



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σχεδιασμός τεχνικών ασύρματης ανταλλαγής
ενέργειας για την δίκαιη κατανομή της σε χρήστες
κινητών κοινωνικών δικτύων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Ελευθερίας Χ.
Κατσούρα

Επιβλέπων: Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σχεδιασμός τεχνικών ασύρματης ανταλλαγής
ενέργειας για την δίκαιη κατανομή της σε χρήστες
κινητών κοινωνικών δικτύων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

**Ελευθερίας Χ.
Κατσούρα**

Επιβλέπων: Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .

.....
Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Θεοδώρα Βαρβαρίγου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννα Ρουσσάκη
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

.....

Ελευθερία Χ. Κατσούρα

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

© Ελευθερία Χ. Κατσούρα, 2023 All rights reserved.

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

Περίληψη

Στο σύγχρονο κόσμο, οι υπολογιστικές συσκευές επιτελούν όλο και περισσότερες εργασίες, αυξάνοντας συνεχώς τις απαιτήσεις τους σε ισχύ. Για τα κινητά ασύρματα δίκτυα τα οποία αποτελούνται από συσκευές που τροφοδοτούνται από τις μπαταρίες τους η ενέργεια είναι ένας πολύτιμος πόρος. Η αδιάλειπτη παροχή ενέργειας σε αυτές τις συσκευές ώστε να παραμείνουν λειτουργικές για μεγάλο χρονικό διάστημα αποτελεί απαιτητικό εγχείρημα.

Η ανάπτυξη τεχνολογίας διαμοιρασμού ενέργειας, είτε με ενσύρματα είτε με ασύρματα μέσα, έχει καταστήσει εφικτή την επέκταση της διάρκειας ζωής τέτοιων δικτύων εκμεταλλευόμενη την ενέργεια από άλλες πηγές εντός του δικτύου, όπως ομότιμες συσκευές ή συσκευές κοινής χρήσης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, η ασύρματη μεταφορά ενέργειας (Wireless Power Transfer - WPT) μεταξύ ομοτίμων συσκευών (Peer-to-Peer) έχει δώσει τη δυνατότητα στις φορητές συσκευές να αναπληρώνουν ασύρματα την μπαταρία τους αλληλεπιδρώντας άμεσα με άλλες συσκευές που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση.

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας είναι η αντιστοίχιση χρηστών κινητών κοινωνικών δικτύων με ετερογενείς φορητές συσκευές σε ζεύγη, με στόχο το δίκτυο να αποκομίσει μέγιστο όφελος, με κάθε ευκαιρία ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Χρήστες με μεγαλύτερη ενεργειακή στάθμη στις συσκευές τους μεταφέρουν ενέργεια στους ομότιμούς τους με χαμηλό επίπεδο ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, οι συσκευές με χαμηλή ενεργειακή στάθμη καταφέρνουν να παραμείνουν λειτουργικές για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Λαμβάνονται υπ' όψιν οι απώλειες λόγω εξασθένησης, η ετερογένεια των συσκευών ως προς την ενεργειακή κατανάλωση και την απόδοση κατά τη μεταφορά ενέργειας καθώς και οι περιορισμοί της τοπολογίας του δικτύου. Αξιοποιούνται ακόμα, η πρόβλεψη κινητικότητας και τα κοινωνικά χαρακτηριστικά των χρηστών. Η ανάθεση ζευγών στους χρήστες γίνεται με βάση τον αλγόριθμο για το Πρόβλημα των Συγκατοίκων (Stable Roommates Problem - SRP), το οποίο αφορά στην εύρεση σταθερής αντιστοίχισης (stable matching) για αντικείμενα του ίδιου συνόλου, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις προτιμήσεις όλων των χρηστών. Η πειραματική αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου διεξάγεται σε συνθετικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι ένα τυπικό σενάριο εφαρμογής του διαμοιρασμού ενέργειας με βάση τον αλγόριθμο σταθερής αντιστοίχισης οδηγεί σε αύξηση της διάρκειας ζωής και εξισορρόπηση στην κατανομή της ενέργειας του δικτύου.

Λέξεις-Κλειδιά

Ασύρματη Ανταλλαγή Ενέργειας, Peer-to-Peer, Κινητό Κοινωνικό Δίκτυο, Οπορτουμιστικό Δίκτυο, Ενεργειακό Ισοζύγιο, Ετερογενές Κινητό Δίκτυο, Σταθερή Αντιστοίχιση, Πρόβλημα Συγκατοίκων, Πρόβλεψη Κινητικότητας, Τυχαίοι Περίπατοι

Abstract

In the modern world, computing devices perform an increasing number of tasks, constantly raising their power requirements. For mobile wireless networks, which consist of devices powered by their batteries, power is a valuable resource. Providing uninterrupted energy supply to these devices so that they remain functional for a long period of time is a challenging task.

The development of energy sharing technology, either by wired or wireless means, has made it possible to extend the lifetime of such networks exploiting other energy sources within the network, such as peer devices or energy sharing devices. In particular, peer-to-peer wireless power transfer (P2P-WPT) has enabled portable devices to wirelessly replenish their battery by interacting directly with other devices in close proximity.

The objective of this diploma thesis is to pair users of Mobile Social Networks with heterogeneous portable devices, in order for the network to gain maximum benefit from every wireless energy transfer opportunity. Users with higher energy levels in their devices transfer energy to their peers with lower energy supply. In this way, devices with low energy level manage to stay operational for a longer period of time, extending the lifetime of the network. The losses due to attenuation, the heterogeneity of the devices in terms of energy consumption and efficiency during power transfer along with the constraints of the network topology are taken into account. Mobility prediction as well as social features of the users are also exploited. The user pairing is based on the algorithm for the Stable Roommates Problem (SRP), which aims to find a stable matching for items of the same set, in which the preferences of all users are taken into consideration. The experimental evaluation of the proposed algorithm is carried out on synthetic data. The simulation results show that a typical scenario of energy sharing, which is based on the stable matching algorithm, leads to an increase in lifetime and energy balance of the network.

Keywords

Wireless Power Transfer, Peer-to-Peer, Mobile Social Network, Opportunistic Network, Energy Balance, Heterogeneous Mobile Network, Stable Matching, Stable Roommates Problem, Mobility Prediction, Random Walks

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Συμεών Παπαβασιλείου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου την παρούσα διπλωματική εργασία και για την πολύτιμη υποστήριξή του σε αυτό το βήμα της ακαδημαϊκής μου πορείας.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στη μεταδιδάκτορα Μαργαρίτα Βιτοροπούλου, για την καθοδήγηση, την υπομονή, την βοήθεια και το χρόνο που διέθεσε καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου, τον σύντροφό μου και τους φίλους μου που ήταν δίπλα μου και με στήριξαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	18
1.1	Χρήση κινητών συσκευών και ανάγκη διαμοιρασμού ενέργειας	18
1.2	Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας (Wireless Power Transfer - WPT) .	19
1.3	Αντικείμενο και συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας	19
1.4	Δομή της εργασίας	20
2	Θεωρητικό Υπόβαθρο	22
2.1	Στοιχεία Θεωρίας Γράφων	22
2.2	Μαρκοβιανές Αλυσίδες και Τυχαίοι Περίπατοι	24
2.2.1	Μαρκοβιανές αλυσίδες (Markov Chains)	24
2.2.2	Τυχαίοι Περίπατοι (Random Walks - RW)	26
2.2.3	Εντροπία (Θεωρία Πληροφορίας)	27
2.3	Stable Matching Problems (Προβλήματα Σταθερής Αντιστοίχισης) .	28
2.3.1	Stable Marriage Problem - SMP (Πρόβλημα Σταθερού Γάμου) .	29
2.3.2	Stable Roommates Problem - SRP (Πρόβλημα Συγκατοίκων) .	30
3	Κινητά Κοινωνικά Δίκτυα (Mobile Social Networks - MSNs)	35
3.1	Αρχιτεκτονικές MSNs	36
3.1.1	Κεντρική (Centralised) Αρχιτεκτονική	36
3.1.2	Κατανεμημένη (Distributed) Αρχιτεκτονική	36
3.1.3	Υβριδική (Hybrid) Αρχιτεκτονική	37
3.2	Κινητικότητα Χρηστών	37
3.2.1	Μοντέλα Κίνησης Χρηστών	37
3.2.2	Πρόβλεψη Κινητικότητας	38
3.3	Κοινωνικά Χαρακτηριστικά	38
4	Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας (Wireless Power Transfer - W-PT)	40
4.1	Τεχνολογίες WPT	40
4.2	Τρέχουσες ερευνητικές προσεγγίσεις	41
4.2.1	Κινητά Κοινωνικά Δίκτυα (Mobile Social Networks - MSN) .	42
4.2.2	Σύντομη αναφορά σε άλλους τύπους δικτύων	44

5	Περιγραφή του Συστήματος Δίκαιου Διαμοιρασμού Ενέργειας σε Κινητά Κοινωνικά Δίκτυα	46
5.1	Περιγραφή του προβλήματος	46
5.2	Μοντέλο Συσκευής	47
5.3	Ετερογένεια	48
5.4	Μοντέλο Δικτύου	48
5.5	Κινητικότητα Χρηστών	49
5.6	Δείκτης Προτίμησης	51
5.6.1	Κέρδος	51
5.6.2	Εμπιστοσύνη	52
5.6.3	Link Stability (Σταθερότητα των Συνδέσεων)	52
5.6.4	Υπολογισμός Δείκτη Προτίμησης	53
5.7	Αλγόριθμος Αντιστοίχισης	53
5.7.1	Πρόβλημα Σταθερής Αντιστοίχισης Συγκατοίκων	53
5.7.2	Εναλλακτικός Αλγόριθμος Αντιστοίχισης	55
5.8	Πρωτόκολλο Ανταλλαγής Ενέργειας	55
6	Παρουσίαση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	57
6.1	Σύνολο Δεδομένων και Προεπιλεγμένες Παράμετροι	58
6.2	Πλήθος Χρηστών	59
6.3	Πλήθος Τοποθεσιών	62
6.4	Πλήθος Κατηγοριών	64
6.5	Πλήθος Γύρων	65
6.6	Απόδοση (efficiency)	67
6.7	Ρυθμός Κατανάλωσης Μπαταρίας	70
6.8	Βάρη του δείκτη προτίμησης	73
6.9	Πρωτόκολλο Ανταλλαγής Ενέργειας	83
6.10	Αλγόριθμος Αντιστοίχισης	87
7	Επίλογος	93
7.1	Σύνοψη και Συμπεράσματα	93
7.2	Μελλοντική Εργασία	94
	Βιβλιογραφία	96

