρχιτεκτονική που βλέπουμε στο μέρος 1. της εικόνας 1 υπαγορεύει ότι οποιαδήποτε επικοινωνία μεταξύ δυο συσκευών πρέπει να γίνεται δια μέσω του σταθμού βάσης ακόμα και αν η μια συσκευή βρίσκεται εντός εμβέλειας της άλλης. Αυτό το μοντέλο ταιριάζει σε εφαρμογές με χαμηλές απαιτήσεις από άποψη εύρους ζώνης, όπως λ.χ. τηλεφωνικές κλήσεις ή γραπτά μηνύματα. Σήμερα όμως, οι απαιτήσεις της επικοινωνίας έχουν αλλάξει σημαντικά. Η χρήση πολυμεσικών εφαρμογών για διαμοιρασμό εικόνας και βίντεο σε συνδυασμένο με τον ολοένα και αυξανόμενο πληθυσμό των ασυρμάτων συσκευών αυξάνει κατακόρυφα το απαιτούμενο εύρος ζώνης.

### 3.2 ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΕ ΣΥΣΚΕΥΗ (D2D NETWORKS)

Για να επιτευχθεί η επικοινωνία δυο τερματικών συσκευών σύμφωνα με την δεύτερη προσέγγιση που περιεγράφηκε παραπάνω απαιτείται ανάπτυξη δικτύων συσκευής με συσκευή. Επικοινωνία συσκευής με συσκευή ή D2D επικοινωνία(device to device) όπως εμφανίζεται στην βιβλιογραφία ορίζεται η άμεση, απευθείας επικοινωνία μεταξύ δυο ασύρματων συσκευών, χωρίς την παρεμβολή σταθμού βάσης ή του δικτύου κορμού. Το μοντέλο αυτό επικοινωνίας αποτελεί μια νέα, πολλά υποσχόμενη προοπτική που έχει ήδη αρχίσει να αναπτύσσεται με στόχο να ενταχθεί στα δίκτυα νέας γενιάς.

Από την άλλη πλευρά, λόγω του γεγονότος ότι οι συσκευές του δικτύου επικοινωνούν κατά κύριο λόγο με τις γειτονικές τους, είναι δυνατή η χωρική επαναχρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων επικοινωνίας του συστήματος. Σαν αποτέλεσμα αυτών, το δίκτυο δύναται να επιτύχει μεγαλύτερη χωρητικότητα (system capacity), ενώ ταυτόχρονα περιορίζονται οι επανεκπομπές λόγω σύγκρουσης μετάδοσης (reduced retransmission and collisions). Πέρα όμως



από την αυξημένη διαμεταγωγή (throughput), η τεχνολογία αυτή έχει την δυνατότητα να βελτιώσει και άλλες πτυχές του δικτύου, όπως την ενεργειακή κατανάλωση, την ταχύτητα της επικοινωνίας αλλά και την ισότητα στην μεταγωγή των δεδομένων. Για όλους αυτούς τους λόγους το μοντέλο αυτό επικοινωνίας είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για την ανάπτυξη δικτύων δημόσιας ασφάλειας[14] και μελετάται ήδη για την ένταξη του στα δίκτυα επομένης γενιάς[15][16][17].

### **3.3 ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ (CLUSTERING) ΚΑΙ ΤΑ ΟΦΕΛΗ ΠΟΥ ΠΑΡΕΧΕΙ**

Ο διαχωρισμός των συσκευών σε διαφορετικές νοητές ομάδες με χρήση διάφορων κανόνων είναι αυτό που ονομάζουμε ομαδοποίηση ή Clustering, όπως είναι ο αγγλικός όρος που χρησιμοποιείται στην βιβλιογραφία. Ο χωρισμός αυτός σε ομάδες είναι κομβικός για την δημιουργία ασυρμάτων δικτύων που απαρτίζονται από κινητές συσκευές, καθώς δίνει την δυνατότητα στο δίκτυο να κλιμακωθεί ευκολά. Παράλληλα, διευκολύνει την δρομολόγηση και προσδίδει χαρακτηριστικά επεκτασιμότητας (scalability) σε δίκτυα που παρουσιάζουν αυξημένη κινητικότητα, αλλά και μεγάλο αριθμό κόμβων. Περιορίζονται τα μηνύματα δρομολόγησης καθώς οι πληροφορίες για την τοπολογία διατηρούνται μόνο τοπικά στην ομάδα και πιθανές μεταβολές δεν χρειάζεται να διαδίδονται στο υπόλοιπο δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό προστίθενται και αφαιρούνται κόμβοι με ευκολία, ενώ ταυτόχρονα αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά κάθε μεταβολή της τοπολογίας, λόγω κινητικότητας με δυναμική προσαρμογή των ομάδων.

### **3.4 ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.**

Ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής και τους στόχους τους, οι αλγόριθμοι ομαδοποίησης στα ασύρματα δίκτυα κινητών συσκευών (mobile wireless ad-hoc networks) μπορούν να ενταχθούν σε μια από τις παρακάτω κατηγορίες [18]–[20].

#### **3.4.1 Ομαδοποίηση με βάση το αναγνωριστικό κάθε κόμβου**

Αποτελεί μια μεγάλη κατηγορία αλγορίθμων ομαδοποίησης με διάφορες προσεγγίσεις οι οποίες όμως έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό. Σε κάθε κόμβο ανατίθεται μια μοναδική ταυτότητα που αντιστοιχεί σε έναν φυσικό αριθμό και με χρήση κριτηρίων που βασίζονται σε αυτά τα μοναδικά αναγνωριστικά οργανώνεται όλη η δομή του δικτύου. Κάθε συσκευή έχει γνώση μόνο για τις ταυτότητες των συσκευών που βρίσκονται εντός της εμβέλειάς της. Ο κόμβος κεφαλής της ομάδας εκλέγεται με κριτήρια που βασίζονται σε αυτά τα αναγνωριστικά. Για παράδειγμα, η συσκευή με το μικρότερο αναγνωριστικό είναι αυτή που λαμβάνει το ρόλο της

κεφαλής/ηγέτης της ομάδας στον αλγόριθμο Lowest ID(LIC), ενώ αντίστοιχα το μεγαλύτερο αναγνωριστικό επιλέγεται στον Highest ID[21][22]. Μια άλλη προσέγγιση που εμπίπτει σε αυτήν την κατηγορία και δημιουργήθηκε σε μια προσπάθεια βελτίωσης των παραπάνω μοντέλων αποτελεί ο «Max-min d-cluster formation» αλγόριθμος[23]. Στην τελευταία περίπτωση η έννοια της δημιουργίας ομάδας ενός άλματος (one-hop cluster) διευρύνεται καθώς γίνεται εισαγωγή της ιδέας για ομάδες ακτίνας περισσότερων από ένα άλμα (d-hop clusters).

### 3.4.2 Ομαδοποίηση με βάση την τοπολογία

Οι αλγόριθμοι που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία κάνουν χρήση μετρικών που αντιστοιχούν στην μορφή της τοπολογίας, όπως για παράδειγμα ο αριθμός των γειτόνων εντός εύρους εκπομπής, για να αναθέσουν τους κατάλληλους ρόλους στις συσκευές του δικτύου. Ένας τέτοιος αλγόριθμος είναι ο «Highest connectivity clustering algorithm (HCC)» στον οποίο εισάγεται η έννοια του βαθμού συνδεσιμότητας (degree of connectivity)[22]. Ο βαθμός αυτός αντιστοιχεί στον αριθμό των γειτονικών συσκευών που ανιχνεύει κάθε συσκευή. Η συσκευή με τον μέγιστο βαθμό αναλαμβάνει τον ρόλο του κόμβου κεφαλής. Η λύση αυτή αποτελεί μια αξιόπιστη λύση η οποία όμως παρουσιάζει παράλληλα και μειονεκτήματα, λόγω της έλλειψης άνω ορίου στον αριθμό των κόμβων που μπορούν να συνδεθούν σε ένα κόμβο κεφαλής και ταυτόχρονα εμφανίζει μειούμενη απόδοση σε δίκτυο με κινητές συσκευές, όπου ο βαθμός συνδεσιμότητας μεταβάλλεται συνεχώς. Μια άλλη εναλλακτική παρουσιάζεται στο [24] όπου δημιουργούνται μη επικαλυπτόμενες ομάδες με απόσταση τριών αλμάτων μεταξύ δύο διαφορετικών κεφαλών ομάδας με την εισαγωγή ενός νέου ρόλου στο δίκτυο, αυτού του κόμβου επισκέπτη.

### 3.4.3 Ομαδοποίηση με βάση την κινητικότητα

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν αλγόριθμοι οι οποίοι κάνουν χρήση στοιχείων κινητικότητας των συσκευών του δικτύου, με σκοπό να μεγιστοποιήσουν την σταθερότητα των παραγομένων διατάξεων. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί ο αλγόριθμος MOBIC (Lowest Relative Mobility Clustering Algorithm)[25]. Η ιδέα πίσω από αυτή την προσέγγιση έγκειται στην παρατήρηση ότι σε ένα ασύρματο δίκτυο κινητών συσκευών η επιλογή του κόμβου με την μικρότερη κινητικότητα για την ανάληψή του ρόλου *Κόμβου Κεφαλής*, παρέχει σταθερότητα στο δίκτυο. Η λύση αυτή έχει ικανοποιητική απόδοση σε δίκτυα που εμφανίζουν μικρή κινητικότητα, αλλά παρουσιάζει σημαντική μείωση στην απόδοση της, όταν εφαρμόζεται σε κόμβους που κινούνται με μεγαλύτερες ταχύτητες. Ένας άλλος αλγόριθμος που επίσης

εμπίπτει σε αυτήν την κατηγορία είναι ο DDCA (Distributed Dynamic Clustering Algorithm)[26] όπου οι κόμβοι χωρίζονται σε ομάδες ακτίνας πολλαπλών αλμάτων με βάση τα  $(\alpha, t)$  κριτήρια, όπως αυτά εμφανίζονται στην σχετική εργασία. Τα κριτήρια αυτά αναφέρονται στο γεγονός ότι κάθε κόμβος σε μια ομάδα θα έχει μονοπάτι προς κάθε άλλο κόμβο το οποίο θα είναι διαθέσιμο σε ένα χρονικό διάστημα  $t$  με πιθανότητα  $\geq \alpha$  ανεξάρτητα από την απόσταση(αριθμός αλμάτων) μεταξύ τους. Αυτή η λύση δεν απαιτεί περιοδική επανασυγκρότηση του δικτύου καθώς κάθε κόμβος που εισέρχεται στο δίκτυο αναζητεί σύνδεση με μια ομάδα(cluster) την οποία επιτυγχάνει εάν υπάρχει αμοιβαίο μονοπάτι που ικανοποιεί τα παραπάνω κριτήρια  $(\alpha, t)$  μεταξύ του κόμβου αυτού και του υποψήφιου *Κόμβου Κεφαλής* της ομάδας.

#### 3.4.4 Ομαδοποίηση με βάση την ενέργεια

Είναι γεγονός ότι οι κινητές συσκευές που απαρτίζουν τα ασύρματα δίκτυα βασίζονται σε ένα πολύ μεγάλο βαθμό σε μπαταρίες για να καλύψουν τις ανάγκες τροφοδοσίας τους. Είναι λοιπόν αναμενόμενο να αναπτυχθούν αλγόριθμοι που θα έχουν ως κύριο στόχο την «έξυπνη» εκμετάλλευση της διαθέσιμης ενέργειας. Από την μια πλευρά, είναι επιθυμητό να ελαχιστοποιείται η καταναλισκόμενη ενέργεια, ώστε να επιμηκύνεται η διάρκεια ζωής των συσκευών που το απαρτίζουν. Επιπλέον, οι κόμβοι που αναλαμβάνουν ρόλους που απαιτούν μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση, όπως οι *Κόμβοι Κεφαλής*, είναι πιο πιθανό να εξαντλήσουν τα αποθέματα ενέργειας τους γρήγορα και να καταστήσουν τη συσκευή «νεκρή» αν διατηρήσουν το ρόλο αυτό για σημαντικό χρονικό διάστημα. Η απώλεια κόμβων από το δίκτυο ενδέχεται να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στο δίκτυο, όπως διακοπές επικοινωνίας[27].

Στην βιβλιογραφία συναντά κανείς αρκετές προσεγγίσεις που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία. Μια πρώτη λύση που προτείνουν οι συγγραφείς στο [28] διαμορφώνει τον αλγόριθμο IDLBC (ID Load Balancing Clustering), όπου οπύ κάθε κινητός κόμβος διατηρεί ένα «εικονικό» αριθμό που ονομάζεται VID και αρχικά λαμβάνει την τιμή του ID του κόμβου. Η συσκευή με την μεγαλύτερη τιμή λαμβάνει το ρόλο του *Κόμβου Κεφαλής*. Για κάθε *Κόμβο Κεφαλής*, η τιμή αυτή του VID αυξάνεται σε κάθε μονάδα του χρόνου και όταν ξεπεράσει μια μέγιστη τιμή που ορίζει ο αλγόριθμος, τότε μηδενίζεται και ο κόμβος δεν είναι πλέον *Κόμβος Κεφαλής*. Αντίστοιχα, κάθε απλός κόμβος ολισθαίνει κατά μια θέση την τιμή του VID σε κάθε μονάδα του χρόνου και όταν ένας *Κόμβος Κεφαλής* παραιτείται του ρόλου του, τότε ο κόμβος με το μεγαλύτερο VID αναλαμβάνει. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται ο χρόνος που ένας κόμβος μπορεί να διατηρεί ένα ρόλο στο δίκτυο, ο οποίος εξαντλεί ταχέως τα αποθέματα ενέργειας του. Ο IDLBC παρουσιάζει όμως και κάποια μειονεκτήματα που αξίζει να αναφερθούν. Η έναρξη αναδιοργάνωσης του δικτύου μετά από την παραίτηση ενός *Κόμβου Κεφαλής* ενδέχεται να

δημιουργήσει ένα φαινόμενο χιονοστιβάδας με διαδοχικές αλλαγές *Κόμβων Κεφαλής* που θα διαδοθούν σε όλο το δίκτυο, αν δεν ληφθεί υπόψη η τοπολογία του δικτύου. Επιπλέον είναι αναγκαία κάποια μορφή συγχρονισμού για να εξασφαλίζεται ότι η σύγκριση μεταξύ των VID δίνει όντως αξιόπιστη πληροφορία για την καταλληλότητα επιλογής του εκάστοτε κόμβου για *Κόμβο Κεφαλής*. Ακόμα είναι εμφανές ότι ο χρόνος που μια συσκευή διατηρεί έναν ενεργοβόρο ρόλο στο δίκτυο, από μόνος του, δεν αποτελεί αξιόπιστη μετρική για την κατανάλωση ενέργειας.

Ένας άλλος αλγόριθμος ομαδοποίησης που αποσκοπεί στην μείωση την απαιτούμενης ενέργειας για επικοινωνία μεταξύ των κόμβων, παρουσιάζεται από τον Ryu στο [29]. Ο συγγραφέας διακρίνει τους κόμβους σε δυο τύπους: *σκλάβος(slave)* και *αφέντης(master)*. Ένας *σκλάβος* μπορεί να συνδεθεί μόνο με έναν *αφέντη* και ο μέγιστος αριθμός κόμβων που μπορεί να υποστηρίξει ένας *αφέντης* είναι περιορισμένος. Για να μεγιστοποιηθεί ο χρόνος ζωής του δικτύου ο αλγόριθμος έχει στόχο να ελαχιστοποιήσει την ενέργεια που απαιτείται για την εκπομπή μεταξύ ενός *σκλάβου* με τον αντίστοιχο *αφέντη* στον οποίο θα συνδεθεί. Ταυτόχρονα, στην συγκεκριμένη υλοποίηση, για να μειωθεί η καταναλισκόμενη ενέργεια είναι επιθυμητό να μεγιστοποιείται ο αριθμός των συνδεδεμένων κόμβων σε ένα κόμβο *αφέντη*. Σε αυτό το μοντέλο, οι κόμβοι *αφέντες* εκκινούν την διαδικασία ομαδοποίησης αποστέλλοντας ένα σήμα με την μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής. Κάθε *σκλάβος* που λαμβάνει ένα η περισσότερα σήματα στέλνει επιβεβαίωση στον κόμβο από τον οποίο έλαβε το ισχυρότερο σήμα. Ακολούθως, οι κόμβοι *αφέντες* πρώτα συνδέονται με τους κόμβους που έλαβαν ένα μόνο σήμα και έπειτα εάν μείνουν κενές θέσεις αποδέχονται την σύνδεση με τους κόμβους που έλαβαν παραπάνω από δυο σήματα στην προηγούμενη φάση. Έτσι, δίνεται προτεραιότητα στους κόμβους που έχουν μόνο ένα κόμβο *αφέντη* εντός του εύρους εκπομπής τους, ενώ ταυτόχρονα προμοδοτείται η επικοινωνία του κάθε κόμβου *σκλάβου* με τον πλησιέστερο *αφέντη*. Ακολούθως, η εκπομπή στην μετέπειτα επικοινωνία προσαρμόζεται στην ελάχιστη ισχύ με σκοπό την ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Ο αλγόριθμος αυτός, αν και δίνει μια πολύ ενεργειακά αποδοτική λύση, δεν περιλαμβάνει τρόπο εκλογής των κόμβων *αφεντών*, ούτε και μέθοδο για την συντήρηση της οργάνωσης αυτής σε περίπτωση κινουμένων κόμβων.

### 3.4.5 Ομαδοποίηση με βάση συνδυασμό μετρικών

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν δυο ή περισσότερες μετρικές με σκοπό να καλύψουν πολλαπλούς στόχους ταυτόχρονα. Παρότι, στο ερευνητικό πλαίσιο αναπτύσσονται πολλοί αλγόριθμοι με εξειδικευμένους στόχους, οι περισσότερες εφαρμογές σε πραγματικό περιβάλλον συχνά εμφανίζουν σύνθετες απαιτήσεις και ανάλογα με το τελικό περιβάλλον εφαρμογής, οι αλγοριθμικές λύσεις καλούνται να προσαρμοστούν. Οι

αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας υπερέχουν έναντι των παραπάνω προσεγγίσεων, λόγω του γεγονότος ότι παρέχουν ευκολία παραμετροποίησης αναλόγως με το περιβάλλον εφαρμογής. Κάθε μετρική προσαρμόζεται εύκολα, ώστε να ταιριάζει στις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε περίπτωσης. Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί ο αλγόριθμος On-Demand WCA (Weighted Clustering Algorithm), όπως αναγείρεται στην βιβλιογραφία[30]. Σε αυτόν κάθε κόμβος υπολογίζει μια συνδυαστική μετρική  $I_v$ , η οποία αποτελείται από τέσσερις παραμέτρους «ζυγισμένους» κατάλληλα με την βοήθεια των αντιστοίχων «βαρών». Ο τύπος λαμβάνει την μορφή :  $I_v = c_1 * D_v + c_2 * P_v + c_3 * M_v + c_4 * T_v$ , όπου  $P_v$  είναι το άθροισμα των αποστάσεων του κόμβου με κάθε γείτονά του,  $M_v$  η μέση ταχύτητα κίνησής του,  $T_v$  ο χρόνος κατά τον οποίο ο κόμβος είχε το ρόλο του *Κόμβου Κεφαλής* μέχρι την παρούσα χρονική στιγμή και τέλος  $D_v$  η απόλυτη τιμή της διαφοράς του αριθμού των γειτόνων του της συσκευής από το αριθμό που ιδανικά μπορεί να διαχειριστεί ένας *Κόμβος Κεφαλής*. Ο WCA αναθέτει τον ρόλο του *Κόμβου Κεφαλής* στην συσκευή με το ελάχιστο  $I_v$ . Παρότι, η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα λόγω της συνδυαστικής μετρικής που χρησιμοποιεί, υστερεί σε περιπτώσεις έντονα κινουμένων κόμβων, καθώς κάθε φορά που ένας νέος κόμβος εισέρχεται σε μια περιοχή, όλη η διαδικασία ομαδοποίησης επανεκκινείται κάτι που μπορεί να αποβεί κοστοβόρο τόσο από την πλευρά του πλήθους των μηνυμάτων που απαιτούνται, όσο και από την ενεργειακή κατανάλωση που αυτή επιφέρει.

### **3.5 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ.**

Μια προσαρμοσμένη λύση που καλείται να εφαρμοστεί σε ένα δίκτυο δημόσιας ασφάλειας είναι απαραίτητο να λαμβάνει υπόψη του πολλαπλές παραμέτρους. Αρχικά, λόγω του γεγονότος ότι τα δίκτυα αυτά είναι αναγκαίο να διατηρούν την αποδοτικότητα τους ακόμα και σε περιβάλλον με αυξημένη κινητικότητα, είναι αναγκαίο να συμπεριλάβουμε πληροφορίες κίνησης των κόμβων κατά την λήψη αποφάσεων για ομαδοποίηση. Ένας αλγόριθμος με γνώση για την κίνηση των κόμβων που απαρτίζουν το δίκτυο, έχει την δυνατότητα να προσαρμοστεί δυναμικά στην μεταβαλλόμενη τοπολογία κερδίζοντας σε σταθερότητα και κατανάλωση ενέργειας. Ταυτόχρονα, η κινητικότητα στις ιδιαίτερες περιστάσεις μια κατάστασης έκτακτης ανάγκης συχνά εμφανίζει μοτίβα τα οποία είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν για περεταίρω αύξηση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου. Επιπλέον, επειδή αναφερόμαστε σε δίκτυα κινητών συσκευών τροφοδοτούμενων κατά κύριο λόγο από μπαταρίες που ως εκ τούτου διαθέτουν περιορισμένη ενέργεια, είναι επιθυμητό να υπάρχει γνώση των επίπεδων ενέργειας, αλλά και της μορφής της κατανομής αυτής στις συσκευές του δικτύου. Είναι επιθυμητό, από την μια πλευρά, να ελαχιστοποιείται η καταναλισκόμενη ενέργεια του δικτύου κάτι που μπορεί να επιτευχθεί με μια αλγοριθμική προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη τα ενεργειακά κόστη εκπομπής

και δημιουργεί ομάδες με γνώμονα την μείωση τους. Επιπροσθέτως, είναι αναγκαίο να προβλέπεται κάποιος μηχανισμός για την ομοιόμορφη κατανάλωση της ενέργειας, ώστε να αποφεύγεται η εξάντληση των ενεργειακών πόρων συγκεκριμένων συσκευών που τυχαίνει να αναλαμβάνουν τους ενεργοβόρους ρόλους του δικτύου. Είναι επίσης σημαντικό να εξασφαλίζεται ότι η ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ κόμβων του δικτύου που εμφανίζουν μεγάλο ενδιαφέρον επικοινωνίας θα γίνεται απρόσκοπτα και ταχύτατα. Συσκευές των οποίων οι χρήστες ανήκουν στο ίδιο σώμα, όπως για παράδειγμα οι συσκευές επικοινωνίας όλων των αστυνομικών ή των πυροσβεστικών δυνάμεων είναι απαραίτητο να συνδέονται όσο πιο άμεσα γίνεται, ώστε να εξυπηρετούνται οι ανάγκες οργάνωσης των ενεργειών επέμβασης σε μια κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Πιο απλά, είναι επιθυμητό δηλαδή να διευκολύνονται οι σημαντικές και συχνές επικοινωνιακές ανάγκες.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

---

- 
- 4.1 Στόχοι αλγορίθμου
  - 4.2 Τοπολογία δικτύου
  - 4.3 Περιγραφή και ανάλυση αλγορίθμου
    - 4.3.1 Βήματα εκτέλεσης
    - 4.3.2 Άλλες Παρατηρήσεις
    - 4.3.3 Συμπεριφορά στο χρόνο.
    - 4.3.4 Διάλυσης ομάδας
    - 4.3.5 Διορθωτικές ενέργειες
    - 4.3.6 Κίνητρα παρούσας υλοποίησης ομαδοποίησης
    - 4.3.7 Αναμενόμενα αποτελέσματα
-



## 4.1 ΣΤΟΧΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Ο αλγόριθμος που παρουσιάζουμε στην παρούσα εργασία δανείζεται στοιχεία από διαφορετικούς αλγορίθμους ομαδοποίησης σε δίκτυα συσκευής με συσκευή με σκοπό να δημιουργήσει μια λύση που ταιριάζει στις ιδιαίτερες απαιτήσεις των δικτύων δημοσίας ασφάλειας. Από την ανάλυση του Κεφαλαίου 2 και 3 είναι φανερό ότι για να προτείνουμε μια λύση που ταιριάζει στις ιδιαίτερες συνθήκες που εξετάζουμε είναι απαραίτητο να λάβουμε υπόψη πολλαπλούς παράγοντες και μετρικές. Έτσι αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος που κατατάσσεται στην τελευταία από τις κατηγορίες που παρουσιάστηκαν παραπάνω ομαδοποίηση, με βάση συνδυασμό μετρικών. Συγκεκριμένα ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί, κατά κύριο λόγο, στοιχεία κινητικότητας, ενέργειας και ενδιαφέροντος επικοινωνίας για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα του διαχωρισμού σε ομάδες και της επιλογής του Αρχηγού Κόμβου(Κόμβος Κεφαλής).

Ο πρώτος στόχος του αλγορίθμου είναι να δημιουργηθούν ομάδες οι οποίες θα είναι όσο το δυνατόν πιο σταθερές στο χρόνο. Για να το επιτύχει αυτό, χρειάζεται να γίνει κάποια μορφή πρόβλεψης για την μελλοντική θέση των συσκευών. Η πληροφορία μιας αξιόπιστης πρόβλεψης για την μορφή της τοπολογίας σε μια μελλοντική στιγμή έχει καθοριστική συνεισφορά στην αποτελεσματική ομαδοποίηση των συσκευών ενός δικτύου, στο οποίο οι κόμβοι εμφανίζουν ιδιαίτερα αυξημένη κινητικότητα. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψιν την μελλοντική θέση των κόμβων του δικτύου είναι δυνατόν να ελαχιστοποιήσουμε τα μηνύματα ελέγχου που απαιτούνται καθώς η αρχική οργανωτική ενέργεια που θα υπαγορεύει ο αλγόριθμος θα δημιουργεί ένα δίκτυο που θα διατηρεί την αποτελεσματικότητά του για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Στην παρούσα εργασία, η πρόβλεψη αυτή γίνεται έμμεσα μέσω της πληροφορίας της κατεύθυνσης κίνησης κάθε συσκευής. Η κατεύθυνση της κίνησης κάθε συσκευής αποτελεί την πρώτη παράμετρο που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος.

Ακολούθως, ο επόμενος στόχος αφορά την ενεργειακή συμπεριφορά των κόμβων των συσκευών που απαρτίζουν το δίκτυο. Επιδιώκουμε ειδικότερα η ενέργεια να καταναλώνεται όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα από όλες ανεξαιρέτως τις συσκευές. Προφανώς, για να επιτύχουμε μια τέτοια μορφή κατανάλωσης ενέργειας είναι απαραίτητο να συμπεριλάβουμε πληροφορίες ενέργειας για την κάθε συσκευή. Έτσι, αρχικά, λαμβάνουμε υπόψιν την τρέχουσα στάθμη διαθέσιμης ενέργειας κάθε συσκευής, ώστε να είναι γνωστή η κατανομή των αποθεμάτων ενέργειας στο δίκτυο. Έπειτα, είναι αναγκαίο να συμπεριλάβουμε κάποια πληροφορία που θα παρέχει την δυνατότητα να κάνουμε πρόβλεψη για την μελλοντική ενέργεια κάθε συσκευής. Λόγω του γεγονότος ότι το δίκτυο που θα δημιουργηθεί περιλαμβάνει συσκευές διαφορετικού τύπου και διαφορετικών προδιαγραφών και ικανοτήτων, από ενεργειακή άποψη, είναι προφανές ότι γίνεται λόγος για ένα ετερογενές δίκτυο. Κάθε συσκευή σε ένα τέτοιο δίκτυο, θα έχει το δικό της ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας ανεξάρτητα από τον

ρόλο που θα έχει στο δίκτυο. Έτσι, για να μπορεί να αξιοποιηθεί η πληροφορία των ενεργειακών αποθεμάτων και να είναι δυνατή η σύγκριση τους μεταξύ διαφορετικών συσκευών θα πρέπει να υπάρχει γνώση ενός εκτενέστερου ενεργειακού προφίλ. Συνεπώς, η επόμενη παράμετρος που χρησιμοποιείται στην προσέγγιση μας είναι ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας της κάθε συσκευής.

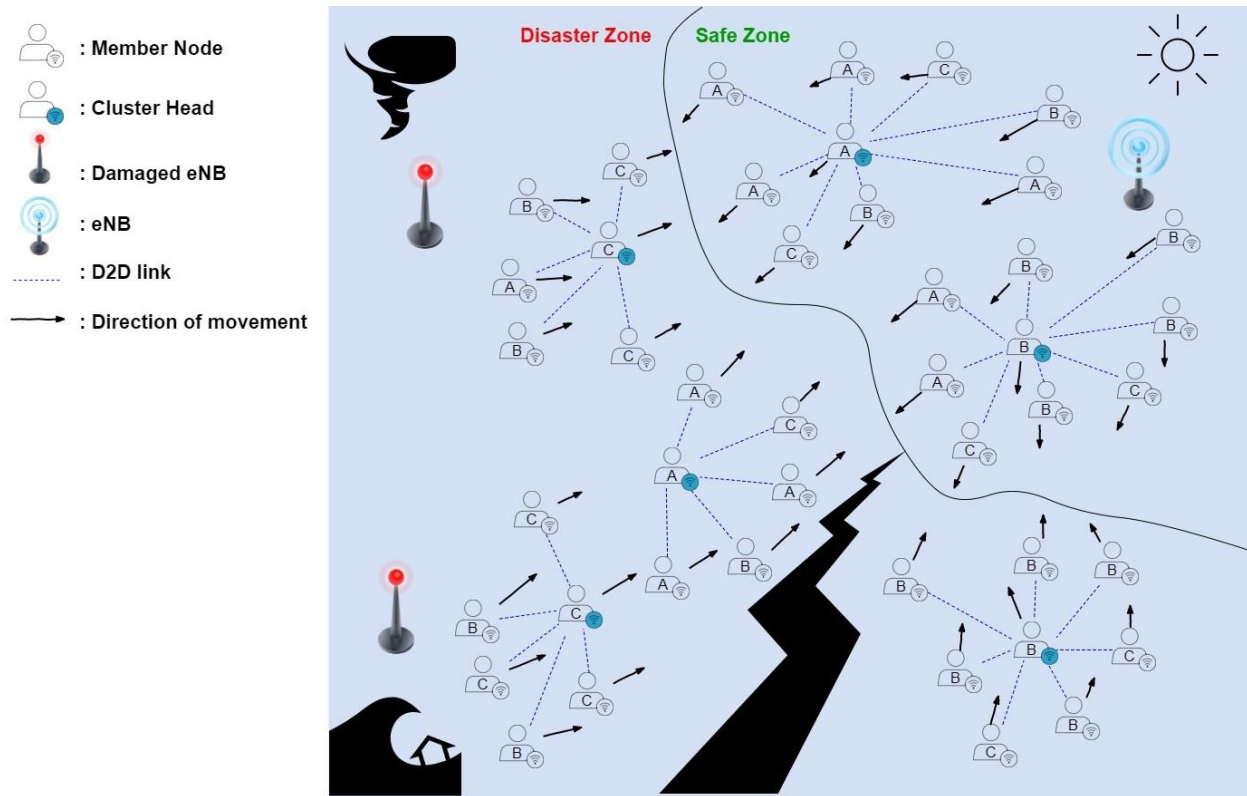
Τέλος, ένας ακόμα στόχος του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία είναι να διευκολύνεται η επικοινωνία μεταξύ των συσκευών που ανταλλάσσουν δεδομένα συχνά και ταυτόχρονα οι συχνές αυτές ζεύξεις να έχουν μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας. Για να επιτευχθεί αυτό είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη το ενδιαφέρον επικοινωνίας της μιας συσκευής με την άλλη, κατά την οργάνωση του δικτύου [32], [33]. Σε ένα δίκτυο κινητών συσκευών λόγω διαφόρων παραγόντων, μια συσκευή έχει μεγάλο ενδιαφέρον επικοινωνίας με κάποιες, ενώ σημαντικά μικρότερο ενδιαφέρον με κάποιες άλλες. Οι σχέσεις ενδιαφέροντος ενδέχεται να ανάγονται σε διαφορετικές αιτίες. Οι κοινωνικές σχέσεις, τα επαγγέλματα ή υπαγωγή σε φορείς ή ευρύτερες ομάδες και γενικότερα ο κοινωνικός ρόλος μεταξύ των χρηστών των συσκευών αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν το ενδιαφέρον επικοινωνίας. Σε μια κατάσταση έκτακτης ανάγκης αλλά και υπό ομαλών συνθηκών ένας άνθρωπος είναι πιο πιθανό να επιδιώξει να επικοινωνήσει με την οικογένεια του ή με άλλους με τους οποίους υπάγεται σε κοινό φορέα ή κοινό επαγγελματικό χώρο ή κοινωνικό κύκλο. Επιπλέον, κατά την οργάνωση κάθε ομάδας επέμβασης, όπως πυροσβεστικής, διασωστικών φορέων ή αστυνομικών δυνάμεων απαιτείται συχνή, ταχεία και κυρίως αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των μελών της ομάδας ακόμα και αν το δίκτυο κορμού έχει καταστεί μη λειτουργικό. Επίσης, η αρχιτεκτονική της εφαρμογής που χρησιμοποιείται στο δίκτυο είναι πιθανόν να επηρεάσει τις σχέσεις ενδιαφέροντος επικοινωνίας μέσα στο σύστημα. Έτσι, είναι εμφανές ότι η κατάσταση των συσκευών που εμφανίζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον επικοινωνίας στην ίδια ομάδα έχει την δυνατότητα να δώσει σημαντικό πλεονέκτημα στο δίκτυο καθώς καθιστά πιο γρήγορη και άμεση την συχνή επικοινωνία.

## 4.2 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ

Η αλγοριθμική λύση που προτείνεται σε αυτήν την εργασία είναι προσανατολισμένη στα δίκτυα δημοσίας ασφάλειας. Έτσι για να την εξετάσουμε στο ιδιαίτερο περιβάλλον που καλείται να εφαρμοστεί, θεωρούμε τις ακόλουθες συνθήκες φυσικού περιβάλλοντος:

Αρχικά θεωρούμε έναν ενεργό σταθμό βάσης ικανό να καλύψει ένα μικρό τμήμα της περιοχής στην οποία βρίσκονται κάποιες συσκευές. Έπειτα, υποθέτουμε ότι ο υπόλοιπος εξοπλισμός παροχής κάλυψης (άλλοι σταθμοί βάσης ή άλλος εξοπλισμός του δικτύου κορμού) έχει υποστεί σημαντική βλάβη και έχει καταστεί ως εκ τούτου μη λειτουργικός. Έτσι

βρισκόμαστε σε μια στην κατάσταση όπου η πλειοψηφία των συσκευών βρίσκονται εκτός κάλυψης λόγω κάποιας κατάστασης έκτακτης ανάγκης(π.χ. φυσική καταστροφή, ανθρώπινη κακόβουλή ενέργεια) και εμφανίζουν έντονη κινητικότητα η οποία όμως ακολουθεί κάποια μοτίβα. Σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, συχνά παρατηρούμε δυο κυρίαρχες μορφές κινητικότητας. Από την μια πλευρά, ο πληθυσμός που βρίσκεται στην πληγείσα περιοχή τείνει να κινείται μακριά από το κέντρο της. Από την άλλη όμως πλευρά παρουσιάζεται και κινητικότητα προς την πληγείσα περιοχή από ομάδες ή φορείς που συντρέχουν να παράσχουν βοήθεια ή να επαναφέρουν την τάξη ανάλογα με το περιστατικό. Τέλος ο πληθυσμός που δεν ανήκει σε κάποια από τις παραπάνω κατηγορίες τείνει να αποφύγει να περάσει από μια περιοχή υψηλού κινδύνου. Λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερόμενα μοτίβα κινητικότητας είναι δυνατόν να δώσουμε στον αλγόριθμο ένα συγκριτικό προβάδισμα απόδοσης σε σχέσεις με άλλες προσεγγίσεις γενικού σκοπού. Στην εικόνα που ακολουθεί(Εικόνα 2) παρουσιάζεται η τοπολογία που παρουσιάσαμε παραπάνω.



Εικόνα 2 – Τοπολογία συστήματος

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, οι πλειοψηφία των συσκευών είναι εκτός του πεδίου κάλυψης του σταθμού βάσης και μόνο μερικές από αυτές βρίσκονται εντός. Η τοποθέτηση των συσκευών κατά αυτόν τον τρόπο έχει στόχο να προσομοιώσει την κατάσταση κατά την οποία ένας ή περισσότεροι σταθμοί βάσης (eNodeB) σε μια περιοχή είναι εκτός λειτουργίας, για

οποιοδήποτε λόγο (καταστροφή ή βλάβη), ενώ κάποιο γειτονικοί σταθμοί βάσης λειτουργούν κανονικά.

### **4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ**

Ο αλγόριθμος που αναπτύξαμε περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο αυτό. Για να διευκολύνουμε την κατανόηση, μπορούμε να διαχωρίσουμε δύο μέρη του αλγορίθμου που αποσκοπούν στην επίλυση δυο διαφορετικών προβλημάτων, τα οποία από κοινού απαρτίζουν το πρόβλημα της ομαδοποίησης των συσκευών σε ένα δίκτυο ασυρμάτων συσκευών.

Το πρώτο πρόβλημα είναι η επιλογή του καταλλήλου κόμβου κεφαλής της ομάδας. Ο κόμβος αυτός θα είναι επιφορτισμένος με το ρόλο της οργάνωσης της ομάδας και θα έχει καθοριστική λειτουργία στη δρομολόγηση των δεδομένων με σκοπό την επίτευξη της επικοινωνίας σε επόμενο στάδιο.

Το δεύτερο πρόβλημα είναι η επιλογή των κόμβων που θα απαρτίσουν την ομάδα που θα κατασκευαστεί. Κάθε κόμβος πρέπει να αποφασίσει με ποιο κόμβο - κεφαλή θα συνδεθεί και συνεπώς σε ποια ομάδα θα γίνει μέλος. Τα δυο προβλήματα αυτά είναι αλληλένδετα και αλληλεξαρτώμενα και η σειρά με την οποία παρουσιάζονται εδώ είναι η ίδια με την οποία τα επιλύει ο αλγόριθμος που προτείνεται. Είναι προφανές ότι μια διαφορετική προσέγγιση θα μπορούσε να αντιμετωπίσει τα δυο αυτά προβλήματα με την αντίστροφη σειρά ή ενδεχομένως και σε ένα στάδιο ταυτόχρονα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, η μορφή της δρομολόγησης, αλλά και όλων των μετέπειτα απαραίτητων ενεργειών για την επίτευξη του τελικού στόχου, δηλαδή της αποστολής πακέτων δεδομένων από μια τερματική συσκευή σε μια άλλη, είναι εκτός του αντικειμένου της παρούσας εργασίας και δεν εξετάζεται.