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Διάγραμμα Γράφου	22
2.2	Απλοί γράφοι	23
2.3	Διαγράμματα Απλού και Μη Απλών Γράφων [10]	23
2.4	Πλήρης Γράφος με 6 κορυφές	24
2.5	Μαρκοβιανή Αλυσίδα τριών καταστάσεων [13]	25
2.6	Τυχαίος Περίπατος δύο διαστάσεων με 8.000 βήματα	26
2.7	Η εντροπία σε μία δοκιμή Bernoulli ως συνάρτηση της πιθανότητας επιτυχίας [18]	28
3.1	Διαφορετικές αρχιτεκτονικές συστημάτων [31]	37
4.1	Διαφορετικοί τύποι WPT συστημάτων: α) με πηνία, β) με πανκατευθυντικό πομπό, γ) με διάταξη κεραίων [34]	41
6.1	Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας για διαφορετικό πλήθος συσκευών στο σύστημα	59
6.2	Μέσα επίπεδα ενέργειας για διαφορετικό πλήθος συσκευών στο σύστημα	60
6.3	Κατανομές ενέργειας για το πείραμα S_1	61
6.4	Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας για διαφορετικό πλήθος τοποθεσιών στο χώρο ενδιαφέροντος	62
6.5	Μέσα επίπεδα ενέργειας για διαφορετικό πλήθος τοποθεσιών στο χώρο ενδιαφέροντος	63
6.6	Αριθμός ανταλλαγών για διαφορετικό πλήθος κατηγοριών	64
6.7	Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος για διαφορετικό πλήθος κατηγοριών	64
6.8	Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος για διαφορετικό πλήθος κατηγοριών	65
6.9	Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας για διαφορετικό πλήθος γύρων	66
6.10	Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος για διαφορετικό πλήθος γύρων	66
6.11	Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος για διαφορετικό πλήθος γύρων	67
6.12	Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας για διαφορετικές αποδόσεις	68

6.13 Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος για διαφορετικές αποδόσεις	68
6.14 Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος για διαφορετικές αποδόσεις	69
6.15 Κατανομές ενέργειας για το πείραμα S_7 , σε δίκτυο 100 συσκευών . .	69
6.16 Κατανομές ενέργειας για το πείραμα S_7 , σε δίκτυο 200 συσκευών . .	70
6.17 Κατανομές ενέργειας για το πείραμα S_7 , σε δίκτυο 300 συσκευών . .	70
6.18 Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας για διαφορετικούς ρυθμούς κατανάλωσης	71
6.19 Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος για διαφορετικούς ρυθμούς κατανάλωσης	72
6.20 Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος για διαφορετικούς ρυθμούς κατανάλωσης	72
6.21 Αποτελέσματα για $(w_g, w_l, w_s) = (1, 0, 0)$	74
6.22 Κατανομή ενέργειας στο δίκτυο για το πείραμα με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (1, 0, 0)$	74
6.23 Αποτελέσματα για $(w_g, w_l, w_s) = (0.4, 0.4, 0.2)$	75
6.24 Κατανομή ενέργειας στο δίκτυο για το πείραμα με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (0.4, 0.4, 0.2)$	76
6.25 Αποτελέσματα για $(w_g, w_l, w_s) = (0.4, 0.2, 0.4)$	77
6.26 Κατανομή ενέργειας στο δίκτυο για το πείραμα με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (0.4, 0.2, 0.4)$	77
6.27 Αποτελέσματα για $(w_g, w_l, w_s) = (0.2, 0.4, 0.4)$	78
6.28 Κατανομή ενέργειας στο δίκτυο για το πείραμα με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (0.2, 0.4, 0.4)$	78
6.29 Αποτελέσματα για $(w_g, w_l, w_s) = (0, 1, 0)$	79
6.30 Κατανομή ενέργειας στο δίκτυο για το πείραμα με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (0, 1, 0)$	80
6.31 Αποτελέσματα για $(w_g, w_l, w_s) = (0, 0, 1)$	81
6.32 Κατανομή ενέργειας στο δίκτυο για το πείραμα με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (0, 0, 1)$	81
6.33 Αποτελέσματα για $(w_g, w_l, w_s) = (0.33, 0.33, 0.33)$	82
6.34 Κατανομή ενέργειας στο δίκτυο για το πείραμα με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (0.33, 0.33, 0.33)$	83
6.35 Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας με μεταφερόμενη ενέργεια $E = e$. .	85
6.36 Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας με μεταφερόμενη ενέργεια E να λαμβάνει τιμές στο διάστημα $(0, e)$	85
6.37 Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος με μεταφερόμενη ενέργεια $E = e$	86
6.38 Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος με μεταφερόμενη ενέργεια E να λαμβάνει τιμές στο διάστημα $(0, e)$	86
6.39 Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος με μεταφερόμενη ενέργεια $E = e$	87

6.40 Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος με μεταφερόμενη ενέργεια E να λαμβάνει τιμές στο διάστημα $(0, e)$. . .	87
6.41 Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας με τον SR Αλγόριθμο	88
6.42 Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας με τον Εναλλακτικό Αλγόριθμο . . .	89
6.43 Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος με τον SR Αλγόριθμο	89
6.44 Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος με τον Εναλλακτικό Αλγόριθμο	90
6.45 Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος με τον SR Αλγόριθμο	90
6.46 Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος με τον Εναλλακτικό Αλγόριθμο	91
6.47 Κατανομή ενέργειας με τον SR Αλγόριθμο, για 100 χρήστες	91
6.48 Κατανομή ενέργειας με τον Εναλλακτικό Αλγόριθμο, για 100 χρήστες	92

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Αντιστοιχία μεταξύ της ορολογίας των Τυχαίων Περιπάτων και των Μαρκοβιανών Αλυσίδων [17]	27
2.2	Αλγόριθμος Stable Marriage	29
2.3	Αλγόριθμος Stable Roommates	32
2.4	Λίστες προτίμησης ατόμων πριν την εκτέλεση του αλγορίθμου SR . .	33
2.5	Οι καλύτερες προτάσεις των ατόμων μετά το τέλος της πρώτης φάσης του αλγορίθμου SR	33
2.6	Λίστες προτίμησης ατόμων μετά το τέλος της πρώτης φάσης του αλγορίθμου SR	33
2.7	Λίστες προτίμησης ατόμων μετά το τέλος της δεύτερης φάσης του αλγορίθμου SR	34

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Χρήση κινητών συσκευών και ανάγκη διαμοιρασμού ενέργειας

Οι ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις και οι απαιτήσεις των χρηστών οδηγούν σε αύξηση της πολυπλοκότητας συσκευών, όπως τα κινητά τηλέφωνα. Είναι λογικό τα smartphones να αποτελούν πλέον τις κύριες υπολογιστικές συσκευές μας. Το χάσμα επιδόσεων μεταξύ των smartphones και των φορητών υπολογιστών διευρύνεται συνεχώς, καθώς οι χρήστες αναβαθμίζουν τα smartphones τους με ταχύτερο ρυθμό από τους φορητούς υπολογιστές τους [1]. Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ραγδαία αύξηση στο χρόνο χρήσης κινητών τηλεφώνων, που οφείλεται ως ένα βαθμό στην πανδημία του κορονοϊού (COVID-19). Όμως, καθώς πολλοί άνθρωποι πλέον εργάζονται και κοινωνικοποιούνται εξ αποστάσεως, ο χρόνος που αφιερώνεται στα smartphones, θα συνεχίσει να αυξάνεται, αν και με βραδύτερο ρυθμό. Ο αριθμός των ενηλίκων των ΗΠΑ που χρησιμοποιούν κινητά τηλέφωνα θα παρουσιάσει άνοδο, από 248,0 εκατομμύρια το 2021, σε 250,7 εκατομμύρια το 2022 και σε 253,3 εκατομμύρια το 2023 [2].

Σύμφωνα με μία άλλη έρευνα, που πραγματοποιήθηκε το 2022, το 74% των Αμερικανών δήλωσε πως αισθάνεται άβολα αφήνοντας το τηλέφωνό του στο σπίτι, ενώ το 48% δήλωσε ότι αισθάνεται ένα αίσθημα πανικού ή άγχους όταν η μπαταρία του κινητού τηλεφώνου πέσει κάτω από το 20% [3].

Φυσικό επακόλουθο της ζήτησης των χρηστών αποτελεί η όλο και μεγαλύτερη απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς σε αυτές τις συσκευές. Παρόλα αυτά, αυτό καθιστά ακόμα πιο δύσκολη την αύξηση της διάρκειας ζωής των μπαταριών (σήμερα λίγες ώρες πάνω ή κάτω από μία ημέρα) [4], [5]. Το άγχος της απώλειας ενέργειας στη μέση μιας κρίσιμης εργασίας ή σε έκτακτες καταστάσεις, κατά τις οποίες οι χρήστες μπορεί να μην έχουν πρόσβαση σε εγκαταστάσεις φόρτισης, έχει αυξήσει το ενδιαφέρον για ευκαιριακή φόρτιση. Διαμοιρασμός ενέργειας μεταξύ κινητών συσκευών μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλα καλώδια, με συσκευές εξισορρόπησης ισχύος ή μέσω τεχνολογιών ασύρματης μεταφοράς ενέργειας [6].

1.2 Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας (Wireless Power Transfer - WPT)

Η ασύρματη μεταφορά ενέργειας (WPT) είναι ένας γενικός όρος που αναφέρεται σε έναν αριθμό διαφορετικών τεχνολογιών μετάδοσης ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Σε ένα σύστημα ασύρματης μετάδοσης ενέργειας, μια συσκευή πομπού, που χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια από μια πηγή, παράγει ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που μεταβάλλεται στο χρόνο, το οποίο μεταδίδει ενέργεια στο χώρο προς μια συσκευή δέκτη, η οποία αποσπά ενέργεια από το πεδίο και την παρέχει σε ένα ηλεκτρικό φορτίο [7]. Όταν αναφερόμαστε από εδώ και στο εξής στην ασύρματη ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ κινητών συσκευών εννοείται ότι οι πομποδέκτες είναι ενσωματωμένοι στις συσκευές. Η τρέχουσα WPT τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύκολη πραγμάτωση ενός συστήματος διαμοιρασμού ενέργειας μεταξύ κινητών συσκευών. Η ενέργεια, λοιπόν, μετατρέπεται από έναν προσωπικό πόρο σε ένα ανταλλάξιμο και εμπορεύσιμο αγαθό [6].