#### **4.3.1 Βήματα εκτέλεσης**

Ο αλγόριθμος έχει 8 διακριτά βήματα εκτέλεσης:

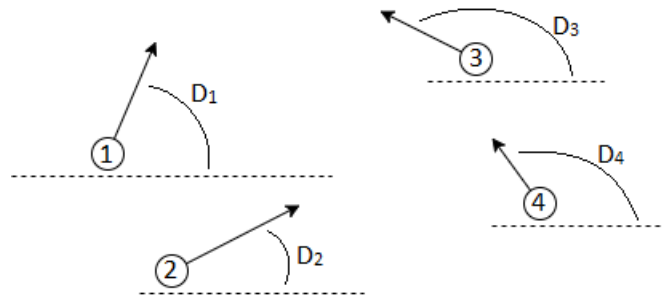
Αρχικά όλοι ο κόμβοι ξεκινούν σε κατάσταση «μη συνδεδεμένος». Αλλαγή της κατάστασης τους συμβαίνει όταν εδραιωθεί κάποια μορφή σύνδεσης σύμφωνα με την ακόλουθη περιγραφή.

#### 4.3.1.1 Ανακάλυψη γειτόνων.

Στο πρώτο αυτό βήμα όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται σε κατάσταση «μη συνδεδεμένος» αποστέλλουν ένα μήνυμα ευρυεκπομπής, ώστε να γίνουν αντιληπτοί από τους γειτονικούς τους κόμβους. Το μήνυμα αυτό περιέχει αφενός μεν το αναγνωριστικό του κόμβου που το αποστέλλει αφετέρου δε την κατεύθυνση κίνησής του. Έχει δηλαδή την εξής μορφή:

$$\text{Hello Message} = \{ ID, \text{Direction} \}$$

Η κατεύθυνση προσδιορίζεται ως γωνία με τον οριζόντιο άξονα σε μοίρες. Οι κόμβοι που βρίσκονται στην γειτονική περιοχή και παραμένουν σε κατάσταση «μη συνδεδεμένος» λαμβάνουν το μήνυμα και αποθηκεύουν την πληροφορία αυτή, ώστε να χρησιμοποιηθεί στο επόμενο στάδιο.



#### 4.3.1.2 Υπολογισμοί σχετικής κατεύθυνσης κίνησης.

Σε αυτό το στάδιο κάθε κόμβος που βρίσκεται σε κατάσταση «μη συνδεδεμένος» χρησιμοποιεί τα μηνύματα που έλαβε στο προηγούμενο στάδιο για να υπολογίσει την σχετική κίνηση του με τον κάθε κόμβο γείτονα. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$RD_n = | \text{Ίδια κατευθυνση} - \text{Κατεύθυνση γειτονικού κόμβου}_n |$$

Ακολούθως η τιμή  $RD_n$  που προκύπτει για κάθε γείτονα συγκρίνεται με την τιμή κατωφλιού (*threshold value*). Η σταθερά αυτή είναι κοινή για όλους τους κόμβους και αποτελεί την παράμετρο ρύθμισης του αλγορίθμου. Η τιμή της μπορεί να μεταβληθεί κατάλληλα, ώστε να «χαλαρώσει» τα όρια ή αντιθέτως να τα καταστήσει πιο «αυστηρά». Έτσι ανακύπτει δυνατότητα για προσαρμογή του δικτύου ανάλογα με την μορφή κινητικότητας των συσκευών. Αν η τιμή της *σχετικής κατεύθυνσης κίνησης* βρεθεί μικρότερη από την τιμή κατωφλιού για κάποιο κόμβο, τότε αυτός λαμβάνεται υπόψιν στα επόμενα στάδια ομαδοποίησης (Κριτήριο 1). Σε αντίθετη περίπτωση, η τιμή μπορεί να απορριφθεί. Ο αριθμός των συσκευών που βρίσκονται εντός της εμβέλειας της συσκευής και πληρούν το Κριτήριο 1 συμβολίζεται ως  $N$ . Έτσι προκύπτει ένας αρχικός διαχωρισμός των συσκευών, που ενδέχεται να βρίσκονται στην ίδια περιοχή, με βάση την μορφή της κίνησης τους. Τα κίνητρα του διαχωρισμού αυτού αναλύονται σε επόμενο μέρος.

#### **4.3.1.3 Υπολογισμός της συγκεντρωτικής σχετικής κατεύθυνσης.**

Στην συνέχεια όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται σε κατάσταση «μη συνδεδεμένος», υπολογίζουν μια τιμή την οποία ονομάζουμε *συγκεντρωτική σχετική κατεύθυνση* (ΣΣΚ) ή *aggregate relative direction* ( $AgRD$ ). Η τιμή αυτή υπολογίζεται ως εξής:

$$AgRD = var_0(RD_1, \dots, RD_n)$$

Όπου  $var_0$  είναι η διακύμανση των τιμών *σχετικής κατεύθυνσης κίνησης* υπολογισμένη με βάση το μηδέν (και όχι τον μέσο όρο των τιμών). Στον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιούνται μόνον οι τιμές που είναι μικρότερες από την τιμή κατωφλιού και όχι όλες οι τιμές, όπως επισημάνθηκε παραπάνω. Ο τρόπος αυτός υπολογισμού της διακύμανσης γίνεται κατά τρόπο παρόμοιο με αυτόν που χρησιμοποιείται στον αλγόριθμο MOBIC[25] για τον υπολογισμό της *σχετικής κινητικότητας*.

#### **4.3.1.4 Αποστολή ευρεκπομπής**

Στη συνέχεια ακολουθεί ένα μήνυμα ευρεκπομπής που περιέχει πληροφορίες που έχει υπολογίσει κάθε κόμβος με βάση τα στοιχεία που έχει συλλέξει από τα προηγούμενα μηνύματα και υπολογισμούς. Το μήνυμα αυτό έχει την μορφή:

$$\text{Broadcast Message} = \{ ID, AgRD_{ID}, E_{ID}, R_{ID}, N_{ID}, P_{ID} \}$$

$ID$ : Ο αναγνωριστικός αριθμός του κόμβου που το αποστέλλει

$AgRD_{ID}$ : Η συγκεντρωτική σχετική κατεύθυνση του συγκεκριμένου κόμβου που υπολογίστηκε σε προηγούμενο στάδιο.

$E_{ID}$ : Η τρέχουσα στάθμη ενέργειας της συσκευής

$R_{ID}$ : Ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας της συσκευής

$N_{ID}$ : Ο αριθμός των κόμβων που βρίσκονται εντός της εμβέλειας της συσκευής και πληρούν το Κριτήριο 1

$P_{ID}$ : Το άθροισμα της λαμβανομένης ισχύος σήματος από κάθε κόμβο που πληροί το Κριτήριο 1.

#### 4.3.1.5 Υπολογισμός βάρους $W_1$

Το στάδιο αυτό αποσκοπεί στον υπολογισμό μιας μετρικής που θα υποδείξει τον κατάλληλο κόμβο για να λάβει τον ρόλο του «Κόμβος Κεφαλή». Το βάρος  $W_1$  αποτελεί την μετρική αυτή και υπολογίζεται ως εξής:

$$W_{1n} = A_1 * AgRD_n + A_2 * (1 - E_n) + A_3 * R_n + A_4 * \left( \frac{d_n}{d_{range}} \right)$$

Κάθε συσκευή ξεχωριστά υπολογίζει το παραπάνω βάρος, για κάθε γειτονικό κόμβο από τον οποίο έλαβε το μήνυμα ευρυεκπομπής του σταδίου 4 και πληροί το Κριτήριο 1. Έτσι μετά τον υπολογισμό αυτόν και κάθε κόμβος έχει την απαραίτητη πληροφορία για την εκλογή του «Κόμβου Κεφαλής» χωρίς να απαιτείται να ανταλλαχθεί κανένα επιπλέον μήνυμα. Οι όροι  $A_1, A_2, A_3$  και  $A_4$  αποτελούν σταθερές που ρυθμίζονται από τον σχεδιαστή του δικτύου ώστε να προσαρμόζεται το δίκτυο αναλόγως με τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής. Με  $d_{range}$  συμβολίζεται η εμβέλεια των συσκευών του δικτύου και με  $d_n$  η απόσταση που αντιστοιχεί στην τιμή ισχύος  $\frac{P_n}{N_n}$  σύμφωνα με το νομό τους Friis.

#### 4.3.1.6 Επιλογή κόμβων – κεφαλών.

Η μετρική  $W_1$  έχει διαμορφωθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε όσο μικρότερη είναι η τιμή της, τόσο πιο κατάλληλος είναι ο αντίστοιχος κόμβος για τον ρόλο του «Κόμβου Κεφαλής». Συνεπώς, το πρόβλημα εκλογής του κατάλληλου κόμβου ανάγεται σε πρόβλημα εύρεσης του ελαχίστου σε έναν πίνακα που έχει, το μέγιστο, τόσα στοιχεία, όσα και οι γειτονικοί κόμβοι κάθε συσκευής. Κάθε κόμβος βρίσκει το ελάχιστο αυτό ανεξάρτητα από τους υπολοίπους. Στην περίπτωση που η ελάχιστη τιμή είναι αυτή του κόμβου που κάνει τον υπολογισμό, τότε αυτός ανακηρύσσεται ως «Κόμβος Κεφαλής». Έτσι εξασφαλίζεται ότι ποτέ δυο γειτονικοί κόμβοι δεν θα γίνουν κόμβοι κεφαλής κατά την δημιουργία των ομάδων.

#### 4.3.1.7 Υπολογισμός βάρους $W_2$

Στο στάδιο αυτό υπολογίζεται μια δεύτερη μετρική,  $W_2$ , με βάση την οποία θα εντοπιστούν τα μέλη της κάθε ομάδας. Το βάρος  $W_2$  υπολογίζεται ξεχωριστά, από κάθε κόμβο που δεν έχει λάβει το ρόλο του «Κόμβου Κεφαλής» στο προηγούμενο στάδιο και θα επιχειρήσει να συνδεθεί σε μια τέτοια συσκευή. Ο υπολογισμός περιλαμβάνει στοιχεία κινητικότητας (σχετική κατεύθυνση κίνησης  $RD$ ) και ενδιαφέροντος επικοινωνίας ( $i$ ). Με τον όρο ενδιαφέρον επικοινωνίας  $i(j, n)$ , μεταξύ του κόμβου  $j$  με τον κόμβο  $n$ , ορίζουμε μια μετρική που λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1 και αντιστοιχεί στη συχνότητα ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των κόμβων αυτών ή στην σημαντικότητα εδραίωσης καναλιού επικοινωνίας μεταξύ τους. Συσκευές με μεγάλο ενδιαφέρον επικοινωνίας, π.χ. τερματικές συσκευές που αντιστοιχούν σε χρήστες που ανήκουν στην ίδια ομάδα ή φορέα (πυροσβεστικά, διασωστικά, αστυνομικά σώματα κτλ.) έχουν υψηλή τιμή  $i$ . Αντίστοιχα απλοί χρήστες που ενδέχεται να έχουν κοινωνικούς δεσμούς και ως εκ τούτου έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιδιώξουν επικοινωνία μεταξύ του έχουν πάλι υψηλή τιμή ενδιαφέροντος επικοινωνίας. Γενικότερα, η παράμετρος αυτή έχει σκοπό να εννοήσει την εντάξει συσκευών με συχνή επικοινωνία στην ίδια ομάδα ώστε να η τελευταία να καθίσταται άμεση και ταχεία. Ο παρακάτω τύπος δίνει την σχέση υπολογισμού της μετρικής αυτής.

$$W_{2n} = A_5 * \frac{RD_n}{RD_{max}} + A_6 * (1 - i(j, n))$$

Οι όροι  $A_5$  και  $A_6$  αποτελούν σταθερές που αποδίδουν την κατάλληλη βαρύτητα σε κάθε παράμετρο ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή. Ο όρος  $RD_n$  αντιστοιχεί στην *σχετική κατεύθυνση κίνηση* μεταξύ του κόμβου  $j$  που εκτελεί τον υπολογισμό και του υποψήφιου προς σύνδεση «Κόμβου Κεφαλής» με αναγνωριστικό  $n$ . Τέλος, με  $i(j, n)$  συμβολίζουμε την τιμή ενδιαφέροντος επικοινωνίας μεταξύ του κόμβου  $j$  και του αντίστοιχου «Κόμβου Κεφαλής».



#### 4.3.1.8 Δημιουργία ομάδων.

Στο τελικό αυτό στάδιο κάθε συσκευή που δεν έχει λάβει το ρόλο του «Κόμβου Κεφαλή» θα προσπαθήσει να συνδεθεί σε μια τέτοια συσκευή. Για να προβεί στη επιλογή εξετάζει την μετρική  $W_2$  που υπολόγισε για κάθε «Κόμβου Κεφαλή» που βρίσκεται στην εμβέλεια του και τελικώς επιλεγεί αυτόν που έχει την ελάχιστη τιμή αφού πρώτα βεβαιωθεί ότι ο κόμβος αυτός πληροί το Κριτήριο 1. Τότε αποστέλλει μήνυμα σύνδεσης στην αντίστοιχη συσκευή η οποία με τη σειρά της προσθέτει τον κόμβο στην λίστα με τους «Κόμβους Μέλη» που την απαρτίζουν. Κάθε «Κόμβος Μέλος» δεν διαθέτει καμία γνώση για την υπόλοιπη ομάδα και επικοινωνεί πάντα μέσω του αρχηγού της ομάδας με τον οποίο είναι συνδεδεμένος.

Πρέπει να τονισθεί ότι, ο αλγόριθμος ορίζει ένα μέγιστο αριθμό συσκευών που είναι δυνατόν να συνδεθούν με ένα «Κόμβου Κεφαλής». Στην περίπτωση που έχουν ήδη συνδεθεί τόσες συσκευές, όσες υποδεικνύει ο μέγιστος αυτός αριθμός, τότε ο «Κόμβος Κεφαλή» δεν δέχεται επιπλέον κόμβους στην ομάδα. Μια συσκευή που επιχειρεί να συνδεθεί σε μια ομάδα που έχει φτάσει στο μέγιστο των διασυνδεδεμένων συσκευών απορρίπτεται, όταν κάνει αίτηση για σύνδεση(μέσω αντίστοιχου μηνύματος) και παραμένει σε κατάσταση «μη συνδεδεμένος». Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι κανένας «Κόμβος Κεφαλή» δε θα επιφορτωθεί με μεγαλύτερο αριθμό συσκευών από αυτόν που δύναται να εξυπηρετήσει.

#### 4.3.2 Άλλες Παρατηρήσεις

Ο αλγόριθμος αυτός παράγει ομάδες οι οποίες έχουν «διάμετρο» μικρότερη ή ίση του δυο. Συνοπτικά οι κόμβοι μπορεί να βρίσκονται σε 2 πιθανές καταστάσεις : «μη συνδεδεμένος» και «συνδεδεμένος». Όταν βρίσκονται σε κατάσταση «συνδεδεμένος» ενδέχεται να έχουν τον ρόλο «Κόμβος Μέλος» ή «Κόμβος Κεφαλή», όροι που δανείζονται από τους αγγλικούς αντίστοιχους όρους που εμφανίζονται στην βιβλιογραφία (*Cluster Member, Cluster Head*)

#### 4.3.3 Συμπεριφορά στο χρόνο.

Κάθε κόμβος που εισέρχεται στο δίκτυο και αποσκοπεί να γίνει μέρος του, ξεκινά με κατάσταση «μη συνδεδεμένος» όπως περιεγράφηκε παραπάνω. Για να ομαδοποιηθεί κατάλληλα ακολουθεί τα προαναφερόμενα στάδια του αλγορίθμου 1-7. Όταν πλέον είναι μέρος κάποιας ομάδας με τίτλο «Κόμβος Μέλος» και έχει μεταβεί σε κατάσταση «συνδεδεμένος», τότε

κάθε φορά που επιθυμεί να αποστείλει δεδομένα, προσπαθεί να το κάνει με βάση την τρέχουσα γνώση του για την τοπολογία. Εάν δεν επιτύχει να επικοινωνήσει με τον Αρχηγό της ομάδας στην οποία έχει ανατεθεί, τότε αυτομάτως μεταβαίνει σε κατάσταση «μη συνδεδεμένος» και ξεκινάει εκ νέου την διαδικασία ομαδοποίησης. Αν δεν επιθυμεί να επικοινωνήσει και η σύνδεση δεν επιβεβαιώνεται από άλλη μορφή ανταλλαγής δεδομένων (π.χ. μηνύματα δρομολόγησης) τότε ανά τακτά χρονικά διαστήματα αποστέλλει ένα κενό μήνυμα (heartbeat) ώστε να λάβει γνώση ο αντίστοιχος «Κόμβος Κεφαλή» ότι η ζεύξη είναι ενεργή. Από την άλλη πλευρά, κάθε «Κόμβος Κεφαλή» που λαμβάνει μηνύματα heartbeat απαντά με μήνυμα επιβεβαίωσης.

Καθώς οι κόμβοι κινούνται και η τοπολογία μεταβάλλεται ο αλγόριθμος προβαίνει σε διορθωτικές κινήσεις και όταν πλέον είναι ασύμφορο να διατηρηθεί μια ομάδα, την διαλύει, ώστε να αναδημιουργηθεί με βάση τα νέα δεδομένα.

#### 4.3.4 Διάλυσης ομάδας

Η ήδη σχηματισμένη ομάδα διαλύεται στις ακόλουθες περιπτώσεις:

1. Όταν ο «Κόμβος Κεφαλής» δεν μπορεί να επικοινωνήσει πλέον με ένα ποσοστό των αρχικά συνδεδεμένων κόμβων μέλη της ομάδας του, ή η διαφορετικά, όταν ο τρέχων αριθμός των συνδεδεμένων κόμβων, εξαιρουμένων των κόμβων που προσαρτήθηκαν αργότερα,  $TA$ , γίνει μικρότερο από το γινόμενο του ποσοστού πλήθους κόμβων διάλυσης επί τον αριθμό των αρχικά συνδεδεμένων κόμβων της ομάδας.

Συνθήκη διάλυσης 1:

$$(ΠΣΚ) < (ΠΑΚ) * (ΠΠΚΔ)$$

ΠΣΚ : Πλήθος συνδεδεμένων κόμβων

ΠΑΚ : Πλήθος αρχικών κόμβων

ΠΠΚΔ : Ποσοστό πλήθους κόμβων διάλυσης

2. Όταν η στάθμη ενέργειας του «Κόμβου Κεφαλής» ελαττωθεί σε τιμή μικρότερη από το γινόμενο της στάθμης ενέργειας του κατά την δημιουργία της ομάδας (κατά την ανάληψη του ρόλου «Κόμβος Κεφαλής») επί το ποσοστό ενέργειας διάλυσης.