1.3 Αντικείμενο και συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προτείνεται ένα μοντέλο ασύρματης ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ φορητών ετερογενών συσκευών. Οι χρήστες των συσκευών είναι μέλη ενός κινητού κοινωνικού δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, εγγράφονται σε μια πλατφόρμα κοινωνικής δικτύωσης η οποία “συντονίζει” τις ανταλλαγές ενέργειας. Η ετερογένεια των συσκευών αφορά αφενός στην μοντελοποίηση διαφορετικών αποδόσεων κατά την ανταλλαγή ενέργειας, χαρακτηριστικό του υλικού (hardware) της συσκευής και αφετέρου στην εισαγωγή διαφορετικών ρυθμών κατανάλωσης της μπαταρίας, μέγεθος που αποτελεί συνδυασμό των εγγενών χαρακτηριστικών της συσκευής και της χρήσης που της γίνεται, η οποία μπορεί να διαφέρει από χρήστη σε χρήστη (πχ. λειτουργία εφαρμογών, σύνδεση σε δίκτυο Wifi κ.ά.). Επιπλέον, λαμβάνονται υπ’ όψιν η κινητικότητα των χρηστών εντός του χώρου ενδιαφέροντος και κοινωνικά τους χαρακτηριστικά.

Το πρόβλημα που μελετάται είναι η αντιστοίχιση των χρηστών ετερογενών συσκευών σε ζεύγη με στόχο το δίκτυο να αποκτήσει μέγιστο όφελος, με κάθε ευκαιρία ασύρματης ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ των χρηστών. Αυτό θα οδηγήσει στην καθυστέρηση της ανάγκης φόρτισης των κινητών συσκευών με χαμηλή ενεργειακή στάθμη, χωρίς να αλλάξουν οι συνήθειες κατανάλωσης και φόρτισης που έχουν αναπτύξει οι χρήστες. Για τη δημιουργία ζευγών ανταλλαγής ενέργειας, χρησιμοποιούμε τον αλγόριθμο για το Πρόβλημα της Αντιστοίχισης Συγκατοίκων (Stable Roommates Problem - SRP), ο οποίος επιτρέπει αντιστοιχίσεις μεταξύ κάθε πιθανού ζεύγους από το σύνολο που εξετάζεται, λαμβάνοντας υπ’ όψιν τις προτιμήσεις των χρηστών, υιοθετώντας τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί σε παρόμοιες εργασίες, όπως οι [6],

[8].

Ο στόχος του συστήματος που προτείνεται είναι η μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του δικτύου, κάτι που ισοδυναμεί με τη μεγιστοποίηση του ελάχιστου επιπέδου ενέργειας που υπάρχει στο δίκτυο. Αναζητούμε μια λύση που θα ωφελεί τόσο τους χρήστες μεμονωμένα, όσο και το δίκτυο συνολικά, οδηγώντας στη δίκαιη κατανομή της ενέργειας και την επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Η εισαγωγή της ετερογένειας των συσκευών καθώς και κοινωνικών χαρακτηριστικών των χρηστών, στοχεύουν σε μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση του προβλήματος, λαμβάνοντας υπόψιν τόσο την τεχνική πλευρά του, όσο και την κοινωνική, δηλαδή, την προθυμία των χρηστών να ανταλλάξουν ενέργεια με τα υπόλοιπα μέλη του δικτύου.

1.4 Δομή της εργασίας

Η διπλωματική εργασία απαρτίζεται από 7 κεφάλαια, τα οποία έχουν ως εξής:

- Το κεφάλαιο 2, περιλαμβάνει το θεωρητικό, μαθηματικό και αλγοριθμικό, υπόβαθρο, δηλαδή, τις έννοιες με τις οποίες είναι απαραίτητο να έρθει σε επαφή ο αναγνώστης ώστε να μπορεί να κατανοήσει και να αξιολογήσει το μοντέλο που αναπτύχθηκε και τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Αναλυτικά, παραθέτονται βασικές έννοιες σχετικά με την Θεωρία Γράφων, τις Μακροβιανές Αλυσίδες και τους Τυχαίους Περιπάτους. Επιπλέον, περιγράφονται τα προβλήματα Σταθερής Αντιστοίχισης (Stable Matching) και κυρίως ο αλγόριθμος για την επίλυση του Stable Roommates Problem, που χρησιμοποιείται στην διπλωματική εργασία.
- Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στα κοινωνικά δίκτυα και ειδικότερα στα κινητά κοινωνικά δίκτυα (Mobile Social Networks). Παρουσιάζονται βασικές αρχιτεκτονικές των κινητών κοινωνικών δικτύων και αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας τους. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην κινητικότητα των χρηστών-κόμβων και παρουσιάζονται κάποια μοντέλα κίνησης που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Τέλος, αναφερόμαστε στα κοινωνικά χαρακτηριστικά των χρηστών και στον τρόπο με τον οποίο αυτά επηρεάζουν τις αλληλεπιδράσεις τους.
- Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται αναλυτικά οι υπάρχουσες τεχνολογίες ασύρματης μεταφοράς ενέργειας (WPT) και παρέχεται μια επισκόπηση των τρεχουσών ερευνητικών κατευθύνσεων και του σχεδιασμού νέων αλγορίθμων που χρησιμοποιώντας WPT επιχειρούν να επιλύσουν το πρόβλημα αναπλήρωσης ενέργειας στα κινητά δίκτυα.
- Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται το σύστημα του δίκαιου διαμοιρασμού ενέργειας σε κινητά κοινωνικά δίκτυα το οποίο αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, με εκτενή παράθεση των μαθηματικών εργαλείων και των αλγοριθμικών τεχνικών των οποίων έγινε χρήση.

- Στο κεφάλαιο 6 παραθέτουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διεξήχθησαν στο μοντέλο. Αναφέρονται αναλυτικά οι τεχνικές που εφαρμόσαμε και οι διαφορετικοί συνδυασμοί παραμέτρων που χρησιμοποιήσαμε προκειμένου να αξιολογήσουμε το μοντέλο, τη συμπεριφορά και την απόδοσή του.
- Στο κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα συμπεράσματα σχετικά με το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην διπλωματική εργασία και αναφέρονται τα επόμενα βήματα ερευνητικής μελέτης πάνω στο αντικείμενο της WPT.

Κεφάλαιο 2

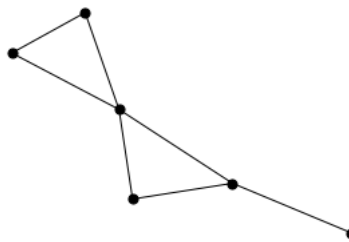
Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Στοιχεία Θεωρίας Γράφων

Η θεωρία γράφων έχει καθιερωθεί ως ένα σημαντικό μαθηματικό εργαλείο, με εφαρμογές σε ένα πλήθος επιστημονικών πεδίων. Η επιστήμη υπολογιστών και η συνδυαστική βελτιστοποίηση, ειδικότερα, βασίζονται συχνά σε αυτή τη θεωρία. Σε αυτήν την ενότητα παραθέτουμε τους βασικούς ορισμούς της θεωρίας γράφων καθώς και έννοιες πιο εξειδικευμένες [9], οι οποίες είναι απαραίτητες για την κατανόηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ορισμός 1. Ένας γράφος G είναι ένα διατεταγμένο ζεύγος συνόλων (V, E) που αποτελείται από ένα σύνολο V κορυφών και ένα σύνολο E ακμών. Κάθε ακμή $e = (v, u)$, $e \in E$, συνδέει τους κόμβους $v, u \in V$.

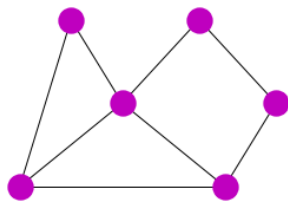
Συχνά, όταν σχεδιάζουμε το διάγραμμα ενός γράφου, αναφερόμαστε σε αυτό σαν να είναι ο ίδιος ο γράφος. Η διαγραμματική απεικόνιση των γράφων γίνεται συνήθως αναπαριστώντας τους κόμβους με σημεία και τις ακμές με γραμμές, που συνδέουν τα σημεία αυτά.



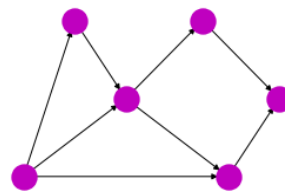
Σχήμα 2.1: Διάγραμμα Γράφου

Οι γράφοι χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τους **κατευθυνόμενους** (directed) και τους **μη κατευθυνόμενους** (undirected) με βάση την ύπαρξη ή μη κατεύθυνσης στις ακμές τους, αντίστοιχα. Στους μη κατευθυνόμενους γράφους, οι ακμές δεν έχουν κατεύθυνση, είναι, δηλαδή, μη διατεταγμένα ζεύγη και: $e = \{v, u\} = \{u, v\}$,

$\forall e \in E$. Αντίθετα, στους κατευθυνόμενους γράφους οι ακμές έχουν κατεύθυνση, είναι, δηλαδή, διατεταγμένα ζεύγη και: $e = \{v, u\} \neq \{u, v\}$ αν υπάρχει, $\forall e \in E$. Κάθε ακμή συνδέει δύο κόμβους, δηλαδή συμβολίζει την ύπαρξη σχέσης μεταξύ τους. Αν η ακμή έχει κατεύθυνση (που συμβολίζεται με βέλος στα διαγράμματα γράφων), τότε η σχέση αυτή είναι μονόπλευρη. Αν απουσιάζει η κατεύθυνση, η σχέση είναι αμφίδρομη.



(α') Μη κατευθυνόμενος γράφος



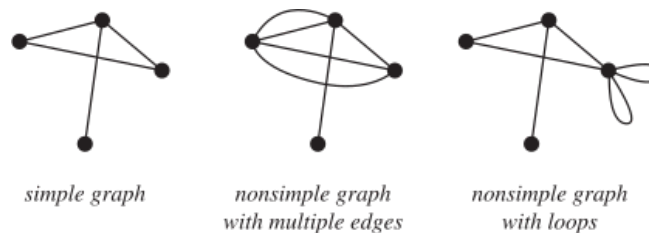
(β') Κατευθυνόμενος γράφος

Σχήμα 2.2: Απλοί γράφοι

Ορισμός 2. Ένας βρόχος (loop) είναι μια ακμή που συνδέει μια κορυφή με τον εαυτό της.

Ορισμός 3. Ο γράφος έχει πολλαπλές ακμές (multiple edges) αν υπάρχει πάνω από μία ακμή που συνδέει το ίδιο ζεύγος κορυφών.

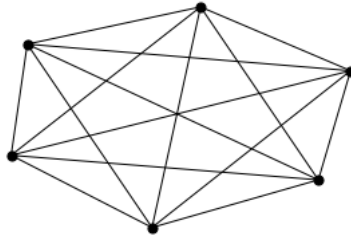
Ένας απλός γράφος είναι ένας γράφος χωρίς βρόχους και πολλαπλές ακμές. Διαφορετικά, ο γράφος είναι μη απλός.



Σχήμα 2.3: Διαγράμματα Απλού και Μη Απλών Γράφων [10]

Ένας πλήρης γράφος ή κλίκα είναι ένας απλός μη κατευθυνόμενος γράφος, στον οποίο κάθε ζεύγος διαφορετικών κορυφών συνδέεται με μια μοναδική ακμή.

Όταν οι γράφοι χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση πρακτικών προβλημάτων, συχνά πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν πρόσθετοι παράγοντες, όπως το κόστος ή η απόσταση, που σχετίζονται με τις ακμές. Σε ένα δίκτυο επικοινωνιών, για παράδειγμα,



Σχήμα 2.4: Πλήρης Γράφος με 6 κορυφές

υπάρχει το κόστος μετάδοσης δεδομένων κατά μήκος των συνδέσμων. Τέτοια προβλήματα μοντελοποιούνται με **έμβαρους** (weighted) γράφους. Κάθε ακμή e του G συνοδεύεται από έναν πραγματικό αριθμό $w(e)$, που ονομάζεται βάρος της ακμής. Τότε ο G , μαζί με τα βάρη w στις ακμές του, ονομάζεται έμβαρους γράφος και συμβολίζεται ως $G = (V, E, w)$.

Διαδρομή ή **περίπατος** (walk) σε έναν γράφο G είναι μια ακολουθία $W : (v_0, e_1, v_1, \dots, v_{l-1}, e_l, v_l)$, της οποίας οι όροι είναι εναλλάξ κορυφές και ακμές του G (όχι απαραίτητα διαφορετικές), έτσι ώστε οι v_{i-1} και v_i είναι τα άκρα του e_i , $1 \leq i \leq l$. Ο ακέραιος l (ο αριθμός των όρων των ακμών) είναι το μήκος του W . Μια διαδρομή κατά την οποία δεν επαναλαμβάνεται καμία κορυφή χαρακτηρίζεται ως **μονοπάτι** (path). Ένας γράφος ονομάζεται **συνδεδεμένος** (connected) αν υπάρχει μονοπάτι που συνδέει κάθε ζεύγος κόμβων του γράφου.

Τέλος, αναφέρουμε πως δύο κορυφές ονομάζονται **γειτονικές** αν υπάρχει ακμή που τις συνδέει. Σύμφωνα με αυτό, ορίζεται ως **γειτονιά κορυφής** (neighborhood) το σύνολο $N(u)$ των γειτονικών κορυφών του u , όπου $N(u) = \{v | (u, v) \in E\}$. Επιπλέον, το πλήθος των γειτόνων μια κορυφής u , ονομάζεται **βαθμός** (degree) της κορυφής.

2.2 Μαρκοβιανές Αλυσίδες και Τυχαίοι Περιπάτοι

Αυτή η ενότητα αφορά σε στοχαστικές διαδικασίες, όπως οι Τυχαίοι Περιπάτοι τους οποίους χρησιμοποιούμε στην εργασία μας για να περιγράψουμε τις κινήσεις των χρηστών του δικτύου που μοντελοποιείται. Αναφέρουμε, λοιπόν, χρησιμοποιώντας θεωρητικούς ορισμούς και παραδείγματα τη βασική θεωρία των Μαρκοβιανών Αλυσίδων και των Τυχαίων Περιπάτων, με την οποία είναι απαραίτητο να εξοικειωθεί ο αναγνώστης αυτής της εργασίας.

2.2.1 Μαρκοβιανές αλυσίδες (Markov Chains)

Οι Μαρκοβιανές Αλυσίδες ή Αλυσίδες Markov παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά το 1906 από τον Ρώσο μαθηματικό Andrei Markov. Αντιπροσωπεύουν μια κατηγορία

στοχαστικών διαδικασιών στις οποίες το μέλλον δεν εξαρτάται από το παρελθόν, αλλά μόνο από το παρόν [11]. Σημειώνουμε πως από εδώ και στο εξής αναφερόμαστε σε Μαρκοβιανές Αλυσίδες Διακριτού Χρόνου. Στη συνέχεια, δίνουμε τον μαθηματικό ορισμό της Μαρκοβιανής αλυσίδας [12].

Ορισμός 4. Μια στοχαστική διαδικασία $X = \{X_n : n \geq 0\}$ σε ένα αριθμήσιμο σύνολο S είναι Μαρκοβιανή Αλυσίδα αν $\forall i, j \in S$ και $n \geq 0$:

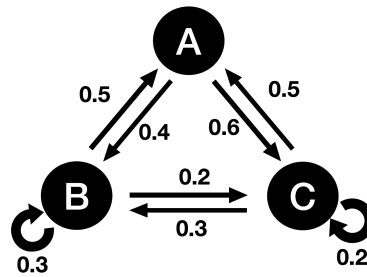
$$P\{X_{n+1} = j | X_0, \dots, X_n\} = P\{X_{n+1} = j | X_n\} \quad (2.1)$$

$$P\{X_{n+1} = j | X_n = i\} = p_{ij} \quad (2.2)$$

Η συνθήκη 2.1 ονομάζεται ιδιότητα Μαρκον. Αυτό που εκφράζει είναι πως σε κάθε χρονική στιγμή n , η επόμενη κατάσταση X_{n+1} είναι υπό όρους ανεξάρτητη από το παρελθόν (X_0, \dots, X_{n-1}) , δεδομένης της παρούσας κατάστασης X_n . Με άλλα λόγια, η επόμενη κατάσταση εξαρτάται μόνο από την παρούσα κατάσταση.

Η p_{ij} , της εξίσωσης 2.2 είναι η πιθανότητα της Μαρκοβιανής Αλυσίδας να μεταβεί από την κατάσταση i στην κατάσταση j . Οι πιθανότητες μετάβασης ικανοποιούν τη συνθήκη:

$$\sum_{j \in S} p_{ij} = 1, i \in S \quad (2.3)$$



Σχήμα 2.5: Μαρκοβιανή Αλυσίδα τριών καταστάσεων [13]

Αν η Μαρκοβιανή Αλυσίδα έχει N καταστάσεις, ο $N \times N$ πίνακας $P = (p_{ij})$ είναι ο πίνακας μεταβάσεων της. Έστω $p_{ij}^{(n)}$ η πιθανότητα μετάβασης από το i στο j σε n χρονικά βήματα. Τότε:

$$P\{X_n = j | X_0 = i\} \quad (2.4)$$

Εάν $n = 2$, τότε:

$$p_{ij}^{(2)} = \sum_k p_{ik} p_{kj} \quad (2.5)$$

καθώς για να φτάσουμε από το i στο j σε δύο βήματα, η αλυσίδα πρέπει να περάσει από την i σε κάποια ενδιάμεση κατάσταση k και στη συνέχεια από την k στην j (αυτές οι μεταβάσεις είναι ανεξάρτητες λόγω της μαρκοβιανής ιδιότητας). Ουσιαστικά, λοιπόν, η πιθανότητα $p_{ij}^{(2)}$ δίνεται από το στοιχείο που βρίσκεται στην i γραμμή και j στήλη του πίνακα μετάβασης υψωμένου στο τετράγωνο P^2 . Με επαγωγή, οι δυνάμεις του πίνακα μετάβασης P^n δίνουν τις πιθανότητες μετάβασης σε n χρονικά βήματα [14].

2.2.2 Τυχαίοι Περίπατοι (Random Walks - RW)

Στα μαθηματικά, ένας Τυχαίος Περίπατος είναι μια στοχαστική διαδικασία που περιγράφει μια διαδρομή που αποτελείται από διαδοχικά τυχαία βήματα σε κάποιο μαθηματικό χώρο. Το πιο απλό παράδειγμα Τυχαίου Περιπάτου είναι ο Τυχαίος Περίπατος σε μία διάσταση, τη γραμμική αέραςτων αριθμών \mathbb{Z} , ο οποίος ξεκινά από το 0 και σε κάθε βήμα κινείται στο +1 ή στο -1 με ίση πιθανότητα [15]. Σε κάθε βήμα, λοιπόν, ακολουθούμε μια Τυχαία Μεταβλητή, από μία οικογένεια Τυχαίων Μεταβλητών $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$ που ακολουθούν διωνυμική κατανομή με ισοπίθανα ενδεχόμενα το +1 και το -1. Υπάρχουν 2^n τέτοιοι περίπατοι με n βήματα, όλοι το ίδιο πιθανό να συμβούν.

Άλλα παραδείγματα Τυχαίων Περιπάτων περιλαμβάνουν τη διαδρομή που διαγράφει ένα μόριο καθώς ταξιδεύει σε ένα υγρό, τη διαδρομή ενός ζώου που αναζητά τροφή και την τιμή μιας κυμαινόμενης μετοχής. Οι τυχαίοι περίπατοι έχουν εφαρμογές στη μηχανική και σε πολλά επιστημονικά πεδία όπως η οικολογία, η ψυχολογία, η επιστήμη υπολογιστών, η φυσική, η χημεία, η βιολογία, η οικονομία και η κοινωνιολογία [15].



Σχήμα 2.6: Τυχαίος Περίπατος δύο διαστάσεων με 8.000 βήματα

Στη συνέχεια, θα αναφερθούμε σε Τυχαίους Περιπάτους σε γράφους. Έστω $G = (V, E, w)$ ένας έμβρος μη κατευθυνόμενος γράφος. Ένας Τυχαίος Περίπατος στο γράφο είναι μια διαδικασία που ξεκινά από κάποια κορυφή του G και σε κάθε χρονικό βήμα μετακινείται σε μια άλλη κορυφή του G . Όταν ο γράφος δεν έχει βάρη στις ακμές του, η κορυφή στην οποία μετακινείται αυτός που εκτελεί τον περίπατο επιλέγεται τυχαία με ίδια πιθανότητα για όλους τους γείτονες της παρούσας κορυφής. Όταν το γράφημα είναι έμβρο, μετακινείται σε έναν γείτονα με πιθανότητα ανάλογη με το βάρος της αντίστοιχης ακμής [16].

Οι Τυχαίοι Περίπατοι σε γράφους είναι Μαρκοβιανές Αλυσίδες Διακριτού Χρόνου. Μία Μαρκοβιανή Αλυσίδα μπορεί να παρασταθεί από έναν έμβρο γράφο (κατευθυνόμενο ή μη), με κάθε κορυφή να αναπαριστά μία κατάσταση και κάθε ακμή $e = \{i, j\}$ με βάρος p_{ij} την πιθανότητα μετάβασης από την κορυφή i στην κορυφή j . Στον

random walk	Markov chain
graph	stochastic process
vertex	state
strongly connected	persistent
aperiodic	aperiodic
strongly connected and aperiodic	ergodic
undirected graph	time reversible

Πίνακας 2.1: Αντιστοιχία μεταξύ της ορολογίας των Τυχαίων Περιπάτων και των Μαρκοβιανών Αλυσίδων [17]

Πίνακα 2.1 φαίνονται οι αντιστοιχίες της ορολογίας της Θεωρίας Τυχαίων Περιπάτων με τη Θεωρία των Μαρκοβιανών Αλυσίδων.