Συνθήκη διάλυσης 2:

(Τρέχουσα ενέργεια)

$< (\text{ενέργεια κατά την δημιουργία}) * (\text{ποσοστό ενέργειας διάλυσης})$

Τα δύο παραπάνω ποσοστά, το ποσοστό πλήθους κόμβων διάλυσης ΠΠΚΔ και το ποσοστό ενέργειας διάλυσης αποτελούν δύο μεταβλητές παραμετροποίησης του αλγορίθμου και μαζί με τα βάρη  $A_1$ - $A_6$ , καθορίζουν την συμπεριφορά του αλγορίθμου και δίνουν την δυνατότητα για προσαρμογή σε διαφορετικά περιβάλλοντα και συνθήκες εφαρμογής.

#### 4.3.5 Διορθωτικές ενέργειες

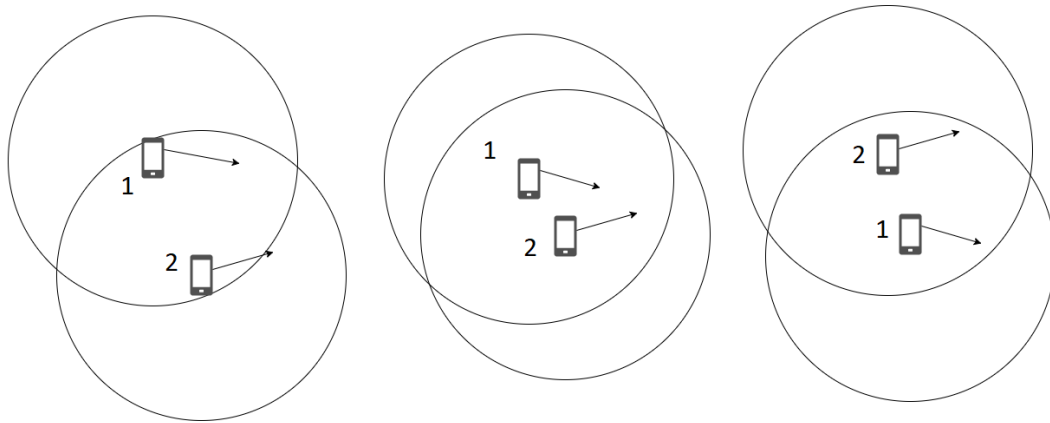
Όταν μια συσκευή αποσπαστεί από τον «Κόμβο Κεφαλής» στο οποίο ήταν συνδεδεμένη λόγω της κίνησης του εκτός της εμβέλειας του, τότε πριν επανεκκινήσει την διαδικασία ομαδοποίησης, ανιχνεύοντας τους περιβάλλοντες «μη συνδεδεμένους» κόμβους(βήμα 1), επιχειρεί πρώτα να ανιχνεύσει άλλους «Κόμβους Κεφαλής». Αν ανιχνεύσει έναν ή περισσότερους, τότε ελέγχει την σχετική κίνηση του σε σχέση με την ίδια κατεύθυνση κίνησης του και αν αυτή πληροί το Κριτήριο 1, τότε ο κόμβος αυτός ενσωματώνεται στην ήδη υπάρχουσα ομάδα χωρίς να απαιτείται πλήρης επανεκκίνηση του αλγορίθμου. Αν βρεθούν παραπάνω από ένας, τότε επιλέγεται αυτός με την μικρότερη σχετική κατεύθυνση κίνησης  $RD$ . Η ενέργεια αυτή αποσκοπεί στην ελάττωση των απαιτούμενων μηνυμάτων ελέγχου για την συντήρηση του δικτύου και συνεπώς στην μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας.

#### 4.3.6 Κίνητρα παρούσας υλοποίησης ομαδοποίησης

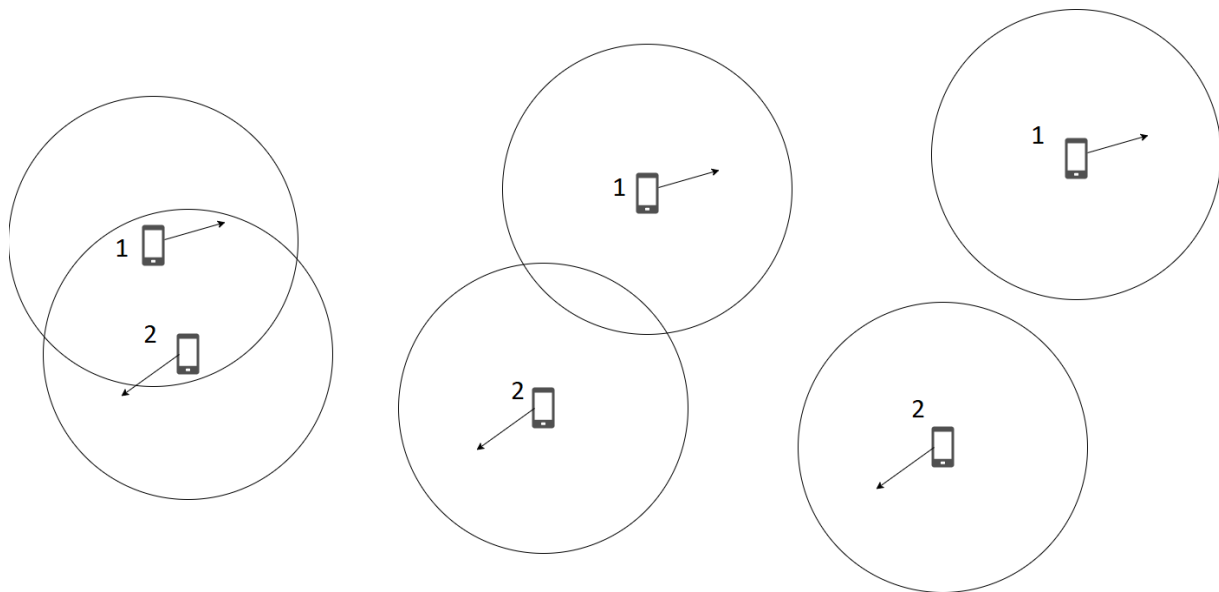
Κάθε παράμετρος που λαμβάνει μέρος στον υπολογισμό του βάρους  $W_1$  αποσκοπεί στο να βελτιώσει την απόδοση του αλγορίθμου, τόσο από άποψη κατάλυσης ενέργειας, όσο και από άποψη σταθερότητας των δημιουργουμένων ομάδων. Πιο αναλυτικά:

Η χρήση της τιμής *κατωφλιού* για την διαχωρισμό των συσκευών που θα απαρτίσουν μια ομάδα βελτιώνει την σταθερότητα, αυξάνοντας παράλληλα τον μέσο χρόνο ζωής των ομάδων αυτών. Αυτό συμβαίνει διότι κόμβοι με παρόμοια κατεύθυνση κίνησης τείνουν να παραμείνουν για περισσότερη ώρα εντός εμβέλειας και άρα να διατηρήσουν την σύνδεση τους. Αντίθετα, είναι επιθυμητό οι συσκευές που έχουν αντίθετες κατευθύνσεις να μην ομαδοποιηθούν καθώς σε μικρό χρονικό διάστημα θα βρεθούν μακριά η μια από την άλλη και συνεπώς θα χαθεί η

ζεύξη μεταξύ τους. Αυτό το φαινόμενο όπου διαφορετικές ομάδες συσκευών έχουν αντίθετες κατευθύνσεις κίνησης εμφανίζεται σε μεγάλο βαθμό σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.



Εικόνα 3 – Κίνηση με παρόμοια κατεύθυνση



Εικόνα 4 - Κίνηση με έντονα διαφορετή κατεύθυνση

Σε τέτοιες περιστάσεις συχνά υπάρχουν ομάδες πληθυσμού που εκκενώνουν την πληγείσα περιοχή, ενώ ταυτόχρονα ομάδες που αποσκοπούν στον έλεγχο της κατάστασης, την επαναφορά της τάξης ή την παροχή βοήθειας των πληγέντων, συρρέουν προς την περιοχή. Παρατηρούνται δηλαδή δύο μορφές κινητικότητας. Συνεπώς είναι λογικό αναπτυχθεί κάποιος μηχανισμός ώστε να αποτρέπονται συσκευές που έχουν αντίθετες κατευθύνσεις από το να

σχηματίσουν ομάδα, αν επιθυμούμε να αυξήσουμε τον χρόνο ζωής των ομάδων αυτών, καθώς οι συσκευές με έντονα διαφορετικές κατευθύνσεις κίνησης θα σχηματίσουν παροδικές ζεύξεις.

Με τον υπολογισμό της *συγκεντρωτικής σχετικής κατεύθυνσης* επιδιώκεται να ποσοτικοποιηθεί η ομοιότητα της κίνησης ενός κόμβου με την αντίστοιχη κινητικότητα που εμφανίζεται στην περιοχή. Ο συγγραφέας του [31](WCA: A Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks), ο οποίος επιχειρεί μια παρόμοια προσέγγιση επιλογής «*Κόμβου Κεφαλής*» κάνοντας χρήση μιας μετρικής που προκύπτει ως συνδυασμός επιμέρους παραμέτρων, κάνει την υπόθεση ότι καταλληλότερος κόμβος για την ανάληψη του ρολού «*Κόμβου Κεφαλής*» είναι αυτός με την ελάχιστη κινητικότητα. Μια τέτοια υπόθεση ενδέχεται να αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση που έχουμε συσκευές με μικρές ταχύτητες κίνησης. Αντιθέτως, σε μια κατάσταση εκάστης ανάγκης οι κόμβοι είναι πολύ πιθανό να κινούνται ταχέως, οπότε η παραπάνω προσέγγιση δεν θα ικανοποιεί την απαίτηση της δημιουργίας σταθερών ομάδων με μεγάλο μέσο χρόνο ζωής.

Σημείωση: Ως χρόνος ζωής μιας ομάδας ορίζουμε το χρόνο μεταξύ της επιλογής του «*Κόμβου Κεφαλής*» και της στιγμής διάλυσής της. Η ομάδα θεωρούμε ότι διαλύεται όταν ο «*Κόμβος Κεφαλής*» αποδεσμεύσει όλα τα μέλη της ομάδας ή όταν ο τελευταίος δεν δύναται να επικοινωνήσει με κανένα από αυτά.

Όπως έγινε φανερό και από την προηγούμενη ανάλυση, ο «*Κόμβος Κεφαλής*» είναι πάντα επιβαρυνμένος με αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Αυτό συμβαίνει διότι ο κόμβος αυτός λειτουργεί ως δρομολογητής για την επικοινωνία όλων των υπόλοιπων κόμβων της ομάδας με συσκευές εκτός της ομάδας. Επιπλέον η ισχύς που απαιτείται για να επικοινωνήσει με άλλους «*Κόμβους Κεφαλής*» είναι επίσης αυξημένη, διότι συνήθως αυτοί βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από τους κόμβους της ομάδας. Τέλος, ο «*Κόμβος Κεφαλής*» ενδέχεται να οργανώνει την επικοινωνία και σε κατώτερο επίπεδο, όπως για παράδειγμα η ανάθεση πόρων σε κάθε συσκευή της ομάδας κάτι που σημαίνει επιπλέον κατανάλωση. Έτσι, η τρέχουσα στάθμη ενέργειας της κάθε συσκευής,  $E_{ID}$  εισέρχεται στον υπολογισμό του βάρους  $W_1$  με σκοπό να ευνοήσει τους κόμβους με υψηλή διαθέσιμη ενέργεια έναντι αυτών που διαθέτουν μικρότερη.

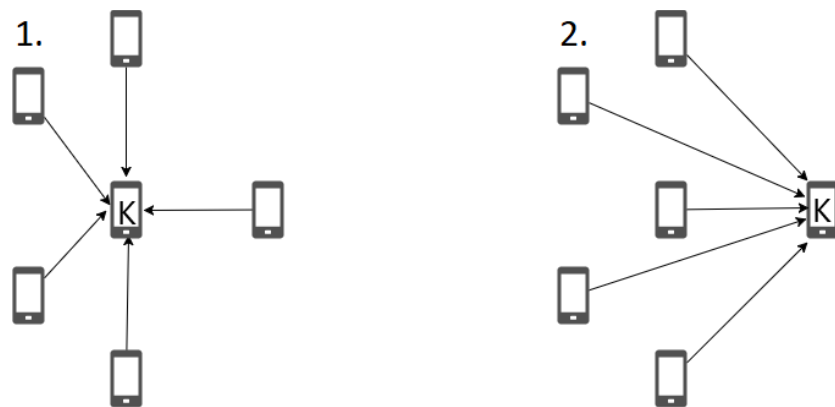
Από την άλλη πλευρά, γίνεται λόγος για ένα δίκτυο με συσκευές διαφορετικών προδιαγραφών. Συνεπώς, σε ένα ετερογενές δίκτυο είναι σημαντικό να λάβουμε πληροφορία και για το ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας της κάθε συσκευής,  $R_{ID}$ . Η διαθέσιμη ενέργεια αποτελεί μη αξιοποιήσιμο στοιχείο αν δεν συνοδεύεται από την πληροφορία αυτή όταν κάνουμε λόγο για ένα δίκτυο που απαρτίζεται από διαφορετικού τύπου συσκευές. Για παράδειγμα, ένας κόμβος με στάθμη ενέργειας 40 μονάδες και ρυθμό κατανάλωσης 2 μονάδες ανά μονάδα χρόνου είναι προτιμότερος από έναν κόμβο με στάθμη ενέργειας 80 μονάδες και ρυθμό κατανάλωσης 5 μονάδες ανά μονάδα χρόνου.

Ακόμα, το άθροισμα της λαμβανομένης ισχύς σήματος από κάθε κόμβο,  $P_{ID}$ , έχει στόχο να ελαττώσει την μέση ενέργεια που απαιτείται για την επικοινωνία κάθε «Κόμβου Κεφαλής» με τα μέλη της ομάδας. Ιδανικά είναι επιθυμητό ο «Κόμβος Κεφαλής» να βρίσκεται στο κέντρο της ομάδας. Η εξήγηση δίνεται παρακάτω:

Είναι γνωστό ότι κατά την μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον ελεύθερο χώρο, η ενέργεια που απαιτείται για την μετάδοση ενός σήματος αυξάνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης όπως περιγράφεται από το νόμο του Friss.

$$\frac{P_r}{P_t} = D_t D_r \left( \frac{\lambda}{4 \pi d} \right)^2$$

Συνεπώς, για ελαχιστοποιήσουμε την απαιτούμενη ενέργεια εκπομπής, αρκεί ο κόμβος που θα επιλεγεί να βρίσκεται στο κέντρο της ομάδας. Έτσι η μετρική  $P_{ID}$ , έχει σκοπό να τους κόμβους αυτούς που έχουν καλύτερη θέση στο χώρο, σύμφωνα με τα παραπάνω.



Εικόνα 5 - Επίδραση θέσης Κόμβου Κεφαλής στην απαιτούμενη ενέργεια εκπομπής

Τέλος, για να μπορούμε να αξιολογήσουμε αποτελεσματικά την πληροφορία της ισχύος κάθε εκπομπής είναι απαραίτητο να την ανάγουμε στο πλήθος των συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστεί αυτό το άθροισμα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε το  $N_{ID}$ .

#### 4.3.7 Αναμενόμενα αποτελέσματα

Αρχικά είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η ανάγκη για «έξυπνη» κατανάλωσή ενέργειας έρχεται σε σύγκρουση με την ανάγκη για σταθερότητα του δικτύου. Μέσα από την παραπάνω προσέγγιση αποσκοπούμε να εντοπίσουμε την βέλτιστη «μέση» λύση που θα αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα και στις δυο απαιτήσεις. Είναι προφανές ότι ένας

αλγόριθμος που θα εστίαζε αποκλειστικά στην κατανάλωση ενέργειας θα έδινε καλύτερα αποτελέσματα σε αυτόν τον τομέα και αντίστοιχα αν λαμβάναμε υπόψη μόνο την κινητικότητα των κόμβων θα ήταν δυνατόν να δημιουργηθεί πιο σταθερό δίκτυο. Η συγκριμένη εργασία αποσκοπεί στη σύζευξη με τον καλύτερο δυνατό τρόπο των δύο αυτών απαιτήσεων ομαδοποίησης προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική σταθερότητα, ενώ ταυτόχρονα θα προκύπτει αύξηση της διάρκειας ζωής των συσκευών που απαρτίζουν το δίκτυο με χρήση των μηχανισμών διαχείρισης της ενέργειας που αναπτυχθήκαν στην εργασία αυτή. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αναμένεται να υστερεί σε απόδοση σε σχέση με τις αποκλειστικά εστιασμένες σε έναν συγκεκριμένο τομέα προσεγγίσεις, χωρίς όμως να έχει μεγάλη διαφορά από αυτούς. Συνδυάζοντας όμως, τα βέλτιστα χαρακτηριστικά από πολλαπλούς τύπους αλγορίθμων ομαδοποίησής αναμένουμε ο προτεινόμενος αλγόριθμος να ανταποκρίνεται σε όλες τις απαιτήσεις των Δικτύων Δημόσιας Ασφάλειας.





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

---

## ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

---

- 
- 5.1 Ενεργειακή αξιολόγηση προτεινόμενου αλγορίθμου
    - 5.1.1 Αξιολόγηση του τρόπου κατανάλωσης ενέργειας του προτεινομένου αλγορίθμου και σύγκριση με άλλες μεθόδους.
    - 5.1.2 Συνολική κατανάλωση ενέργειας του συστήματος
  - 5.2 Αξιολόγηση του τρόπου κατανάλωσης ενέργειας του προτεινομένου αλγορίθμου και σύγκριση με άλλες μεθόδους.
  - 5.3 Αξιολόγηση ομοιογένειας παραγόμενων ομάδων προτεινόμενου αλγορίθμου και σύγκριση με άλλες προσεγγίσεις.
-

## 5.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

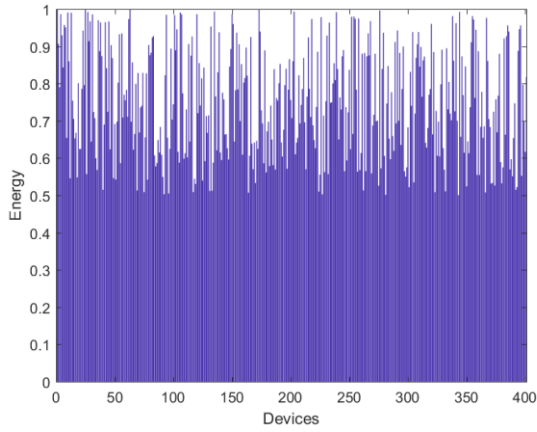
Σε αυτό το μέρος της εργασίας εξετάζεται η ενεργειακή απόδοση της αλγοριθμικής λύσης που παρουσιάσαμε στο προηγούμενα κεφάλαια. Η διαχείριση της ενέργειας με κατάλληλο και αποτελεσματικό τρόπο ώστε να εξυπηρετούνται οι ειδικές ανάγκες των δικτύων δημοσίας ασφάλειας ήταν ένας από τους κυριότερους στόχους ανάπτυξης του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η συμπεριφορά που παρουσιάζει ο αλγόριθμος όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας. Παράλληλα γίνεται συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων μαζί με άλλους γνωστούς αλγορίθμους ομαδοποίησης.