2.2.3 Εντροπία (Θεωρία Πληροφορίας)

Στη Θεωρία Πληροφορίας η Εντροπία είναι το “μέτρο αβεβαιότητας” που χαρακτηρίζει ένα σύστημα. Σε αυτήν την υποενότητα παραθέτουμε τον ορισμό της Εντροπίας καθώς και κάποια παραδείγματα συναφή με την παρούσα εργασία [18].

Έστω ένα πείραμα τύχης με n πιθανά αποτελέσματα. Θεωρούμε την τυχαία μεταβλητή X και τα απλά ενδεχόμενα $\{x_1, \dots, x_n\}$ που πραγματοποιούνται με πιθανότητες $\{p_1, \dots, p_n\}$, αντίστοιχα, για τα οποία ισχύει $\sum_{i=1}^n p_i = 1$. Η εντροπία της τ.μ. X ορίζεται ως:

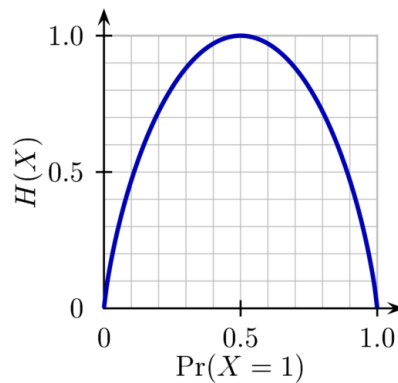
$$H(X) = \sum_{x=1}^n p_x \log_2\left(\frac{1}{p_x}\right) = - \sum_{x=1}^n p_x \log_2 p_x, \quad (2.6)$$

με τη σύμβαση πως $0 \log_2 0 = 0$.

Το πρώτο παράδειγμα εντροπίας που παραθέτουμε αφορά μία **δοκιμή Bernoulli**. Έστω μία δοκιμή Bernoulli με πιθανότητα επιτυχίας p . Συγκεκριμένα, μπορούμε να θεωρήσουμε ένα δοχείο με N μπάλες, Np από τις οποίες είναι λευκές και $N(1-p)$ μαύρες, από το οποίο επιλέγουμε τυχαία μία μπάλα. Αν όλες οι μπάλες είναι λευκές ή όλες είναι μαύρες ($p = 1$ ή $p = 0$ αντίστοιχα), τότε ξέρουμε με σιγουριά το αποτέλεσμα του πειράματος και η εντροπία είναι 0. Τη μέγιστη αβεβαιότητα για το αποτέλεσμα την έχουμε όταν οι μισές μπάλες είναι λευκές και οι μισές μαύρες, δηλαδή όταν $p = 0.5$.

Στη συνέχεια, εξετάζουμε την Εντροπία μιας τυχαίας μεταβλητής με **ισοπίθανα γεγονότα**. Έστω η τυχαία μεταβλητή Q μπορεί να πάρει n τιμές που είναι ισοπίθανες μεταξύ τους, $p = \frac{1}{n}$. Η εντροπία τότε είναι:

$$H(X) = - \sum_{x=1}^n \frac{1}{n} \log_2\left(\frac{1}{n}\right) \quad (2.7)$$



Σχήμα 2.7: Η εντροπία σε μία δοκιμή Bernoulli ως συνάρτηση της πιθανότητας επιτυχίας [18]

Συμπερασματικά, σε μια πηγή πληροφορίας χωρίς μνήμη στην οποία όλα της τα σύμβολα είναι ισοπίθανα, έχουμε μέγιστη τιμή εντροπίας H_{max} .

2.3 Stable Matching Problems (Προβλήματα Σταθερής Αντιστοίχισης)

Στην παρούσα εργασία επιθυμούμε να αντιστοιχίσουμε τους χρήστες του κινητού κοινωνικού δικτύου που προσομοιώνουμε σε ζεύγη ανταλλαγής ενέργειας. Για να το κάνουμε αυτό ανάγουμε το πρόβλημα Stable Matching στο πρόβλημα αντιστοίχισης χρηστών για WPT. Στα μαθηματικά, τα οικονομικά και την επιστήμη των υπολογιστών, το Stable Marriage Problem (Πρόβλημα του Σταθερού Γάμου) ή Stable Matching Problem - SMP (Πρόβλημα Σταθερής Αντιστοίχισης/Ταιριάσματος) είναι το πρόβλημα της εύρεσης μίας σταθερής αντιστοίχισης μεταξύ δύο ισομεγέθων συνόλων, δεδομένης μιας σειράς προτίμησης κάθε στοιχείου του ενός συνόλου για κάθε στοιχείο του άλλου συνόλου. Ένα ταιρίασμα είναι μια αμφιμονοσήμαντη αντιστοίχιση των στοιχείων του ενός συνόλου με στοιχεία του άλλου. Ένα ταιρίασμα δεν είναι stable (ευσταθές/σταθερό) αν υπάρχει στοιχείο A του πρώτου συνόλου που προτιμά κάποιο στοιχείο B του δεύτερου συνόλου έναντι του στοιχείου με το οποίο το A είναι ήδη αντιστοιχισμένο και το B προτιμά επίσης το A έναντι του στοιχείου με το οποίο το B είναι ήδη αντιστοιχισμένο. Μια αντιστοίχιση, δηλαδή, είναι ευσταθής όταν δεν υπάρχει κανένα ζεύγος στοιχείων (A, B) που να προτιμούν το ένα το άλλο από τα τρέχοντα ζεύγη τους, στο πλαίσιο της αντιστοίχισης [19].

2.3.1 Stable Marriage Problem - SMP (Πρόβλημα Σταθερού Γάμου)

Το πρόβλημα του Σταθερού Γάμου διατυπώνεται ως εξής:

“Δεδομένων n ανδρών και n γυναικών, όπου κάθε άτομο έχει κατατάξει όλα τα μέλη του αντίθετου φύλου κατά σειρά προτίμησης, παντρεύστε τους άνδρες με τις γυναίκες, έτσι ώστε να μην υπάρχουν δύο άτομα του αντίθετου φύλου που και οι δύο θα προτιμούσαν να έχουν ο ένας τον άλλον από τους συντρόφους που τους έχουν ανατεθεί μέχρι στιγμής. Όταν δεν υπάρχουν τέτοια ζεύγη απόμων, το σύνολο των γάμων θεωρείται ευσταθές” [20].

Algorithm 1: Αλγόριθμος Stable Marriage [21]

Input: preference lists of men and women

Output: list of married pairs

```
1 Initialize all men and women to free
2 while a free man  $m$  exists, having a woman  $w$  to propose to do
3    $w = m$ 's highest ranked woman to whom he has not yet proposed
4   if  $w$  is free then
5      $(m, w)$  become engaged
6   else
7     pair  $(m', w)$  already exists
8     if  $w$  prefers  $m$  to  $m'$  then
9        $(m, w)$  become engaged
10       $m'$  becomes free
11     else
12        $(m', w)$  remain engaged
13   end
14 end
```

Πίνακας 2.2: Αλγόριθμος Stable Marriage

Το 1962, ο David Gale και ο Lloyd Shapley απέδειξαν στο [22] ότι, για οποιαδήποτε δύο σύνολα ίδιου πληθικού αριθμού, είναι πάντα δυνατό να λυθεί το SMP καταλήγοντας σε stable matching. Παρουσίασαν έναν αλγόριθμο για να το πετύχουν. Ο αλγόριθμος Gale-Shapley, που παρουσιάζεται σε μορφή ψευδοκώδικα στον Πίνακα 2.2, συνοψίζεται ως εξής:

- Στον πρώτο γύρο, κάθε αδέσμευτος άνδρας κάνει πρόταση γάμου στη γυναίκα που προτιμά περισσότερο, και στη συνέχεια κάθε γυναίκα απαντά “ίσως” στον μνηστήρα που προτιμά περισσότερο και “όχι” σε όλους τους άλλους μνηστήρες.

Στη συνέχεια, “αρραβωνιάζεται” προσωρινά με τον μνηστήρα που προτιμά περισσότερο μέχρι στιγμής, και ο εν λόγω μνηστήρας “αρραβωνιάζεται” επίσης προσωρινά μαζί της.

- Σε κάθε επόμενο γύρο, κάθε ελεύθερος άνδρας κάνει πρόταση γάμου στην γυναίκα που προτιμά περισσότερο, στην οποία δεν έχει κάνει ακόμη πρόταση (ανεξάρτητα από το αν η γυναίκα είναι ήδη δεσμευμένη) και στη συνέχεια κάθε γυναίκα απαντά “ίσως” αν δεν είναι επί του παρόντος δεσμευμένη ή αν προτιμά αυτόν τον άνδρα από τον τρέχοντα προσωρινό σύντροφό της (στην περίπτωση αυτή, απορρίπτει τον τρέχοντα προσωρινό σύντροφό της, ο οποίος γίνεται ελεύθερος). Ο προσωρινός χαρακτήρας των αρραβώνων διατηρεί το δικαίωμα μιας ήδη αρραβωνιασμένης γυναίκας να “ανταλλάξει” τον μέχρι τότε σύντροφό της.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να αρραβωνιαστούν όλοι. Αυτός ο αλγόριθμος εγγυάται ότι θα παραγάγει ένα stable matching για όλους τους συμμετέχοντες σε χρόνο $O(n^2)$ όπου n είναι ο αριθμός των ανδρών ή των γυναικών [22]. Η ύπαρξη δύο συνόλων που πρέπει να αντιστοιχηθούν μεταξύ τους (ετεροφυλόφιλοι άνδρες και γυναίκες σε αυτό το παράδειγμα) διακρίνει αυτό το πρόβλημα από το πρόβλημα των σταθερών συγκατοίκων, το οποίο θα εξετάσουμε στη συνέχεια.

2.3.2 Stable Roommates Problem - SRP (Πρόβλημα Συγκατοίκων)

Το Πρόβλημα των Συγκατοίκων είναι το πρόβλημα που επιχειρούμε να λύσουμε στην παρούσα εργασία. Το Stable Roommates Problem είναι ουσιαστικά μια εκδοχή του προβλήματος του Stable Marriage που περιλαμβάνει, όμως, μόνο ένα σύνολο. Κάθε άτομο του συνόλου, ζυγού αριθμού n , κατατάσσει τα υπόλοιπα $n-1$ άτομα κατά σειρά προτίμησης σε μια λίστα. Το ζητούμενο είναι να βρεθεί ένα stable matching, το οποίο είναι μία διαμέριση του συνόλου σε $n/2$ ζεύγη συγκατοίκων, έτσι ώστε να μην υπάρχουν δύο άτομα που αφενός δεν είναι συγκατοίκοι και αφετέρου προτιμούν και τα δύο το ένα το άλλο από τους πραγματικούς τους συγκατοίκοις [23]. Οι Gale και Shapley είχαν αποδείξει ότι, σε αντίθεση με την περίπτωση του Stable Marriage Problem, υπάρχουν περιπτώσεις για τις οποίες δεν υπάρχει σταθερή αντιστοίχιση για το Stable Roommates Problem [24].

Ο Robert Irving παρουσίασε στο [23] έναν αποτελεσματικό αλγόριθμο δύο φάσεων για την εύρεση stable matching στο Stable Roommates Problem. Μια εκτεταμένη μορφή του αλγορίθμου παρουσιάστηκε στο [24]. Ο αλγόριθμος παρατίθεται σε μορφή ψευδοκώδικα στον Πίνακα 2.3 και συνοψίζεται ως εξής:

Πρώτη φάση: Η πρώτη φάση ξεκινάει με όλα τα άτομα να είναι ελεύθερα, μην έχοντας δεχθεί καμία πρόταση για να αποκτήσουν ζεύγος. Κατά τη φάση αυτή, όλοι κάνουν πρόταση στα άτομα που βρίσκονται πιο ψηλά στις λίστες προτίμησής τους. Οι προτάσεις αυτές είναι μονόπλευρες. Κάθε άτομο καταλήγει με το άτομο που του

έκανε την καλύτερη πρόταση. Αναλυτικά, εάν ο X λάβει μια πρόταση από τον Y , ο X συγκρίνει τον Y με το τρέχον ζευγάρι του, έστω F . Τότε:

- Εάν ο F είναι προτιμότερος από τον Y , δηλαδή είναι πιο ψηλά στη λίστα προτίμησης του X , τότε ο X απορρίπτει την πρόταση του Y και αλληλοδιαγράφονται από τις λίστες προτίμησής τους.
- Διαφορετικά, ο X αποδέχεται την πρόταση του Y και απορρίπτει τον F , ο οποίος πρέπει να αναζητήσει νέο ζεύγος. Ο F διαγράφει από τη λίστα προτίμησής του τον X και ο X τον F .

Στο τέλος της πρώτης φάσης, όλα τα άτομα διαγράφουν από τις λίστες τους αυτούς, οι οποίοι βρίσκονται σε χαμηλότερη κατάταξη στις λίστες προτίμησής τους από τα τρέχοντα ζεύγη τους. Αυτή η φάση του αλγορίθμου θα τερματιστεί είτε με όλα τα άτομα να έχουν ακριβώς μια πρόταση ή με ακριβώς ένα άτομο να έχει κενή λίστα προτίμησης, δηλαδή, να έχει απορριφθεί από όλους. Η δεύτερη περίπτωση, υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει stable matching.

Δεύτερη φάση: Η φάση αυτή εκτελείται εάν δεν υπάρχει κανένα άτομο με κενή λίστα προτίμησης μετά το πέρας της πρώτης φάσης και εάν υπάρχει τουλάχιστον ένα άτομο με λίστα προτίμησης μεγέθους μεγαλύτερου του 1. Στη δεύτερη φάση εντοπίζονται και διαγράφονται οι κύκλοι “all or nothing”. Η ύπαρξη αυτών των κύκλων οδηγεί στο σχηματισμό ζευγών που καταλύουν την ευστάθεια του matching και επομένως, πρέπει να διαγραφούν.

Ορισμός 5. Ένας κύκλος “all or nothing” είναι μια κυκλική ακολουθία στην οποία τα πρόσωπα εναλλάσσονται μεταξύ της δεύτερης επιλογής ενός ατόμου και της χειρότερης επιλογής αυτού του ατόμου. Μόλις ένα πρόσωπο εμφανιστεί δύο φορές ως η χειρότερη επιλογή για κάποιον, έχει εντοπιστεί ένας κύκλος. Όλοι οι κύκλοι ξεκινούν παίρνοντας οποιοδήποτε άτομο με μια δεύτερη επιλογή στη λίστα προτίμησής του ως την πρώτη χειρότερη επιλογή [25].

Με βάση έναν “all or nothing” κύκλο $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$, για κάθε $i = 1, \dots, n$ πρέπει να διαγραφούν επιπλέον όλα τα ζεύγη (y_i, z) , ώστε ο y_i να προτιμά τον x_{i-1} από τον z . Αυτό είναι απαραίτητο να γίνει, καθώς αν παραλειφθεί, θα παραμείνουν κάποια ζεύγη με αντικρουόμενα συμφέροντα, παραβιάζοντας το stable matching [25].

Στο τέλος αυτής της φάσης, κάθε άτομο έχει το πολύ ένα άλλο στη λίστα του. Η αντιστοίχιση κάθε προσώπου με το άτομο που βρίσκεται στη λίστα προτίμησής του θα οδηγήσει σε stable matching. Εάν κάποιος έχει κενή λίστα, τότε, δεν υπάρχει stable matching για το σύνολο. Σε αυτήν την περίπτωση, ο αλγόριθμος επιστρέφει μια ατελή αντιστοίχιση [26]. Ο Stable Roommates αλγόριθμος έχει χρονική πολυπλοκότητα $O(n^2)$, για ένα σύνολο n ατόμων [23].

Στη συνέχεια, δίνουμε ένα απλό παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου με 4 άτομα. Οι λίστες προτίμησης των ατόμων πριν την έναρξη του αλγορίθμου Stable Roommates φαίνονται στον Πίνακα 2.4.

Algorithm 2: Αλγόριθμος Stable Roommates

Input: a set of people N and their preference lists PL

Output: The pairs that occurred

```
1 //phase 1
2 for person from 1 to N do
3   proposer = person
4   while proposer is not empty or PL[proposer] is not empty do
5     u ← PL[proposer].first()
6     if u is not proposed earlier then
7       Match (u, proposer)
8       proposer ← nil
9     else
10      current ← u.hasProposalsFrom()
11      if u prefers current over proposer then
12        Remove u from PL[proposer] and proposer from PL[u]
13      else
14        Remove u from PL[current] and current from PL[u]
15        Match (u, proposer)
16        proposer = current
17      end
18    end
19  end
20 end
21 for each person i matched to a person m do
22   Remove i from PL[r] and r from PL[i], ∀ r with rank(r) > rank(m)
23 end
24 //phase 2
25 if ∄ person, whose PL is empty then
26   for each person pi with |PL[pi]| > 1 do
27     Find a cycle (pi, qi, pi+1, qi+1, ..., qs1, ps = pi), where qi =
        second preference in PL[pi] and pi+1 = last preference in
        PL[qi]
28     Remove qi from PL[pi+1] and pi+1 from PL[qi] ∀ i
29   end
30 end
```

Πίνακας 2.3: Αλγόριθμος Stable Roommates

Κατά την πρώτη φάση του αλγορίθμου, τα άτομα κάνουν μονόπλευρες προτάσεις

Άτομα	Λίστες προτίμησης
0	1 3 2
1	2 3 0
2	3 1 0
3	0 2 1

Πίνακας 2.4: Λίστες προτίμησης ατόμων πριν την εκτέλεση του αλγορίθμου SR

στους υποψήφιους με την καλύτερη κατάταξη στις λίστες τους. Ο 0 κάνει πρόταση στον 1. Ο 1 είναι ελεύθερος και αποδέχεται την πρόταση του 0. Ο 1 κάνει πρόταση στον 2. Ο 2 είναι ελεύθερος και αποδέχεται την πρόταση του 1. Ο 2 κάνει πρόταση στον 3. Ο 3 είναι ελεύθερος και αποδέχεται την πρόταση του 2. Ο 3 κάνει πρόταση στον 0. Ο 0 είναι ελεύθερος και αποδέχεται την πρόταση του 3.

Στη συνέχεια, διαγράφονται από τις λίστες προτίμησης τα άτομα με χαμηλότερη κατάταξη από την καλύτερη πρόταση που έλαβε κάθε υποψήφιος. Οι καλύτερες προτάσεις φαίνονται στον Πίνακα 2.5 και οι λίστες προτίμησης των ατόμων μετά το τέλος της πρώτης φάσης στον Πίνακα 2.6

Άτομα	Προτάσεις
0	3
1	0
2	1
3	2

Πίνακας 2.5: Οι καλύτερες προτάσεις των ατόμων μετά το τέλος της πρώτης φάσης του αλγορίθμου SR

Άτομα	Λίστες προτίμησης
0	1 3
1	2 0
2	3 1
3	0 2

Πίνακας 2.6: Λίστες προτίμησης ατόμων μετά το τέλος της πρώτης φάσης του αλγορίθμου SR

Κατόπιν, καθώς κανένας δεν έχει άδεια λίστα προτίμησης, περνάμε στη δεύτερη φάση του αλγορίθμου. Μετά τη μείωση των κύκλων “all or nothing” οι λίστες προτίμησης είναι αυτές του Πίνακα 2.7. Αυτά είναι και τα ζεύγη που επιστρέφει ο αλγόριθμος. Επομένως, υπάρχει stable matching για αυτό το παράδειγμα. Πράγματι,

Άτομα	Λίστες προτίμησης
0	3
1	2
2	1
3	0

Πίνακας 2.7: Λίστες προτίμησης ατόμων μετά το τέλος της δεύτερης φάσης του αλγορίθμου SR

αν εξετάσουμε τα άτομα ένα-ένα θα δούμε πως δεν υπάρχει κανένα ζεύγος ατόμων που να μην έχουν τοποθετηθεί μαζί και να προτιμούν και τα δύο το ένα το άλλο, από τα ζεύγη που τους ανατέθηκαν από τον αλγόριθμο.

Κεφάλαιο 3

Κινητά Κοινωνικά Δίκτυα (Mobile Social Networks - MSNs)

Ο όρος **Κοινωνικά Δίκτυα** (Social Networks) προσδιορίζει σύνολα ή ομάδες ανθρώπων που εμφανίζουν μοτίβα επαφών ή αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους, διαμορφώνοντας μέσα από αυτές ουσιαστικές κοινωνικές σχέσεις [27]. Οι σχέσεις αυτές είναι ποικίλλες και μπορεί να αφορούν διάφορα σημεία της ανθρώπινης ζωής. Μερικά παραδείγματα είναι οι φυσικές επαφές μεταξύ των ατόμων, η ανταλλαγή ενδιαφερόντων ή ακόμα και οικονομικές αλληλεξαρτήσεις [28]. Τη ραγδαία εξέλιξη του διαδικτύου ακολούθησε η δημιουργία **Ηλεκτρονικών Κοινωνικών Δικτύων** (Online Social Networks - OSNs), αρχικά με τη μορφή forums και chat-rooms και στη συνέχεια με τη μορφή ιστοσελίδων και εφαρμογών (apps). Οι πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης, όπως το Facebook, έχουν προσελκύσει δισεκατομμύρια ενεργούς χρήστες. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν σε άτομα με κοινά ενδιαφέροντα να έρθουν σε επαφή και να σχηματίσουν εικονικές κοινότητες. Σήμερα, αυτά τα κοινωνικά δίκτυα γίνονται όλο και περισσότερο κινητά, δηλαδή, οι χρήστες συνδέονται σε αυτά χρησιμοποιώντας φορητές συσκευές. Διαμορφώθηκαν, έτσι, τα λεγόμενα **Κινητά Κοινωνικά Δίκτυα** (Mobile Social Networks - MSNs) [29].