### 5.1.1 Αξιολόγηση του τρόπου κατανάλωσης ενέργειας του προτεινομένου αλγορίθμου και σύγκριση με άλλες μεθόδους.

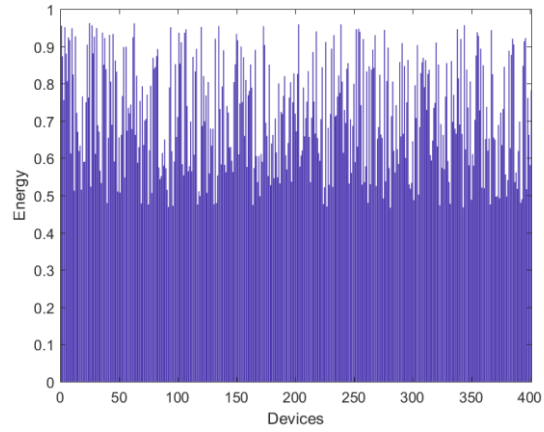
Πέρα από τον προφανή στόχο για ελαχιστοποίηση της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας του συστήματος, ένας ακόμα εξίσου σημαντικός στόχος κατά τον σχεδιασμό του αλγορίθμου είναι να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη κατανάλωση ενέργειας από όλες τις συσκευές που απαρτίζουν το δίκτυο. Πιο απλά, είναι επιθυμητό οι συσκευές με μεγαλύτερα αποθέματα και καλύτερη ενεργειακή απόδοση, να επιλέγονται συχνότερα κατά την ανάθεση των ενεργοβόρων δικτυακών ρόλων, έτσι ώστε να αποτρέπεται η ολική εξάντληση ενέργειας από ένα μέρος των κόμβων του δικτύου που υπολείπονται σε αποθέματα και με αυτόν τον τρόπο να επιμηκύνεται η διάρκεια ζωής του συνολικού συστήματος.

Στο πρώτο στάδιο της ανάλυσης, για να αξιολογηθεί η μορφή κατανάλωσής ενέργειας που προκύπτει κατά την εφαρμογή του προτεινομένου αλγορίθμου, εκτελέστηκε προσομοίωση στην οποία ελήφθησαν ανά τακτά χρονικά διαστήματα στιγμιότυπα της τρέχουσας στάθμης ενέργειας κάθε μιας εκ των συσκευών. Για κάθε τέτοιο στιγμιότυπο κατασκευάστηκε μια γραφική παράσταση που απεικονίζει συνοπτικά τα επίπεδα ενέργειας κάθε συσκευής την συγκεκριμένη χρονοσχισμή εκτέλεσης. Έτσι, η επισκόπηση των διαγραμμάτων αυτών δίνει μια πρώτη εικόνα για την μορφή κατανάλωσής ενέργειας που προκύπτει. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, λήφθηκαν στιγμιότυπα, ένα κάθε 100 χρονικές μονάδες, ξεκινώντας από την χρονική στιγμή 0, σε μια προσομοίωση με 400 συσκευές και συνολική διάρκεια 1300 χρονικές μονάδες. Στον οριζόντιο άξονα αποτυπώνουμε όλες τις διαφορετικές συσκευές του συστήματος και στον κάθετο άξονα καταγράφονται όλες οι αντίστοιχες ενέργειες την χρονική στιγμή που λήφθηκε το στιγμιότυπο. Στην εκκίνηση της προσομοίωσής ανατέθηκε με τυχαίο τρόπο ένα επίπεδο ενέργειας, μεταξύ του 0.5 και του 1, σε κάθε συσκευή, όπως φαίνεται και από την πρώτη εικόνα( $t=0$ ). Με ιδιαίτερα προσεκτική παρατήρηση μπορούμε να δούμε ότι όσο προχωρά

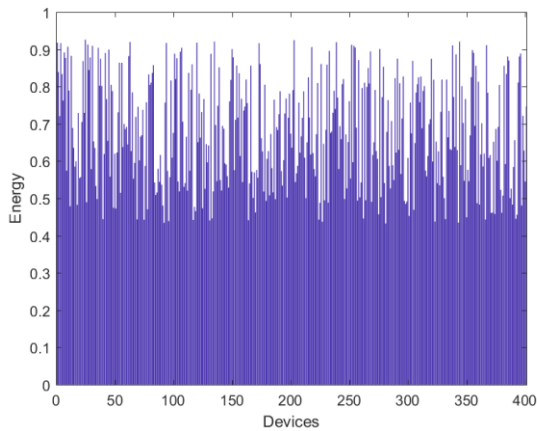
η εκτέλεση οι ενεργειακές διαφορές που προκύπτουν μεταξύ των διαφορετικών συσκευών τείνουν να μειωθούν, αν και κάτι τέτοιο δεν είναι άμεσα προφανές από την παρουσίαση αυτή.



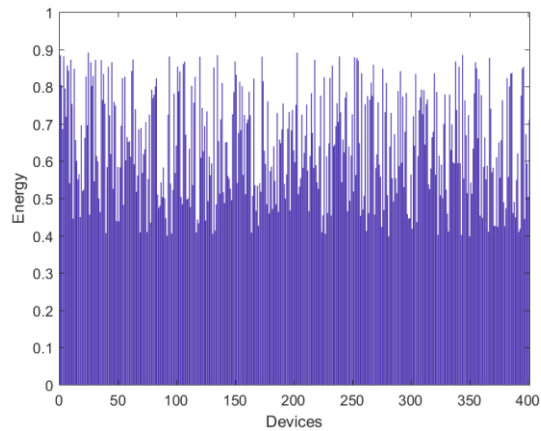
t=0



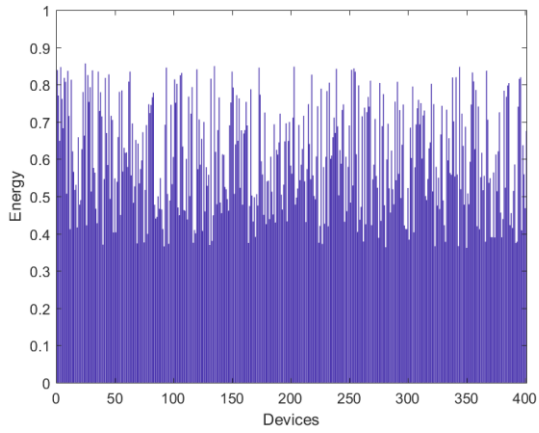
t=100



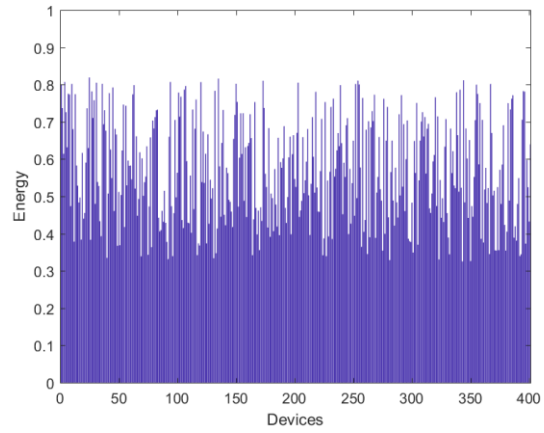
t=200



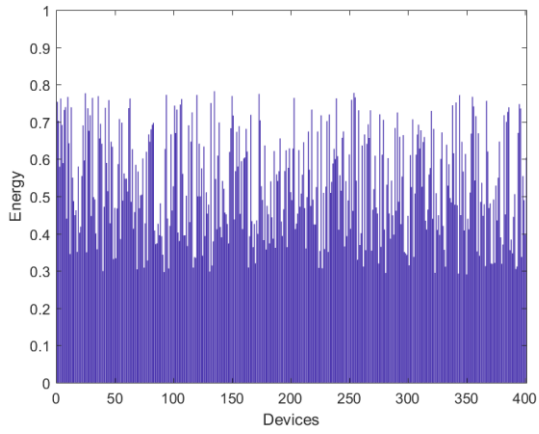
t=300



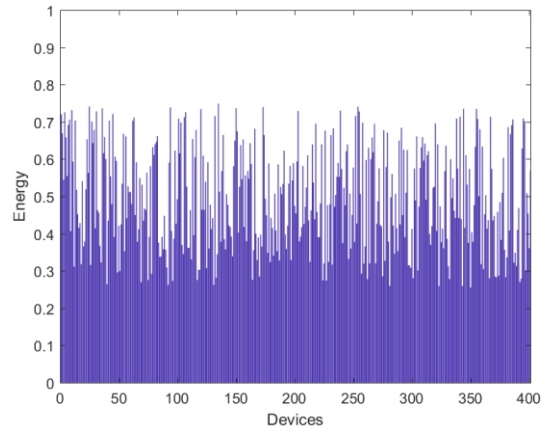
t=400



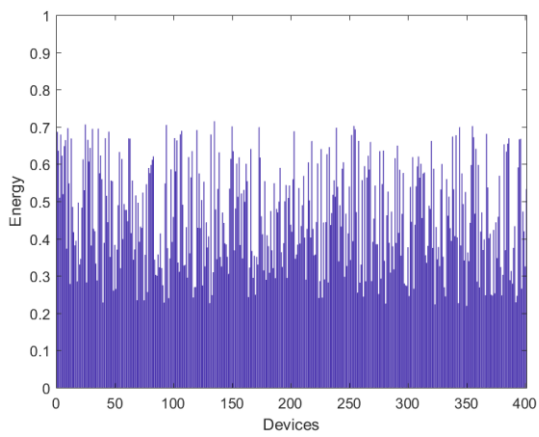
t=500



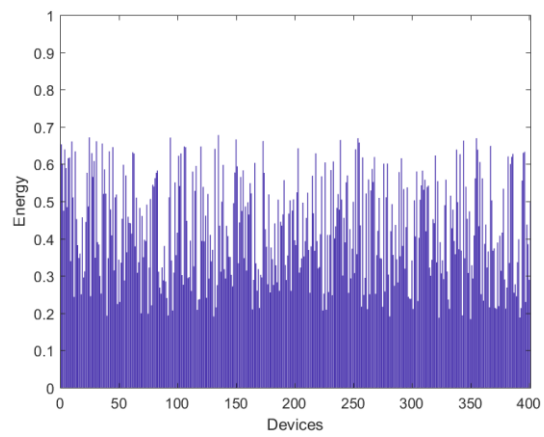
t=600



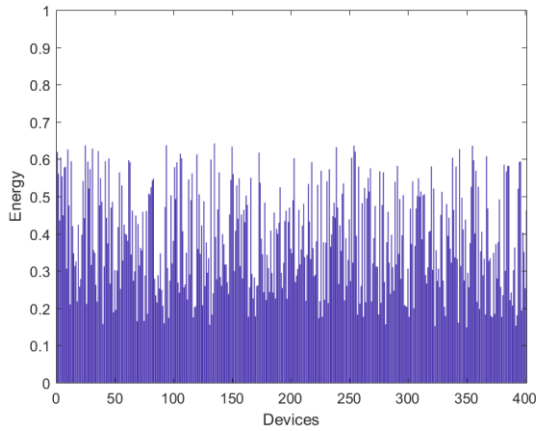
t=700



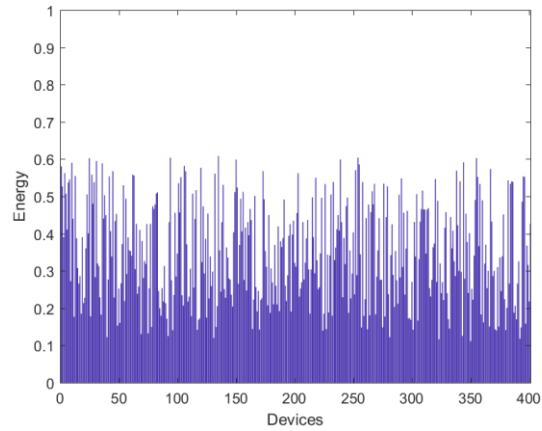
t=800



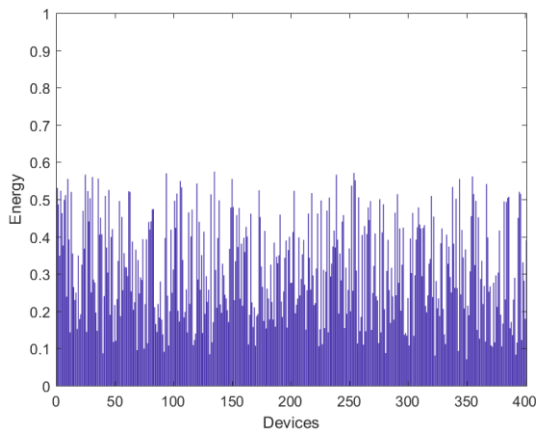
t=900



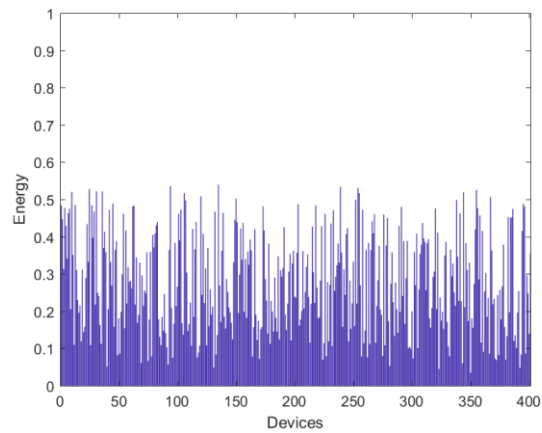
t=1000



t=1100



t=1200



t=1300

Εικόνα 6 – Εξέλιξη στο χρόνο της κατανομής διαθέσιμης ενέργειας κόμβων

Οι παραπάνω γραφικές παραστάσεις δίνουν μια αίσθηση ότι ο αλγόριθμος ευνοεί την ομοιόμορφη κατανάλωση ενέργειας, χωρίς όμως να ποσοτικοποιούν την συμπεριφορά του αυτή. Για να βεβαιωθούμε ότι όντως ο αλγόριθμος έχει την δυνατότητα να εξομαλύνει τις διαφορές στις ενεργειακές στάθμες των συσκευών, αλλά και για να είναι δυνατόν να προβούμε σε συγκριτική ανάλυση της απόδοσης του, απαιτείται να εκφράσουμε την μορφή της κατανομής αυτής με την βοήθεια κάποιου μαθηματικού μεγέθους. Έτσι, λαμβάνοντας την στατιστική διακύμανση των ενεργειών όλων των συσκευών του δικτύου σε κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι προκύπτει ένα μέγεθος που περιγράφει και ποσοτικοποιεί την κατανομή αυτή και δίνει την δυνατότητα για συγκρίσεις με άλλους αλγορίθμους. Η

διακύμανση την χρονική στιγμή  $\tau$ , υπολογίζεται κατά τα γνωστά σύμφωνα με τον ακόλουθο μαθηματικό τύπο:

$$Var(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i(\tau) - \mu_{E_i}(\tau))^2$$

Όπου το σύστημα απαρτίζεται από  $n$  συσκευές και κάθε  $i$  συσκευή έχει ενέργεια  $E_i(\tau)$  την χρονική στιγμή  $\tau$ . Επιπλέον με  $\mu_{E_i}(\tau)$  συμβολίζουμε τη μέση τιμή των  $E_i$  ενεργειών την χρονική στιγμή  $\tau$ .

Η επόμενη γραφική παράσταση (Εικόνα 6) απεικονίζει τα αποτελέσματα προσομοίωσής για τον προτεινόμενο αλγόριθμο (*Proposed*) που έγινε σε σύστημα με χαρακτηριστικά που δίνονται στον Πίνακα 1. Στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος αποτυπώνεται ο χρόνος εκτέλεσης, ενώ στον κάθετο άξονα τοποθετήθηκαν οι αντίστοιχες τιμές τις διακύμανσης για κάθε χρονική στιγμή, όπως αυτές προκύπτουν σύμφωνα με τον παραπάνω μαθηματικό τύπο της διακύμανσης.

Κατά την έναρξη της προσομοίωσης ανατέθηκε με τυχαίο τρόπο σε κάθε συσκευή ένα αρχικό επίπεδο στάθμης ενέργειας και ένας ρυθμός κατανάλωσης της, επίσης με τυχαίο τρόπο. Τα εύρη των τιμών μεταξύ των οποίων γίνεται κάθε φορά τυχαία επιλογή για τα δυο αυτά μεγέθη φαίνονται στον Πίνακα 1. Λόγω του γεγονότος ότι το εύρος του αρχικά ανατιθέμενου ρυθμού κατανάλωσης επηρεάζει σημαντικά την διακύμανση των ενεργειών των κόμβων του δικτύου, όπως έγινε εμφανές μέσα από επαναλαμβανόμενες εκτελέσεις της προσομοίωσης, κρίθηκε αναγκαίο να παρουσιασθούν δυο σετ προσομοιώσεων των οποίων τα αποτελέσματα εμφανίζονται στις Εικόνες 6 και 7. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος, που εμφανίζεται με την ετικέτα "*Proposed*" σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν, επιτυγχάνει μείωση της διακύμανσης των ενεργειών των κόμβων, χαρακτηριστικό που είναι επιθυμητό. Η προτεινομένη λύση καταφέρνει να εξομαλύνει τις διαφορές των ενεργειών που ανατέθηκαν κατά την αρχή της προσομοίωσης στις συσκευές. Για να επιβεβαιωθεί όμως η συμπεριφορά αυτή απαιτείται και συγκριτική ανάλυση, ώστε να γίνει αντιληπτό αν το συμπέρασμα αυτό είναι κάτι που παρατηρείται σε όλους τους αλγορίθμους ομαδοποίησης ή αν όντως είναι αποτέλεσμα της ανάλυσης και του σχεδιασμού που έλαβε χώρα στο πλαίσιο της εργασίας.