Καθώς τα κινητά τηλέφωνα είναι πλέον πολύ πιο διαδεδομένα από τους σταθερούς υπολογιστές, τα Κινητά Κοινωνικά Δίκτυα είναι ιδανικά για εκμετάλλευση. Η εξέλιξη των OSNs σε MSNs αποτελεί προτεραιότητα αυτών των δικτύων και θεωρείται το κλειδί για την ανάπτυξή τους. Οι γνώσεις που αποκτήθηκαν από την παρατήρηση και την έρευνα των ανθρώπινων κοινωνικών δικτύων παρέχουν πολλά χρήσιμα εργαλεία στην προσπάθεια αποτελεσματικής αξιοποίησης των MSNs. Κατά συνέπεια, τα MSNs μπορούν να χαρακτηριστούν ως συστήματα κινητών επικοινωνιών επικεντρωμένα στον χρήστη (user-centric mobile communication systems), στα οποία η ικανότητα των χρηστών να ανταλλάσσουν δεδομένα ενισχύεται μέσω αλγορίθμων με κοινωνική επίγνωση [29]. Σε διάφορες μελέτες έχουν αναφερθεί αρκετά ενδιαφέρο-

να αποτελέσματα έρευνας και ανάπτυξης σχετικά με τα MSNs. Για παράδειγμα, τα δεδομένα που συλλέγονται από τα κινητά τηλέφωνα μέσω μηχανών εξόρυξης δεδομένων (data mining) ή αναγνώρισης προτύπων (pattern recognition) μπορούν να αξιοποιηθούν για την επαύξηση της λειτουργικότητας των MSNs [30].

3.1 Αρχιτεκτονικές MSNs

Σε αυτήν την υποενότητα θα παρουσιάσουμε τις κύριες υπάρχουσες αρχιτεκτονικές συστημάτων MSNs [29].

3.1.1 Κεντρική (Centralised) Αρχιτεκτονική

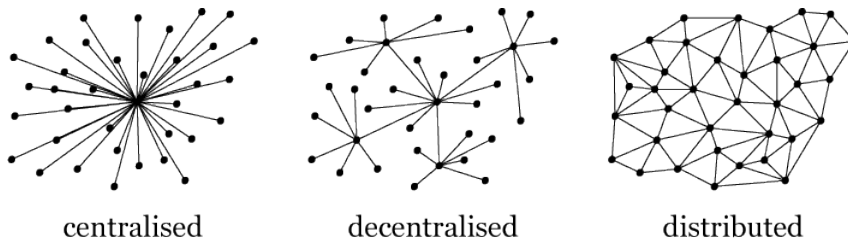
Αυτή είναι η αρχιτεκτονική πελάτη-εξυπηρετητή (client-server), η οποία είναι η συνηθέστερη για την ανάπτυξη ενός MSN. Τα centralised MSNs αποτελούν κατά βάση επέκταση των διαδικτυακών προκατόχων τους. Όλες οι πληροφορίες σχετικά με τα μέλη του κοινωνικού δικτύου διατηρούνται σε απομακρυσμένους διακομιστές που ανήκουν σε έναν πάροχο υπηρεσιών. Οι κόμβοι χρησιμοποιούν την υπάρχουσα ασύρματη υποδομή ενός κυψελοειδούς δικτύου (πχ. WiFi) για να αποκτήσουν πρόσβαση στους απομακρυσμένους παρόχους υπηρεσιών, προκειμένου να επικοινωνήσουν μεταξύ τους ή να ενημερώσουν τις προσωπικές τους πληροφορίες. Με τη χρήση ειδικών εφαρμογών ή απλώς με τη χρήση ενός προγράμματος περιήγησης για κινητά τηλέφωνα, οι χρήστες μπορούν να συνδεθούν στο εκάστοτε MSN.

Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι πως χρησιμοποιεί ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις και μπορεί να γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ της φυσικής θέσης του χρήστη και της παγκόσμιας κοινότητας. Όσο αφορά τα μειονεκτήματα της, λόγω της πληθώρας πληροφοριών που κυκλοφορούν στο δίκτυο μπορεί εύκολα να προκληθεί συμφόρηση στους κεντρικούς κόμβους του συστήματος. Επιπλέον, τεράστιος όγκος προσωπικών δεδομένων είναι αποθηκευμένος σε λίγες φυσικές τοποθεσίες, καθιστώντας τα ευάλωτα.

3.1.2 Κατανεμημένη (Distributed) Αρχιτεκτονική

Το βασικό χαρακτηριστικό των κατανεμημένων MSN είναι η πλήρης απουσία κεντρικών διακομιστών. Οι κινητοί κόμβοι-χρήστες είναι σε θέση να επικοινωνούν και να έχουν πρόσβαση σε πληροφορίες μόνο μέσω της σύνδεσης με άλλους χρήστες. Ως εκ τούτου, οι ίδιες οι συσκευές του δικτύου πρέπει να αποθηκεύουν και να δρομολογούν τα δεδομένα στον σωστό προορισμό. Τα κινητά τηλέφωνα στις μέρες μας είναι εξοπλισμένα με πολλές ασύρματες διεπαφές, όπως το Bluetooth και το WiFi, παρέχοντάς τους τη δυνατότητα σύνδεσης με τρόπο ad-hoc. Ωστόσο, αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα ότι δεν απαιτείται υποδομή. Σε κάποιες περιπτώσεις, τα υπάρχοντα κυψελοειδή δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή διασύνδεσης μεταξύ δύο κόμβων.

Παρόλο που τα καταναμεμημένα MSN παρέχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως χαμηλό κόστος ανάπτυξης και συντήρησης, έχουν και αρκετές αδυναμίες. Κάποιες από αυτές είναι οι εξής: μεγάλη καθυστέρηση, χαμηλός ρυθμός παράδοσης σε σύγκριση με την κεντρική αρχιτεκτονική, καθώς και ανησυχίες για την προστασία της ιδιωτικότητας.



Σχήμα 3.1: Διαφορετικές αρχιτεκτονικές συστημάτων [31]

3.1.3 Υβριδική (Hybrid) Αρχιτεκτονική

Τα υβριδικά MSN αποτελούν συνένωση των δύο κύριων αρχιτεκτονικών που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Δημιουργούνται από ένα συνδυασμό και των δύο, υπό την έννοια ότι παρά την ύπαρξη κεντρικών εξυπηρετητών που περιέχουν όλες τις πληροφορίες του δικτύου, είναι δυνατή και η άμεση ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των κόμβων. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της υβριδικής αρχιτεκτονικής είναι ότι μπορεί να δημιουργηθεί πολύ εύκολα με την επέκταση σχεδόν κάθε υπάρχοντος κεντρικού ή καταναμεμημένου MSN. Ωστόσο, προκύπτουν και πάλι ανησυχίες για την προστασία των προσωπικών δεδομένων των χρηστών του δικτύου.

3.2 Κινητικότητα Χρηστών

Η απόδοση ενός MSN εξαρτάται σημαντικά από την κινητικότητα των χρηστών του. Πριν το MSN εξυπηρετήσει τους τελικούς χρήστες, αξιολογείται η απόδοσή του. Η ανάπτυξη ενός πραγματικού δικτύου για αυτό το σκοπό δεν συνιστάται, καθώς συνεπάγεται τεράστιο κόστος. Αντίθετα, η προσομοίωση και η θεωρητική ανάλυση με χρήση μοντέλων κίνησης υιοθετείται ευρέως. Για να προκύψουν ουσιαστικά αποτελέσματα, το μοντέλο πρέπει να μπορεί να αναπαράγει βασικά μοτίβα ανθρώπινης κινητικότητας [30].

3.2.1 Μοντέλα Κίνησης Χρηστών

Η πιο κοινή προσέγγιση μοντελοποίησης της κίνησης των χρηστών είναι με τυχαίους περιπάτους (random walks) και τυχαία σημεία διαδρομής (random waypoints). Παρόλα αυτά, συχνά αυτά τα μοντέλα επικρίνονται για το ότι δεν αποτυπώνουν ρεαλιστικά την ανθρώπινη κίνηση, καθώς οι άνθρωποι κινούνται ακολουθώντας άλλου

είδους μοτίβα που σχετίζονται με τις καθημερινές τους δραστηριότητες, όπως η εργασία ή το σχολείο. Αυτή, λοιπόν, η μέθοδος είναι η απλούστερη, έχει όμως χαμηλή ακρίβεια [32].

Είναι φυσικό να υποθέσουμε ότι δύο άτομα που έχουν μια κοινωνική αλληλεπίδραση, όπως φίλοι, συγγενείς ή συνάδελφοι, δεν κινούνται πάντα ανεξάρτητα. Περιστασιακά, μοιράζονται αφετηρίες, προορισμούς ή και ολόκληρες διαδρομές. Οι διαδρομές μπορούν επίσης να συγχρονιστούν εάν ο στόχος είναι να συναντηθούν κάπου ή να επιστρέψουν στο σπίτι τους μετά από μια συνάντηση [33]. Άλλα μοντέλα κίνησης, λοιπόν, βασίζονται στις κοινωνικές σχέσεις των ανθρώπων, παρουσιάζοντας καλύτερη απόδοση. Υπάρχουν, επιπλέον, μοντέλα τα οποία βασίζονται σε στατιστικά, πραγματικά χαρακτηριστικά των χρηστών του δικτύου. Αυτά, είναι επίσης μεγάλης ακρίβειας, όμως χαρακτηρίζονται από υψηλή κατανάλωση πόρων [32].