Πίνακας 1 - Αριθμητικά στοιχεία προσομοίωσης προτεινόμενου αλγορίθμου

|  |                   |
|--|-------------------|
| Αριθμός Κόμβων                               | 400               |
| Έκταση Περιοχής                              | 8000m x 8000m     |
| Εύρος αρχικά ανατιθέμενων σταθμών ενέργειας  | [0.5,1]           |
| Εύρος αρχικά ανατιθέμενου ρυθμού κατανάλωσης | [0.7,1] / [0.9,1] |
| Τιμή κατωφλιού σχετικής κατεύθυνσης κίνησης  | 90°               |
| Ποσοστό ενέργειας διάλυσης                   | 80%               |
| Ποσοστό πλήθους κόμβων διάλυσης              | 40%               |
| Μέγιστο αριθμός συσκευών ανά «Κόμβο Κεφαλή»  | 15                |
| $A_1, A_2, A_3, A_4$                         | 0.3               |
| $A_5, A_6$                                   | 0.5               |

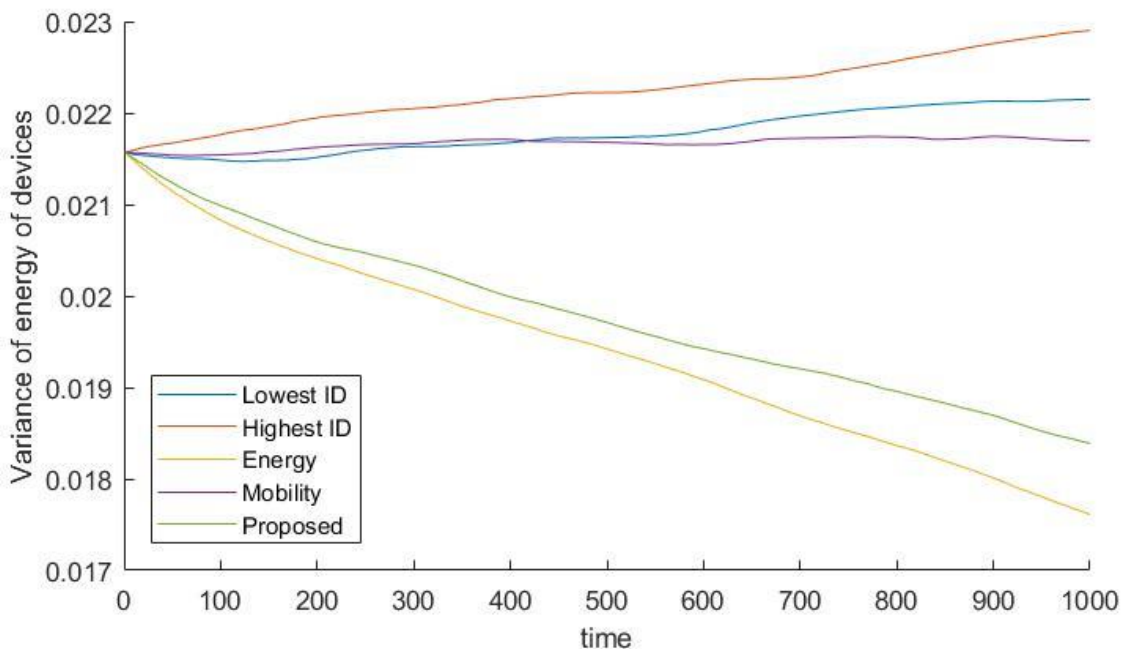
Έτσι, στις γραφικές παραστάσεις παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από άλλες τέσσερις επιπλέον προσομοιώσεις, κάθε μια εκ των οποίων αντιστοιχεί σε έναν διαφορετικό αλγόριθμο ομαδοποίησης. Αρχικά, προσομοιώθηκαν οι αλγόριθμοι *Lowest ID* και *Highest ID*. Οι αλγόριθμοι αυτοί περιεγράφηκαν συνοπτικά στο Κεφάλαιο 3 στην κατηγορία με τους αλγόριθμους ομαδοποίησης με βάση το αναγνωριστικό κάθε κόμβου. Αξίζει να επαναδιατυπωθεί στο σημείο αυτό ότι σύμφωνα με τον *Lowest ID* επιλέγεται πάντα ως *Κόμβος Κεφαλής* η συσκευή που έχει, μεταξύ των γειτόνων της, το μικρότερο μοναδικό αναγνωριστικό αριθμό ID και αντίστοιχα, όταν εκτελείται ο *Highest ID* αλγόριθμος επιλέγεται η συσκευή με το μεγαλύτερο ID για την ανάληψη του ρόλου αυτού. Οι δυο αυτές προσεγγίσεις δεν λαμβάνουν υπόψη τους κανένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος που εξετάζουμε και συνεπώς είναι αναμενόμενο να μειονεκτούν σοβαρά σε κάθε τομέα. Δεν χρησιμοποιούν δεδομένα ενέργειας κατά την οργάνωση των ομάδων και συνεπώς εμφανίζουν μειωμένη απόδοση όπως είναι ιδιαίτερα εμφανές από τις *Εικόνες 6* και *7*. Η διακύμανση στις ενέργειες των κόμβων παρουσιάζει αυξανόμενη τάση και στις δυο εικόνες, παρατήρηση που υποδεικνύει αυξανόμενες διαφορές στις ενεργειακές στάθμες των συσκευών του δικτύου.

Ακολούθως, προσομοιωθήκαν δυο ακόμα αλγόριθμοι που έχουν ετικετοποιηθεί ως “Energy” και “Mobility” στα δυο πρώτα αυτά συγκριτικά διαγράμματα που εξετάζουμε. Και οι δυο αυτές προσεγγίσεις αποτελούν παραλλαγές τους κυρίου προτεινόμενου αλγορίθμου. Ο πρώτος, αν και είναι βασισμένος στο πλήρες σύστημα που περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 4, στερείται όλων των μηχανισμών δράσης βασιζόμενων στην κινητικότητα του συστήματος. Αποτελεί μια παραλλαγή που κατά την επιλογή «Κόμβων Κεφαλής» δεν συμπεριλαμβάνει τις πληροφορίες κατεύθυνσης που χρησιμοποιεί ο κύριος αλγόριθμος. Ρυθμίζοντας κατάλληλα τις

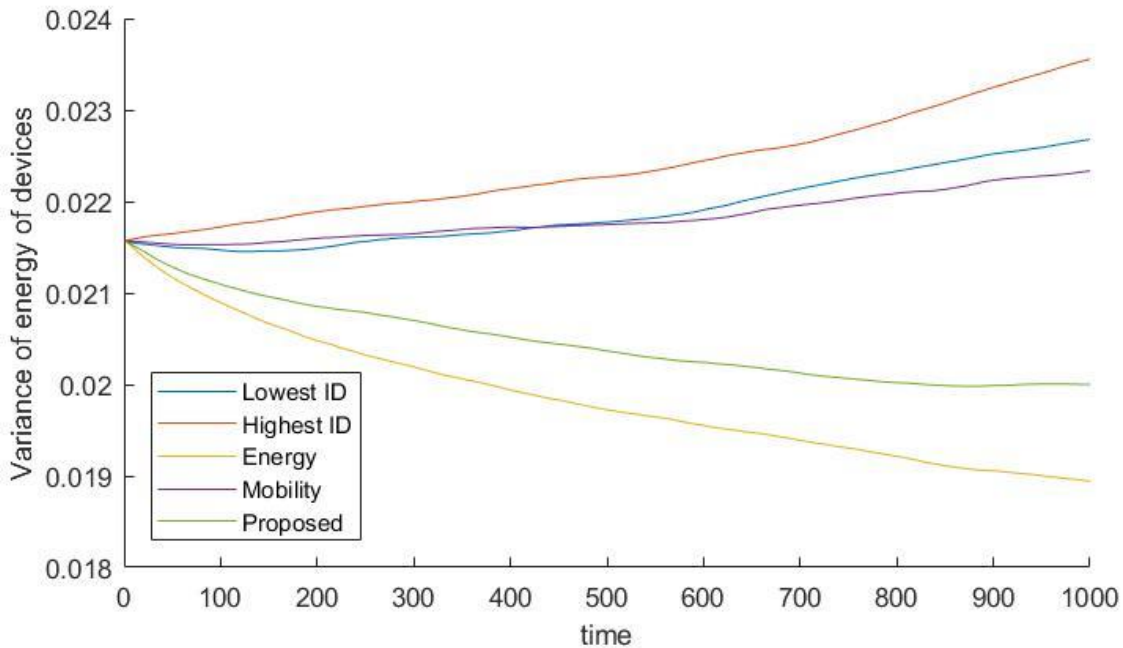


σταθερές παραμετροποιήσιμες τιμές μπορούμε εύκολα να μεταβούμε από την κύρια προτεινόμενη προσέγγιση σε έναν αλγόριθμο ομαδοποίησης βασισμένο αποκλειστικά σε κριτήρια ενέργειας (βλ. 3.5.4). Από την άλλη πλευρά, ο αλγόριθμος με ετικέτα “Mobility” είναι αντίστοιχα βασισμένος στο προτεινόμενο αλγόριθμο, όμως είναι απαλλαγμένος από όλα τα στοιχεία και μηχανισμούς διαχείρισης που βασίζονται στην ενέργεια των κόμβων. Έτσι προκύπτει ένας αλγόριθμος αντιπροσωπευτικός της τρίτης κατηγορίας, ομαδοποίηση με βάση την κινητικότητα, σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 3(βλ. 3.5.3).

Με οπτική εποπτεία των διαγραμμάτων παρατηρείται ότι βέλτιστη απόδοση εκ των πέντε αλγορίθμων που συγκρίνουμε, εμφανίζει ο αλγόριθμος “Energy”. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο, καθώς ο τελευταίος αποτελεί μια λύση αποκλειστικού σκοπού και δεν απαιτείται να έχει εξίσου καλή απόδοση και σε άλλους τομείς. Ακολουθεί ο “Proposed” αλγόριθμος ο οποίος προσεγγίζει τον “Energy”, με συμπεριφορά αναμενόμενη και επιθυμητή. Ακολούθως, οι υπόλοιποι τρεις ομοιάζουν μεταξύ τους στην ενεργειακή απόδοση που εξετάζουμε στο παρόν διάγραμμα(Εικόνες 6 και 7). Και οι τρεις τελευταίοι αλγόριθμοι εμφανίζουν αυξανόμενη διακύμανση, γεγονός που δικαιολογείται αν λάβουμε υπόψη την πλήρη απουσία χρήσης πληροφοριών ενέργειας κατά την εκτέλεση τους. Είναι σημαντικό, επίσης, να τονισθεί η ύπαρξη έντονης διαφοράς απόδοσης των τριών τελευταίων αλγορίθμων σε σχέση με τους δυο πρώτους.



Εικόνα 7 – Διακύμανση συναρτήσεων του χρόνου ( $R_i \in [0.9,1]$ )

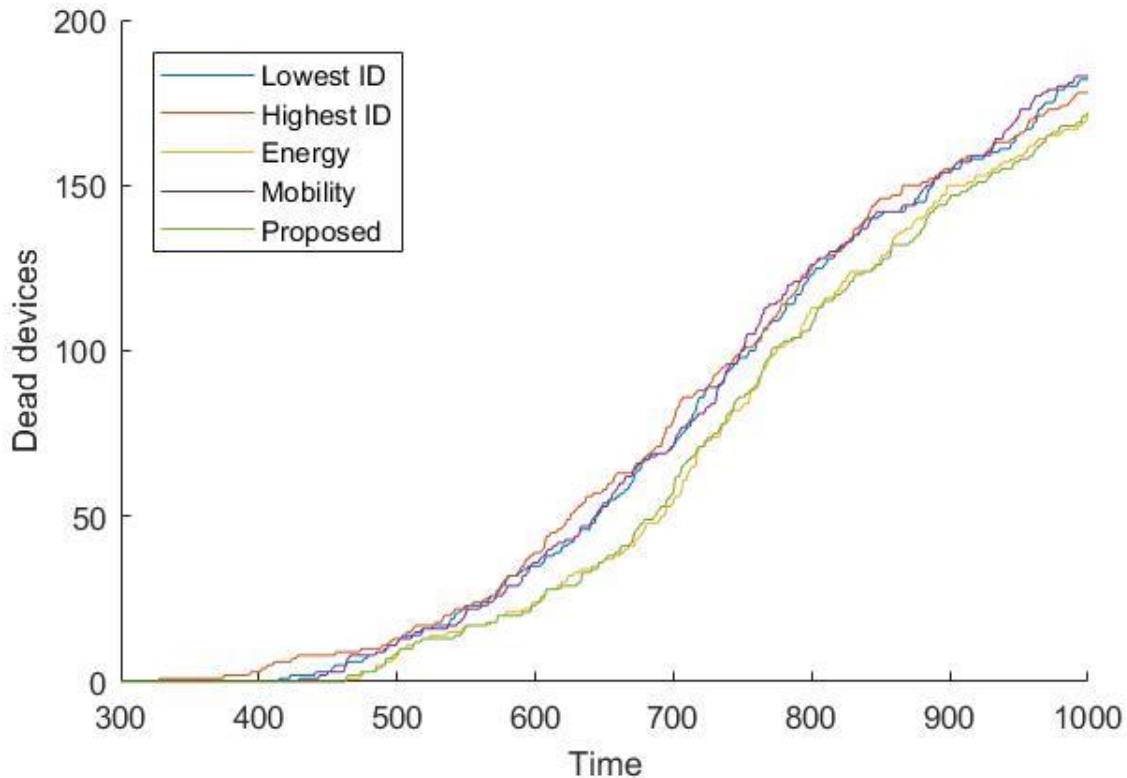


Εικόνα 8 – Διακύμανση συναρτήσεων του χρόνου ( $R_i \in [0.7,1]$ )

Ως λογικό αποτέλεσμα της επιθυμητής αυτής ομοιόμορφης κατανάλωσης ενέργειας των συσκευών που απαρτίζουν το δίκτυο, αναμένεται να είναι η επιμήκυνση του συνολικού χρόνου ζωής τους. Αυτό σημαίνει ότι οι κόμβοι θα αργούν να καταλήξουν στο σημείο της πλήρους ενεργειακής τους εξάντλησης. Ως εκ τούτου το σύστημα στο σύνολό τους θα είναι πιο σταθερό και αξιόπιστο.

Για να επιβεβαιώσουμε την υπόθεση αυτή, διαμορφώθηκε το επόμενο διάγραμμα (Εικόνα 9). Σε αυτό το γράφημα αναπαρίσταται ο αριθμός των συσκευών που έχουν εξαντλήσει τα αποθέματα ενέργειας τους, συναρτήσεων του χρόνου της προσομοίωσης. Να σημειωθεί ότι για να παραχθεί αυτό το διάγραμμα, μειώθηκαν τα όρια του εύρους των αρχικά ανατιθέμενων σταθμών ενέργειας, ώστε να έχουμε απώλεια κόμβων σε ένα λογικό χρονικό διάστημα από την έναρξη της προσομοίωσης. Παρατηρούμε λοιπόν ότι τόσο ο προτεινόμενος, όσο και ο αποκλειστικά ενεργειακός αλγόριθμος καθυστερούν την πρώτη “απώλεια” κόμβου σε σχέση με τους υπόλοιπους τρεις. Ταυτόχρονα διατηρούν, σε κάθε χρονική στιγμή, μικρότερο αριθμό “νέκρων” κόμβων, καταλήγοντας έτσι με περισσότερους λειτουργικούς κόμβους στον ίδιο χρόνο προσομοίωσης. Κατ’ αντιστοιχία με τα προηγούμενα δύο διαγράμματα, προηγείται ο ενεργειακός αλγόριθμος, ενώ ο προτεινόμενος ακολουθεί με μικρή διαφορά. Οι υπόλοιποι

τρεις κινούνται στα ίδια επίπεδα, διατηρώντας όμως αξιοσημείωτα μικρότερη απόδοση σε σχέση με τους δυο προπορευόμενους.



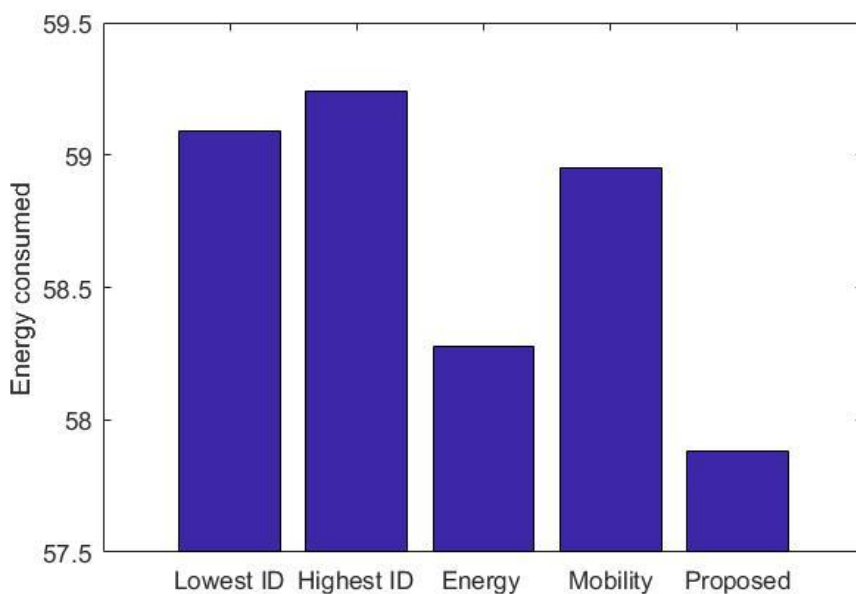
Εικόνα 9 – Αριθμός “νέκρων” συσκευών συναρτήσει του χρόνου

### 5.1.2 Συνολική κατανάλωση ενέργειας του συστήματος

Πέρα από την «έξυπνη» διαχείριση πόρων που τεκμηριώθηκε από την προεκτεθείσα ανάλυση, αξίζει στο σημείο αυτό να εξετασθούν οι επιπτώσεις της αλγοριθμικής οργάνωσης που προτείνεται στην συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια του συστήματος. Ως συνολική κατανάλωση ενέργειας του συστήματος στο πέρας μιας προσομοίωσής ορίζουμε την διαφορά του αθροίσματος των ενεργειών όλων των συσκευών κατά την έναρξή της από το αντίστοιχο άθροισμα στο τέλος της. Εκτελώντας προσομοιώσεις για τον προτεινόμενο αλγόριθμο αλλά και για τους τέσσερις άλλους που χρησιμοποιήσαμε παραπάνω δημιουργήθηκε το ακόλουθο διάγραμμα(Εικόνα 10).

Οι αλγόριθμοι *Lowest ID* και *Highest ID* παρουσιάζουν την μέγιστη κατανάλωση ενέργειας ενώ ακολουθεί ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί αποκλειστικά στοιχεία κινητικότητας. Από το ίδιο διάγραμμα προκύπτει ότι σημαντικά βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με τους

προηγούμενους, παρουσιάζει ο ενεργειακά επικεντρωμένος αλγόριθμος, ενώ την θέση της ελάχιστης κατανάλωση ενέργειας καταλαμβάνει ο πλήρης αλγόριθμος που προτείνεται στην εργασία αυτή. Το αποτέλεσμα έρχεται σε αντίθεση με την παρατηρούμενη τάση που ακολουθούν τα διαγράμματα που εξετάστηκαν μέχρι στιγμής καθώς ο “Proposed” αλγόριθμος φαίνεται να υπερέχει έναντι της ενεργειακά αποκλειστικής παραλλαγής του. Αυτή η παρατήρηση, παρότι έρχεται σε σύγκρουση με τα εμπειρικά αναμενόμενα αποτελέσματα, μπορεί να εξηγηθεί αν λάβει κανείς υπόψη του το συνολικό σύστημα καθώς και τις παραμέτρους που καθορίζουν την απώλεια ενέργειας. Η αιτιολογία παρατίθεται ακριβώς μετά το διάγραμμα.



Εικόνα 10 – Συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος

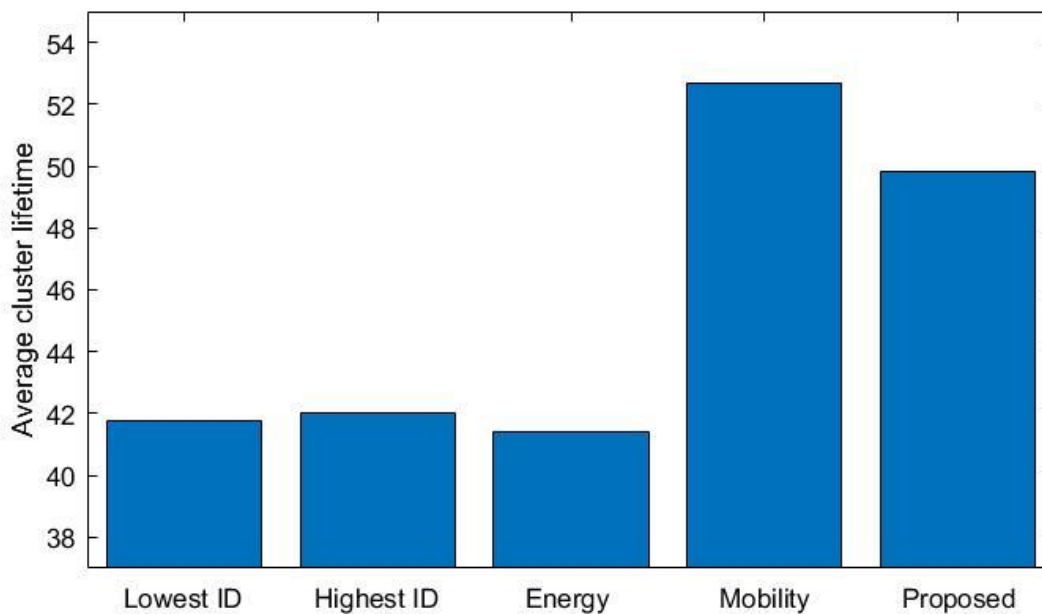
Η κατανάλωση ενέργειας ενός κόμβου σε ένα ασύρματο δίκτυο κινητών συσκευών εξαρτάται, εν μέρει, αρχικά, από τον ρόλο που αυτός διακατέχει, πχ “Κόμβος Μέλος” ή “Κόμβος Κεφαλή”. Ο ρόλος αυτός μεταφράζεται σε φόρτο εργασίας. Για παράδειγμα ένας “Κόμβος Κεφαλή” είναι επιφορτισμένος με την δρομολόγηση των δεδομένων των υπόλοιπων μελών της ομάδας, ενώ οι “Κόμβοι Μέλη” είναι υπεύθυνοι μόνο την αποστολή των δικών τους δεδομένων. Επιπλέον, ο αριθμός των κόμβων που συνδέονται σε έναν “Κόμβο Κεφαλή” επηρεάζει την απαιτούμενη ενέργεια για την εξυπηρέτησή τους. Πέρα από τα παραπάνω, για να αξιολογήσουμε την καταναλισκόμενη ενέργεια είναι αναγκαίο να εξετάσουμε την απαιτούμενη ισχύ εκπομπής για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του ασυρμάτου δικτύου. Όπως

περιεγράφηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, συσκευές που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους καταναλώνουν μεγαλύτερη ενέργεια για να επικοινωνήσουν σε σχέση με ένα άλλο ζεύγος συσκευών στο οποίο η μια συσκευή βρίσκεται πλησιέστερα στην άλλη. Όλα τα παραπάνω έχουν συμπεριληφθεί στο μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας που χρησιμοποιείται κατά την προσομοίωση σε μια προσπάθεια να προσεγγιστεί, όσο το δυνατόν καλύτερα ένα πραγματικό περιβάλλον εφαρμογής. Οι αλγόριθμοι *Lowest ID* και *Highest ID* όπως εξηγήσαμε και παραπάνω παρουσιάζουν την μέγιστη κατανάλωση ενέργειας, διότι ομαδοποιούν τις συσκευές χωρίς κανένα απολύτως κριτήριο που έχει σχέση ή επηρεάζει με κάποιο τρόπο την ενεργειακή συμπεριφορά. Από την άλλη πλευρά, ο “Energy” αλγόριθμος παρουσιάζει σημαντικά μικρότερη κατανάλωση, γεγονός που είναι αναμενόμενο, καθώς ο τελευταίος λαμβάνει υπόψη τον ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας κάθε συσκευής και ευνοεί αυτές με μικρότερο ρυθμό για την ανάληψη των ενεργοβόρων ρόλων τους εντός του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί τις αποστάσεις μεταξύ των άμεσα συνδεδεμένων κόμβων του δικτύου με την βοήθεια της παραμέτρου  $P$ . Τελικά όμως, ο προτεινόμενος αλγόριθμος καταφέρνει να επιτύχει την ελάχιστη κατανάλωση μεταξύ των πέντε εξεταζόμενων προσεγγίσεων. Και τούτο διότι επιτυγχάνει να συνδυάζει την αποδοτική οργάνωση του αποκλειστικά ενεργειακά βασιζομένου αλγορίθμου με σταθερότητα που προσφέρει η ομαδοποίηση με βάση την κινητικότητα. Σε ένα δίκτυο με έντονη κινητικότητα δεν αρκεί να ληφθούν σωστές αποφάσεις για την αρχική μορφή της ομαδοποίησης, αλλά ταυτόχρονα είναι αναγκαίο, προβλέποντας την θέση των κόμβων να εξασφαλίζεται ότι η αρχική μορφή των ομάδων θα παραμείνει αποδοτική για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα και αυτό επιτυγχάνεται με συνδυαστική αξιοποίηση πληροφοριών ενέργειας και κινητικότητας.

## 5.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

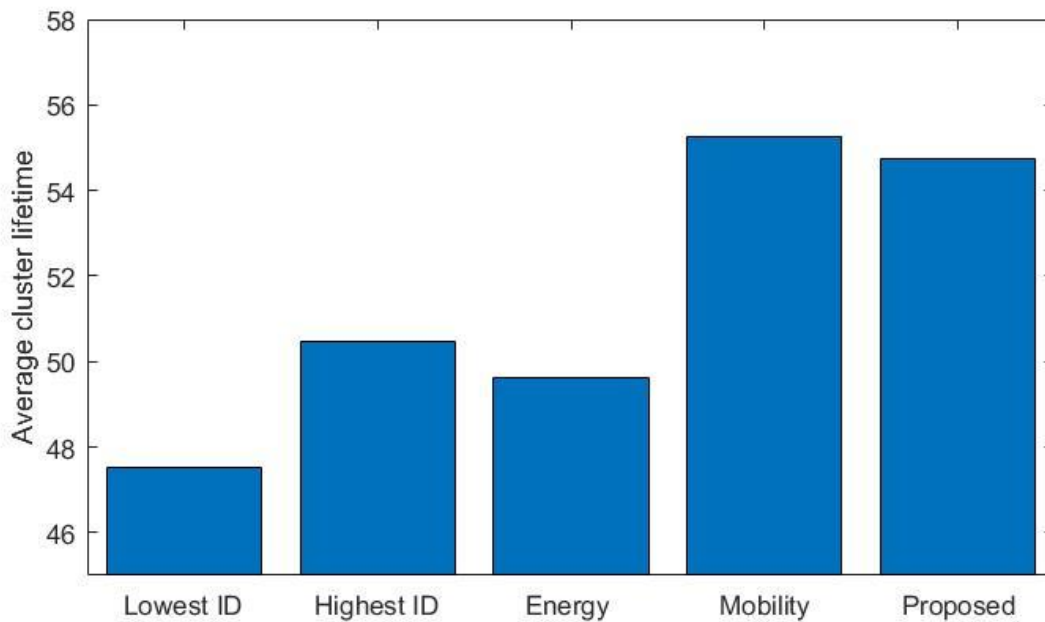
Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με την ανάλυση της σταθερότητας των παραγομένων ομάδων. Για τον σκοπό αυτό εκτελέστηκαν προσομοιώσεις όλων των αλγορίθμων που χρησιμοποιήσαμε ήδη για την ενεργειακή αξιολόγηση, παράλληλα με τον αλγόριθμο που αναπτύξαμε στην εργασία αυτή. Για την δημιουργία του πρώτου σετ των διαγραμμάτων(Εικόνες 12 και 13) μετρήθηκαν οι χρόνοι ζωής όλων των ομάδων που δημιουργήθηκαν κατά την κάθε εκτέλεση και στο πέρας του χρόνου υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών αυτών. Ως χρόνο ζωής μια ομάδας(cluster) ορίζουμε τις μονάδες χρόνου που παρέρχονται μεταξύ της χρονικής στιγμής της αρχικής σύστασης της(επιλογή του «Κόμβου Κεφαλή») και της χρονικής στιγμής που η ομάδα διαλύεται(ο «Κόμβος Κεφαλή» απελευθερώνει τα όλα τα μέλη της ομάδα). Με στόχο να ληφθούν πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα, για κάθε αλγόριθμο έγιναν προσομοιώσεις με διαφορετικά πλήθη συσκευών δικτύου και

υπολογίστηκε ο μέσος όρος των μέσων όρων των χρόνων ζωής που μετρήθηκαν. Έτσι, για την παραγωγή του πρώτου γραφήματος(Εικόνα 13), εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για 50,60,70,80,90 και 100 κόμβους και λάβαμε τον μέσο όρο των τιμών που προέκυψαν. Στο διάγραμμα που προκύπτει είναι εμφανής η υπεροχή του εστιασμένου στην κινητικότητα αλγορίθμου. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρουσιάζει απόδοση που πλησιάζει τον προηγούμενο διατηρώντας παράλληλα σημαντικό προβάδισμα έναντι των υπολοίπων τριών προσεγγίσεων. Αυτή η συμπεριφορά ήταν αναμενομένη και η τάση που εμφανίζεται είναι παρόμοια αυτήν που παρατηρήθηκε κατά την ενεργειακή αξιολόγηση. Ο αλγόριθμος που λαμβάνει υπόψη του αποκλειστικά στοιχεία κινητικότητας επιτυγχάνει την βέλτιστη σταθερότητα ενώ όσοι αλγόριθμοι προσομοιώθηκαν και δεν χρησιμοποιούσαν πληροφορίες για την κίνηση των κόμβων δημιουργούν ομάδες με μικρότερη διάρκεια ζωής κατά μέσο όρο.



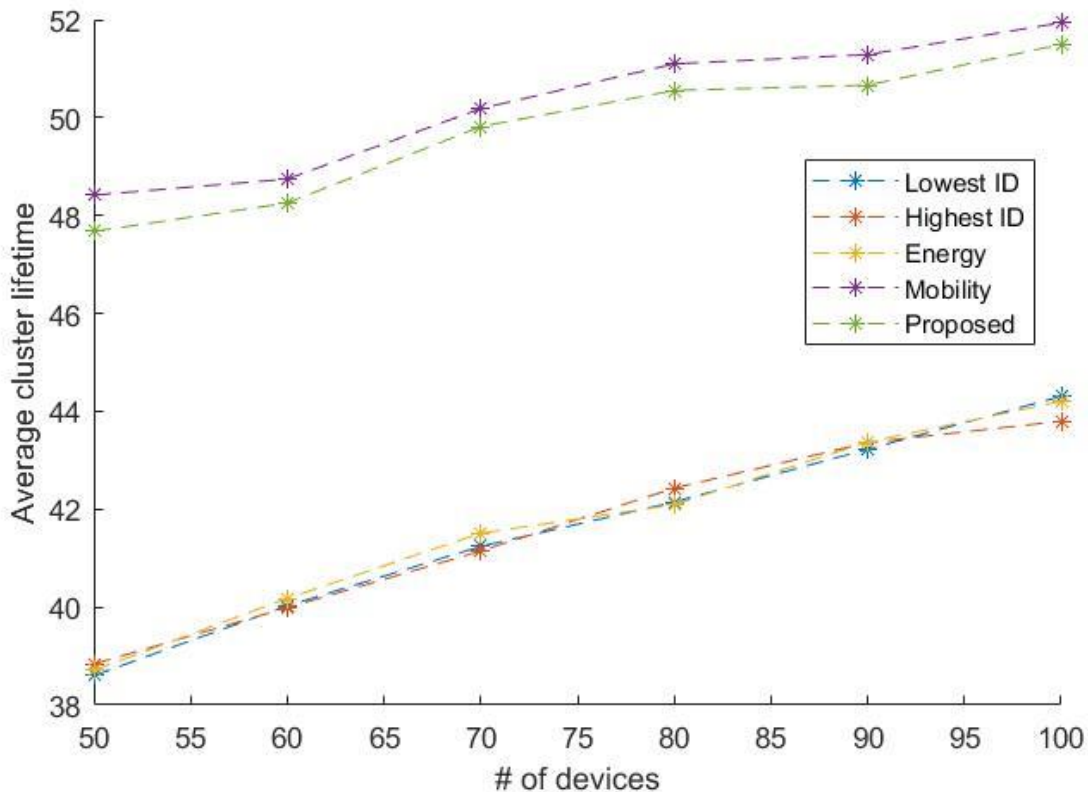
Εικόνα 11 - Μέση τιμή διάρκειας ζωής ομάδων (50-100 κομβοί)

Αντίστοιχα με την Εικόνα 13, επαναλήφθηκαν οι ίδιες μετρήσεις για άλλο ένα εύρος πλήθους κόμβων, ώστε να επιβεβαιώσουμε ότι η τάση που παρατηρούμε εμφανίζεται και σε συστήματα με περισσότερους κόμβους. Για αυτόν τον σκοπό, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για 160,170,180,190,200 και 210 κόμβους αυτή τη φορά, λαμβάνοντάς τον μέσο όρο των τιμών που προέκυψαν, κατά τον ίδιο τρόπο με προηγούμενως.



Εικόνα 12 - Μέση τιμή διάρκειας ζωής ομάδων (160-220 κομβοί)

Τα παραπάνω διαγράμματα παρέχουν μια εικόνα για την συμπεριφορά του αλγορίθμου που συμβαδίζει με τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Παρόλα αυτά κάθε διαφορετική προσομοίωση έγινε μια μοναδική εκτέλεση. Για να έχουμε την δυνατότητα να γενικεύσουμε τις παραπάνω παρατηρήσεις, αλλά και για να αυξήσουμε την αξιοπιστία των λαμβανόμενων δεδομένων για τη συμπεριφορά κάθε αλγορίθμου, κρίθηκε σκόπιμο να προβούμε σε πολλαπλές εκτελέσεις κάθε προσομοίωσης με διαφορετική αρχικοποίηση της χρησιμοποιούμενης γεννήτριας τυχαίων αριθμών κάθε φορά ώστε να εξαλειφθούν τυχόν τυχαιότητες που ενδέχεται να αλλοιώνουν την ληφθείσα πληροφορία. Στο επόμενο διάγραμμα κάθε σημείο που δίνει μια τιμή μέσης διάρκειας ζωής ομάδας για ένα συγκεκριμένο πλήθος συσκευών κατά την εφαρμογή ενός συγκεκριμένου αλγορίθμου αντιστοιχεί στον μέσο ορό των τιμών που προέκυψαν κατά την εκτέλεση της ίδιας προσομοίωσης πεντακόσιες φορές με διαφορετική αρχικοποίηση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών κάθε φορά. Στον οριζόντιο άξονα έχουμε το πλήθος των συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε προσομοίωση. Έγιναν προσομοιώσεις για 50, 60, 70, 80, 90 και 100 συσκευές. Στον κάθετο άξονα αποδίδονται οι αντίστοιχες τιμές της μέσης διάρκειας ζωής ομάδας.



Εικόνα 13 – Μέση τιμή διάρκειας ζωής ομάδων(cluster) συναρτήσει του αριθμού των κόμβων

Με μια πρώτη ενοπτεία του διαγράμματος παρατηρούμε ότι την μέγιστη σταθερότητα επιτυγχάνει ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί στοιχεία κινητικότητας και δεν λαμβάνει υπόψη του την ενεργειακή πτυχή του προβλήματος. Ακολουθεί ο πλήρης προτεινόμενος αλγόριθμος με σημαντικά μικρή διαφορά του μέσου χρόνου ζωής από τον προηγούμενο. Έπειτα οι υπόλοιπες τρεις προσεγγίσεις εμφανίζουν ιδιαίτερα μειωμένη σταθερότητα ενώ ταυτόχρονα κινούνται στα ίδια επίπεδα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι ενθαρρυντικά καθώς η συμπεριφορά που παρατηρούμε συμβαδίζει με τα αναμενόμενα.

Μια ακόμα παρατήρηση που προκύπτει είναι ότι υπάρχει τάση αύξησης της μέσης τιμής της διάρκειας ζωής της ομάδας με αύξηση του πλήθους των κόμβων. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο αν αναλογιστούμε ότι περισσότερες συσκευές στον ίδιο χώρο αντιστοιχούν σε πυκνότερο σύστημα. Σε ένα πυκνότερο συστημένα είναι πιο εύκολο ένας κόμβος να εντοπίζει κατάλληλες συσκευές για σύνδεση καθώς έχει να επιλέξει από ένα μεγαλύτερο πλήθος γειτονικών κόμβων. Το φαινόμενο αυτό υποβοηθά την διαδικασία και διαμορφώνει πιο σταθερές ομάδες.



### 5.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΜΟΓΕΝΕΙΑΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΟΜΑΔΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ.

Στο τελευταίο μέρος του παρόντος κεφαλαίου, παρουσιάζεται η ομογένεια των παραγόμενων ομάδων που επιτυγχάνει ο προτεινόμενος αλγόριθμος. Για λόγους μοντελοποίησης θεωρούμε ότι οι συσκευές ιδίου τύπου έχουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον επικοινωνίας μεταξύ τους και αναθέτουμε αντίστοιχα τις τιμές ενδιαφέροντος  $i$ . Ορίζουμε ως ομογένεια των ομάδων του συστήματος μια δεδομένη χρονική στιγμή τον μέσο όρο των τιμών ομογένειας όλων των ομάδων την χρονική στιγμή αυτή. Η τιμή της ομοιογένειας κάθε ομάδας υπολογίζεται ως ο μέσος ορός των τιμών ενδιαφέροντος επικοινωνίας κάθε κόμβου μέλους με τον κόμβο κεφαλή της ομάδας αυτής. Δηλαδή αν μια ομάδα έχει  $M$  κόμβους μέλη, η ομογένεια της υπολογίζεται ως εξής:

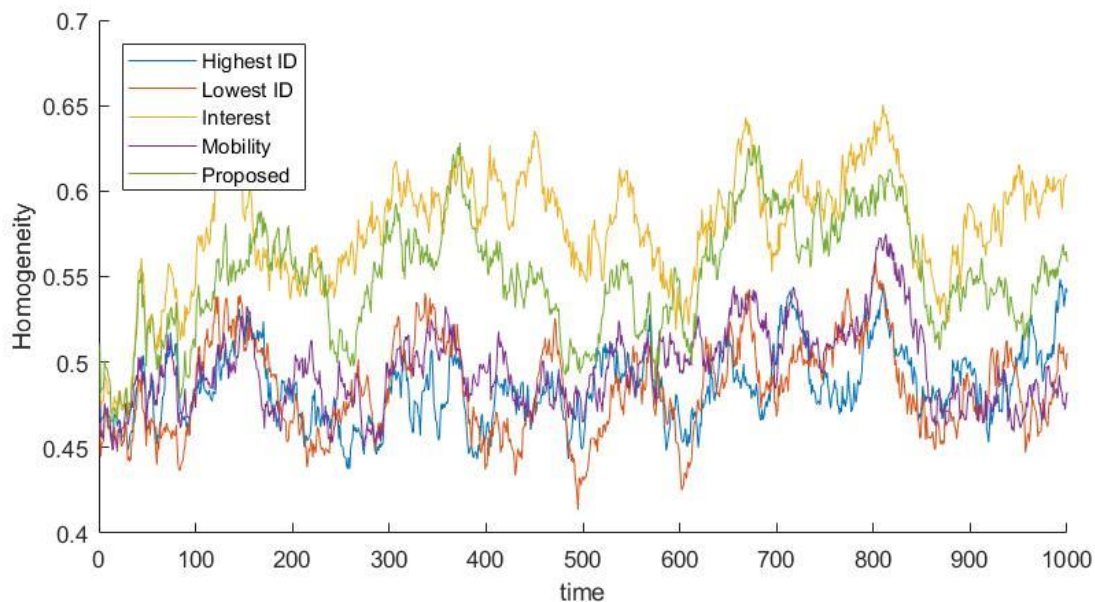
$$\text{Cluster Homogeneity} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M i(j, CH)$$

Όπου με  $CH$  συμβολίζεται ο Κόμβος Κεφαλή της ομάδας (*Cluster Head*) και με  $i(j, CH)$  η τιμή του ενδιαφέροντος επικοινωνίας του κόμβου μέλους  $j$  με τον Κόμβος Κεφαλή.

Όπως και στις προηγούμενες υποενότητες όπου αξιολογήθηκε η απόδοση του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε, έτσι και εδώ, για λόγους σύγκρισης, προσομοιώθηκαν πέρα από την προτεινόμενη εκδοχή, δυο ακόμα παραλλαγές της αλλά και οι αλγόριθμοι *Lowest ID* και *Highest ID*. Η πρώτη παραλλαγή έχει αναφέρεται ως «*Mobility*» αλγόριθμος στα διαγράμματα που ακολουθούν. Στην προσέγγιση αυτή οι κόμβοι ομαδοποιούνται σύμφωνα με τον προτεινόμενο αλγόριθμο με την διαφορά ότι έχει εξαλειφθεί πλήρως κάθε χρήση πληροφοριών ενδιαφέροντος επικοινωνίας στο στάδιο της επιλογής των κόμβων που θα απαρτίσουν την ομάδα. Αντίστοιχα, η επόμενη παραλλαγή που αναφέρεται ως «*Interest*» αλγόριθμος δεν χρησιμοποιεί πληροφορίες κινητικότητας κατά την επιλογή των κόμβων μέλη κατά την δημιουργία των ομάδων.

Κατά τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν με σκοπό να μοντελοποιηθεί το ενδιαφέρον επικοινωνίας οι συσκευές κατανεμήθηκαν σε τρεις ισοπληθείς ομάδες. Ο αριθμός αυτός ήταν αυθαίρετος και θα μπορούσε να πάρει οποιαδήποτε τιμή καθώς εξυπηρετεί μόνο τις ανάγκες απόδοσης τιμών ενδιαφέροντος επικοινωνίας στις συσκευές. Κάθε κόμβος έχει αυξημένο ενδιαφέρον επικοινωνίας με αυτούς που ανήκουν στην ίδια ομάδα ενώ αντίστοιχα μικρό ενδιαφέρον με αυτούς που ανήκουν σε οποιαδήποτε από τις άλλες δυο. Καθώς οι κόμβοι τοποθετούνται στο χώρο με τυχαίο τρόπο κατά την έναρξη της προσομοίωσης, εξετάζοντας κάθε μικρότερο μέρος της συνολικής περιοχής, είναι αναμενόμενο, αν μια συσκευή έχει  $N$

γειτονικές,  $\frac{N}{3}$  εξ' αυτών θα ανήκουν στην ίδια ομάδα ενώ τα υπόλοιπα  $\frac{2N}{3}$  θα ανήκουν στις άλλες δυο. Στο γκρουπ των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν για να λάβουμε την επόμενη γραφική παράσταση αναθέσαμε τιμή ενδιαφέροντος μεταξύ δύο κόμβων που ανήκουν στην ίδια ομάδα 0.9 ενώ μεταξύ αυτών που ανήκουν σε διαφορετικές 0.3. Με βάση τα παραπάνω αριθμητικά στοιχεία, η ομογένεια σε κάθε περιοχή του χώρου θα πρέπει να λαμβάνει τιμή περίπου ίση με  $\left(0.9 * \frac{1}{3}\right) + \left(0.3 * \frac{2}{3}\right) = 0.5$ . Συνεπώς κάθε τιμή ομογένειας μιας ομάδας πάνω από την 0.5 υποδεικνύει μεγαλύτερη ομογένεια από αυτήν που θα επιτύγχανε ένας αλγόριθμος που δεν λαμβάνει υπόψη του πληροφορίες ενδιαφέροντος επικοινωνίας. Είναι, δηλαδή, ένδειξη ότι ο αλγόριθμος που παρουσιάζει, κατά μέσο όρο, τέτοιες τιμές βελτιστοποιεί την ομαδοποίηση με βάση τα ενδιαφέροντά επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών πριμοδοτώντας την κατάταξη των κόμβων που ανήκουν στο ίδιο γκρουπ ενδιαφέροντος στην ίδια ομάδα(cluster). Πράγματι, στην Εικόνα 15 παρατηρούμε ότι, τόσο ο προτεινόμενος αλγόριθμος όσο και η εστιασμένη στο ενδιαφέρον επικοινωνίας, παραλλαγή του, κινούνται κατά κύριο λόγο πάνω από το την τιμή 0.5. Αντιθέτως, και οι τρεις άλλοι αλγόριθμοι που προσομοιώθηκαν και δεν περιλαμβάνουν πληροφορία ενδιαφέροντος στην λήψης αποφάσεων ομαδοποίησης, έχουν μέση τιμή που κινείται κοντά στο 0.5, όπως ορθώς προβλέψαμε παραπάνω.



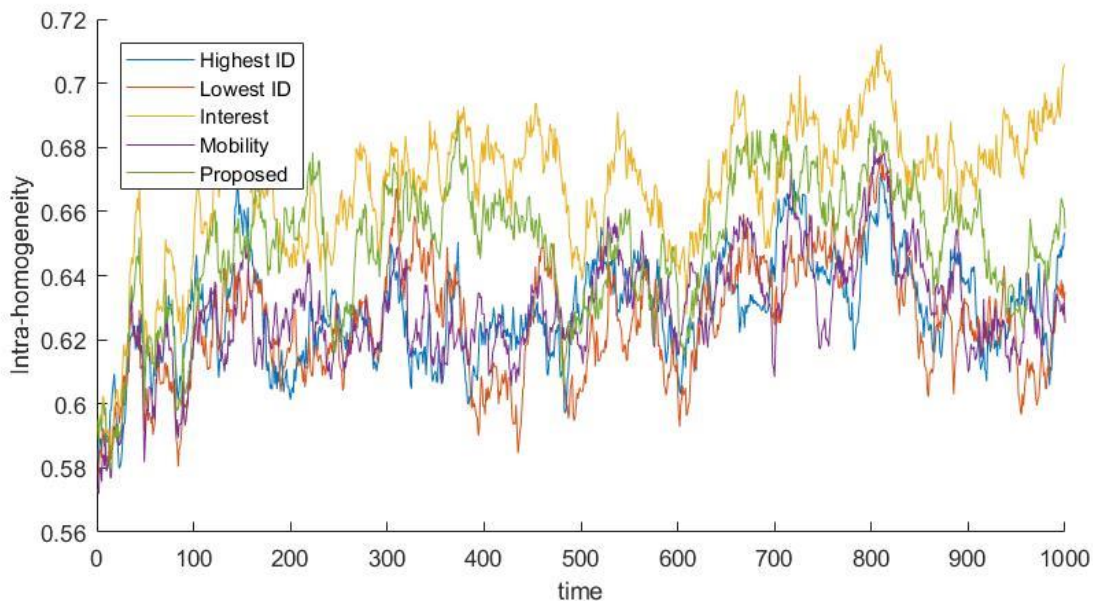
Εικόνα 14 – Ομοιογένεια παραγόμενων ομάδων

Ολοκληρώνοντας την αξιολόγηση ομογένειας παρουσιάζουμε άλλο ένα διάγραμμα μιας μετρικής που ομοιάζει με την προηγούμενη. Η μετρική αυτή αναφέρεται ως *ολική ομοιογένεια*

ή «Intra-homogeneity», όπως συμβολίζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί, και για να υπολογιστεί ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

Αρχικά λαμβάνουμε την τιμή της ολικής ομοιογένειας κάθε ομάδας που υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των τιμών ενδιαφέροντος επικοινωνίας κάθε πιθανού ζεύγους συσκευών που ανήκουν στην ομάδα αυτή. Αν μια ομάδα έχει  $n$  μέλη(συμπεριλαμβανομένου και του Κόμβου Κεφαλή) τότε θα έχουμε  $\binom{n}{2}$  όρους κατά τον υπολογισμό του μέσου όρου αυτού. Επαναλαμβάνεται η διαδικασία για κάθε ομάδα και υπολογίζεται ο μέσος όρος των μέσων όρων που προέκυψαν δίνοντας την τιμή της ολικής ομοιογένειας του συστήματος μια δεδομένη χρονική στιγμή. Η όλη διαδικασία διενεργείται κατ' επανάληψη κάθε χρονική στιγμή και οι παραγόμενες τιμές απεικονίζουν το καθεστώς ομοιογένειας του συστήματος ανά χρονική στιγμή.

Η παραγόμενη γραφική παράσταση ακολουθεί την ίδια τάση που παρατηρήσαμε και πριν. Ο «Interest» αλγόριθμος προηγείται ενώ ο «Proposed» ακολουθεί. Οι υπόλοιποι τρεις κινούνται πάλι στα ίδια επίπεδα εμφανίζοντας χαμηλότερες τιμές ομοιογένειας από τους δυο προηγούμενους.



Εικόνα 15 - Ομοιογένεια παραγόμενων ομάδων(ολικό άθροισμα)



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

---

## ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΕΠΟΜΕΝΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

---

---

### 6.1 Σύνοψη του αλγορίθμου και επόμενοι στόχοι

---

## 6.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΙ ΕΠΟΜΕΝΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

Στην διπλωματική εργασία αυτή αναπτύχθηκε ένα αλγοριθμικό σύστημα ομαδοποίησης συσκευών στα πλαίσια των δικτύων δημοσίας ασφάλειας. Για να επιτευχθεί το αποτέλεσμα αυτό πρώτα μελετήθηκαν εκτενώς οι ανάγκες των δικτύων αυτών. Επιπρόσθετα αναλύθηκαν οι περιορισμοί, αλλά και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος στο οποίο προορίζονται να λειτουργήσουν τα δίκτυα αυτά. Ενεργειακοί περιορισμοί αλλά και ιδιαίτερες μορφές κινητικότητας των κόμβων του δικτύου, που εντοπίστηκαν, σκιαγράφησαν την μορφή του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε και ταυτόχρονα κατέστησαν δυνατό να εξοπλιστεί η σχεδίαση του με μηχανισμούς που απέδωσαν συγκριτικό προβάδισμα της αναπτυχθείσας λύσης σε σχέση με άλλες προσεγγίσεις γενικού σκοπού. Στην παρούσα εργασία, συνδυάστηκαν ιδέες και μοντέλα που εμφανίζονται στην γενικότερη βιβλιογραφία των ασύρματων δικτύων κινητών συσκευών και μη, με σκοπό την ανάπτυξη ενός πρωτότυπου αλγορίθμου ομαδοποίησης συσκευών, ο οποίος δημιουργεί σταθερά και ενεργειακά αποδοτικά δίκτυα δημοσίας ασφάλειας. Ο στόχος της εργασίας αυτής ήταν να δημιουργηθεί ένας αλγόριθμος που θα ενσωματώνει μηχανισμούς αξιοποίησης πληροφοριών ενέργειας, κινητικότητας και ομογένειας, παρέχοντας μια «καλά ισορροπημένη» λύση που δεν υστερεί σημαντικά σε απόδοση, σε κάθε τομέα, σε σχέση με διάφορες άλλες προσεγγίσεις συγκεκριμένου ενδιαφέροντος και εστιασμένου σκοπού. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται τελικά και τεκμηριώνεται μέσα από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από εκτέλεση ενός πλήθους προσομοιώσεων.

Επιπροσθέτως, η μορφή του προτεινόμενου αλγόριθμου είναι έντονα παραμετροποιήσιμη, δίνοντας ιδιαίτερη ευελιξία στην ρύθμιση της συμπεριφοράς αναλόγως με τις απαιτήσεις κάθε περιβάλλοντος εφαρμογής. Ταυτόχρονα, η φύση αυτή του αλγόριθμου καθιστά ιδιαίτερα εύκολη την αντικατάσταση μιας ή περισσότερων παραμέτρων με αντίστοιχες μετρικές οι οποίες πιθανόν να αντιπροσωπεύουν με καλύτερο και πιο αποδοτικό τρόπο την συμπεριφορά που ποσοτικοποιούν σύμφωνα με την ανάλυση ενός μελλοντικού ερευνητή. Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά τον αλγόριθμο επεκτάσιμο και αξιοποιήσιμο σε πολλαπλά περιβάλλοντα.

Ολοκληρώνοντας το σύστημα οργάνωσης των συσκευών σε ομάδες και έχοντας στόχο την ανάπτυξη ενός πλήρους συστήματος επικοινωνίας, είναι απαραίτητο να μελετηθεί ο τρόπος και η μορφή δρομολόγησης που ταιριάζει και λειτουργεί αποδοτικά σε ένα δίκτυο δημοσίας ασφάλειας. Επιπλέον, ο τρόπος με τον οποίο η δρομολόγηση που θα επιλεγεί εντάσσεται στο ήδη ανεπτυγμένο σύστημα ομαδοποίησης των συσκευών, καθώς και οι τροποποιήσεις που πιθανόν κριθούν αναγκαίες αποτελούν και αυτά αντικείμενα περαιτέρω έρευνας.

## References

---

- [1] J. Poushter, "Smartphone Ownership and Internet Usage Continues to Climb in Emerging Economies," 2016.
- [2] A. Asadi and V. Mancuso, "WiFi Direct and LTE D2D in action," *IFIP Wirel. Days*, 2013.
- [3] J. Seppälä, T. Koskela, T. Chen, and S. Hakola, "Network controlled Device-to-Device (D2D) and cluster multicast concept for LTE and LTE-A networks," *2011 IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. WCNC 2011*, pp. 986–991, 2011.
- [4] B. Raghothaman, E. Deng, R. Pragada, G. Sternberg, T. Deng, and K. Vanganuru, "Architecture and protocols for LTE-based device to device communication," *2013 Int. Conf. Comput. Netw. Commun. ICNC 2013*, pp. 895–899, 2013.
- [5] M. Z. Shafiq, L. Ji, A. X. Liu, J. Pang, S. Venkataraman, and J. Wang, "A first look at cellular network performance during crowded events," *ACM SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.*, vol. 41, no. 1, p. 17, 2013.
- [6] M. Amirijoo *et al.*, "Cell outage management in LTE networks," *Proc. 2009 6th Int. Symp. Wirel. Commun. Syst. ISWCS'09*, pp. 600–604, 2009.
- [7] S. Malathy and T. Ravichandran, "Reducing Handoff Failures in Cellular Network by Predicting Its Future Move," vol. 8491, pp. 493–497, 2012.
- [8] R. K and K. Gopal, "A Survey on Cost Effective Survivable Network Design in Wireless Access Network," *Int. J. Comput. Sci. Eng. Surv.*, vol. 5, no. 1, pp. 11–18, 2014.
- [9] R. G. Lakshmi Narayanan and O. C. Ibe, *Wireless Public Safety Networks 1*. 2015.
- [10] R. G. Lakshmi Narayanan and O. C. Ibe, *Wireless Public Safety Networks 2*. 2015.
- [11] D. Winnf--p-, "Elements of Context for Cognitive Radio Based Public Safety Communications Systems," no. May, 2016.
- [12] K. Muraoka, J. Shikida, and H. Sugahara, "Feasibility of capacity enhancement of public safety LTE using device-to-device communication," *Int. Conf. ICT Converg. 2015 Innov. Towar. IoT, 5G, Smart Media Era, ICTC 2015*, pp. 350–355, 2015.
- [13] M. Deruyck, J. Wyckmans, L. Martens, and W. Joseph, "Emergency ad-hoc networks by using drone mounted base stations for a disaster scenario," *Int. Conf. Wirel. Mob. Comput. Netw. Commun.*, 2016.
- [14] G. Fodor *et al.*, "Device-to-Device Communications for National Security and Public Safety," *IEEE Access*, vol. 2, pp. 1510–1520, 2015.



- [15] M. Usman, A. A. Gebremariam, U. Raza, and F. Granelli, "A Software-Defined Device-to-Device Communication Architecture for Public Safety Applications in 5G Networks," *Access, IEEE*, vol. 3, pp. 1649–1654, 2015.
- [16] J. F. Monserrat *et al.*, "Rethinking the mobile and wireless network architecture: The METIS research into 5G," *EuCNC 2014 - Eur. Conf. Networks Commun.*, pp. 7–11, 2014.
- [17] Q. Li, H. Niu, A. Papathanassiou, and G. Wu, "Edge Cloud and Underlay Networks: Empowering 5G Cell-Less Wireless Architecture," *Eur. Wirel. 2014; 20th Eur. Wirel. Conf. Proc.*, pp. 1–6, 2014.
- [18] A. Bentaleb, A. Boubeta, and S. Harous, "Survey of Clustering Schemes in Mobile Ad hoc Networks," vol. 2013, no. May, pp. 8–14, 2013.
- [19] J. Y. YU and P. H. J. CHONG, "A SURVEY OF CLUSTERING SCHEMES FOR MOBILE AD HOC NETWORKS," pp. 32–48, 2005.
- [20] A. Asadi, S. Member, Q. Wang, S. Member, and V. Mancuso, "A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks," pp. 1–18.
- [21] D.J. Baker and A. Ephremides, "The architectural organization of a mobile radio network via a distributed algorithm," *IEEE Trans. Commun. COM29*, vol. 11, pp. 1694–1701, 1981.
- [22] M. G. and J. T. Tsai, "Multiuser, Mobile, Multimedia Radio Network," *Wirel. Networks*, vol. 1, pp. 255–65, 1995.
- [23] A. D. A. D. Amis *et al.*, "Max-min d-cluster formation in wireless ad hoc networks," *Proc. IEEE INFOCOM*, vol. 1, pp. 32–41, 2000.
- [24] J. Y. Yu and P. H. J. Chong, "3hBAC (3-hop between adjacent clusterheads): a novel non-overlapping clustering algorithm for mobile ad hoc networks," *IEEE Pacific Rim Conf. Commun. Comput. Signal Process. (PACRIM 2003) (Cat. No.03CH37490)*, vol. 1, pp. 318–321, 2003.
- [25] P. Basu, N. Khan, and T. D. C. Little, "A mobility based metric for clustering in mobile ad hoc networks," *Proc. - 21st Int. Conf. Distrib. Comput. Syst. Work.*, no. April, pp. 413–418, 2001.
- [26] G. E. Y. K. Tang, "Distributed Dynamic Cluster Algorithm for Wireless Sensor Networks," pp. 23–27.
- [27] C. K. Toh, "Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks By Introduction to Wireless Ad Hoc Network," *IEEE Commun. Mag.*, vol. June, pp. 138–147, 2001.
- [28] A. D. Amis and R. Prakash, "Load-balancing clusters in wireless ad hoc networks," *Proc. 3rd IEEE Symp. Appl. Syst. Softw. Eng. Technol.*, pp. 25–32, 2000.
- [29] J. H. Ryu, S. Song, and D. H. Cho, "New clustering schemes for energy conservation in two-tiered mobile ad hoc networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 51, no. 6, pp. 1661–

1668, 2002.

- [30] M. Chatterjee, S. K. Das, and D. Turgut, "An on-demand weighted clustering algorithm (WCA) for ad hoc networks," *2000 IEEE Glob. Telecommun. Conf. (GLOBECOM '00)*, vol. 3, pp. 1697–1701, 2000.
- [31] M. Chatterjee, S. Das, and D. Turgut, "WCA: A Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks," *Cluster Comput.*, pp. 193–204, 2002.
- [32] E.E. Tsiropoulou, S.T. Paruchuri, J. Baras, "Interest, Energy and Physical-Aware Coalition Formation and Resource Allocation in Smart IoT Applications," *51st Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, pp. 1-6, March, 2017.
- [33] E. E. Tsiropoulou, G. Mitsis, S. Papavassiliou, "Interest-aware Energy Collection & Resource Management in Machine to Machine Communications," in *Elsevier, Ad Hoc Networks*, vol. 68, pp. 48-57, 2018.