3.2.2 Πρόβλεψη Κινητικότητας

Μια διαδικασία πρόβλεψης της κινητικότητας του χρήστη αποτελείται από τα τέσσερα ακόλουθα βήματα:

1. εντοπισμός της θέσης του χρήστη
2. καταγραφή διαδρομής
3. εξαγωγή σημείων ενδιαφέροντος
4. πρόβλεψη επόμενης τοποθεσίας

Μια διαδεδομένη μέθοδος στην πρόβλεψη κινητικότητας είναι η χρήση αλγορίθμων που βασίζονται σε μοντέλα Markov, προβλέποντας την επόμενη τοποθεσία ενός χρήστη με βάση τις προηγούμενες τοποθεσίες που επισκέφθηκε. Υπάρχουν επίσης αρκετές μελέτες που προβλέπουν την ανθρώπινη κινητικότητα χρησιμοποιώντας αντιστοίχιση προτύπων (pattern matching). Σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρείται και καταγράφεται το ιστορικό κίνησης του χρήστη και εξάγονται μοτίβα από αυτό. Με την αντιστοίχιση της τρέχουσας κινητικότητας με τα μοτίβα, προβλέπεται η μελλοντική θέση του χρήστη [30].

3.3 Κοινωνικά Χαρακτηριστικά

Ένα εργαλείο απαραίτητο για τη μελέτη των κοινωνικών δικτύων είναι η θεωρία γράφων. Οι ερευνητές χρησιμοποιούν τη θεωρία γράφων για το χειρισμό των δικτύων αυτών και την πρόβλεψη μελλοντικών επαφών μεταξύ των χρηστών τους. Τα προβλήματα που διατυπώνονται, βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στις ιδιότητες των κοινωνικών γράφων. Εισάγονται, λοιπόν, στο κοινωνικό δίκτυο έννοιες όπως οι *κοινωνικές σχέσεις*, οι *γείτονες* και οι *κοινότητες*. Ακολουθεί μια ευσύνοπτη παρουσίαση των σημαντικότερων κοινωνικών ιδιοτήτων και μετρικών που εξετάζονται στα MSNs,

σύμφωνα με το [29]. Οι ιδιότητες αυτές θεωρείται πως επηρεάζουν τα μοτίβα επικοινωνίας των κόμβων με θετικό ή αρνητικό τρόπο.

- **Κοινωνικές Σχέσεις (Social Ties)**: χαρακτηρίζονται από ένα συνδυασμό της συχνότητας και του χρόνου επικοινωνίας, της οικειότητας, του χρονικού διαστήματος που έχει περάσει από την πιο πρόσφατη επικοινωνία και της κοινωνικής ομοιογένειας των χρηστών.
- **Γείτονες στον κοινωνικό γράφο (social neighbours)**: το σύνολο των κόμβων με τους οποίους ένας χρήστης διατηρεί κοινωνικές σχέσεις.
- **Κοινότητες (Communities)**: ένα σύνολο κόμβων, στενά συνδεδεμένων στον κοινωνικό γράφο, είτε μεταξύ τους ή μέσω της σύνδεσής τους σε κάποιους κόμβους “μεσάζοντες”.
- **Συντελεστής Ομαδοποίησης (Clustering Coefficient)**: η έκταση στην οποία οι κορυφές που γειτνιάζουν με μια κορυφή είναι και γειτονικές μεταξύ τους.
- **Κεντρικότητες (Centralities)**: μέτρα της σχετικής σπουδαιότητας μιας κορυφής εντός ενός γράφου.
- **Εγωισμός (Selfishness)**: ενέργειες που αποσκοπούν στη μεγιστοποίηση του προσωπικού κέρδους, έναντι του κοινού οφέλους.

Κεφάλαιο 4

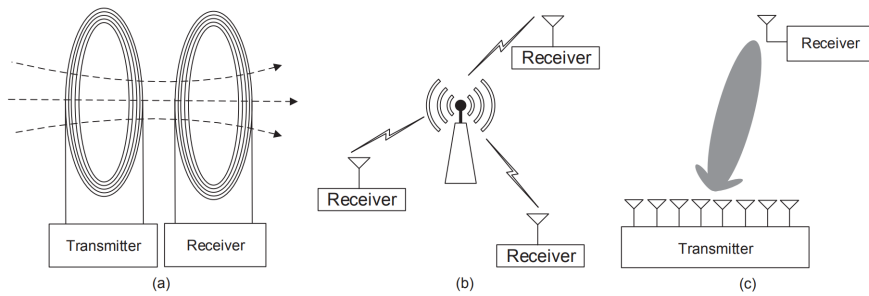
Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας (Wireless Power Transfer - WPT)

Όπως αναφέραμε στο εισαγωγικό κεφάλαιο της εργασίας, η Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας αφορά την μετάδοση ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Στο παρόν κεφάλαιο αναφέρονται συνοπτικά οι υπάρχουσες τεχνολογίες WPT και παρέχεται μια επισκόπηση των τρεχουσών ερευνητικών προσεγγίσεων και του σχεδιασμού νέων αλγορίθμων για τον διαμοιρασμό ενέργειας μέσω WPT.

4.1 Τεχνολογίες WPT

Με βάση την απόσταση λειτουργίας, οι τεχνολογίες WPT μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: την WPT κοντινού πεδίου (near field - non radiative WPT) και την WPT μακρινού πεδίου (far field - radiative WPT). Σε αυτήν την ενότητα παρατίθενται με ευσύνοπτο τρόπο οι πιο κοινές χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες WPT, η βασική σκοπιμότητα και ο τρόπος λειτουργίας τους [34].

Η near field WPT χρησιμοποιεί δύο ευθυγραμμισμένα πηνία και επαγωγική σύζευξη (inductive coupling) μεταξύ των πηνίων για τη μεταφορά ενέργειας σε πολύ μικρές αποστάσεις (δεκάδες χιλιοστά). Για την WPT κοντινού πεδίου, πέρα από την επαγωγική σύζευξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύζευξη μαγνητικού συντονισμού (magnetic resonance coupling) ή χωρητική σύζευξη (capacitive coupling) [35]. Σήμερα, πολλά ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης όπως τα τηλέφωνα και οι ηλεκτρικές οδοντόβουρτσες υιοθετούν την ασύρματη φόρτιση με τη χρήση ενός charging pad. Από τότε που η Apple Inc. ανακοίνωσε ότι τα προϊόντα της μπορούν να φορτίζονται ασύρματα με τη χρήση της τεχνολογίας Qi, η ασύρματη φόρτιση έχει αποκτήσει τεράστια δημοτικότητα. Η v1.2 έκδοση της τεχνολογίας Qi επέτρεπε μεταφορά ισχύος 5W έως 15W σε απόσταση 5mm, χρησιμοποιώντας συχνότητα 140kHz. Άλλες εφαρμογές ασύρματης φόρτισης με near-field WPT περιλαμβάνουν την τροφοδοσία wearables,



Σχήμα 4.1: Διαφορετικοί τύποι WPT συστημάτων: a) με πηνία, b) με πανκατευθυντικό πομπό, c) με διάταξη κεραιών [34]

εμφυτευμάτων, περιφερειακών συσκευών και tablets. Η WPT κοντινού πεδίου μπορεί, επίσης, να εφαρμοστεί για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) και υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων (PHEVs).

Στην WPT μακρινού πεδίου χρησιμοποιείται κυρίως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ραδιοσυχνοτήτων (RF) για τη μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Οι μεγαλύτερες αποστάσεις λειτουργίας καθιστούν την WPT μακρινού πεδίου πιο ευέλικτη και ιδιαίτερα κατάλληλη για multi-casting, επιτρέποντας στον πομπό/δέκτη να μετακινείται. Ως εκ τούτου, η far-field WPT έχει πολυάριθμες εφαρμογές στη φόρτιση συσκευών χαμηλής ισχύος, όπως ετικέτες RFID και αισθητήρες IoT, αλλά και εφαρμογές για φόρτιση συσκευών υψηλής ισχύος, όπως η τροφοδοσία μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAVs). Ωστόσο, η μεγάλη απόσταση επιφέρει τεράστιες απώλειες διαδρομής, με αποτέλεσμα την κακή απόδοση της μετάδοσης. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πρέπει να συγκεντρωθεί σε κατεύθυνση προς τον δέκτη με τη χρήση μιας κατευθυντικής κεραιάς ή μιας διάταξης κεραιών για την διαμόρφωση δέσμης ενέργειας (beamforming), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1c. Μια εναλλακτική λύση για τη συγκέντρωση της ενέργειας προς WPT μακρινού πεδίου είναι η χρήση ακτίνων λέιζερ.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, δεν θα αναφερθούμε σε συγκεκριμένη τεχνολογία WPT, παρά μόνο διευκρινίζουμε πως αναπτύσσουμε μεθοδολογία WPT που βασίζεται στην Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας κοντινού πεδίου.

4.2 Τρέχουσες ερευνητικές προσεγγίσεις

Η φόρτιση των συσκευών που λειτουργούν με μπαταρίες έχει αποκτήσει μια διαφορετική προοπτική με τις πρόσφατες καινοτόμες ανακαλύψεις στους τομείς της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας και των επαναφορτιζόμενων μπαταριών λιθίου. Χάρη στις ακαδημαϊκές και βιομηχανικές προσπάθειες, η ασύρματη φόρτιση έχει υιοθετηθεί για την αναπλήρωση ενέργειας διαφόρων κινητών κόμβων, συμπεριλαμβανομένων όχι μόνο συσκευών χαμηλής ισχύος, αλλά και συσκευών που λειτουργούν με μπαταρίες μέτριας και υψηλής χωρητικότητας, όπως smartphones, tablets και αυτοκίνητα. Α-

νάλογα με τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται ο διαμοιρασμός ενέργειας σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή, προκύπτουν διαφορετικές σχεδιαστικές προκλήσεις. Στην παρούσα ενότητα, γίνεται μια ανασκόπηση των ερευνητικών κατευθύνσεων του διαμοιρασμού ενέργειας μέσω WPT και παρουσιάζονται διάφορες σχεδιαστικές τεχνικές υλοποίησης συστημάτων WPT, σε διαφορετικούς τύπους δικτύων [36].

4.2.1 Κινητά Κοινωνικά Δίκτυα (Mobile Social Networks - MSN)

Μία κατηγορία δικτύων με κινητούς κόμβους, στην οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί WPT για την αναπλήρωση της μπαταρίας των συσκευών της, είναι τα Κινητά Κοινωνικά Δίκτυα, τα οποία αναλύσαμε στο προηγούμενο ομότιτλο κεφάλαιο. Το μοναδικό χαρακτηριστικό αυτών των δικτύων είναι πως η κινητικότητα των κόμβων δεν απαιτεί κατανάλωση ενέργειας από τις μπαταρίες τους, αφού προκύπτει από τους ανθρώπους που τα μεταφέρουν. Οι χρήστες αυτών των δικτύων έχουν τη δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ τους μέσω των συσκευών τους και αλληλεπιδρούν με βάση τις κοινωνικές σχέσεις που έχουν αναπτύξει. Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει ένας αυξανόμενος αριθμός μελετών που αξιοποιεί τον διαμοιρασμό ενέργειας μεταξύ ομοτίμων (peer-to-peer energy sharing) σε Κινητά Κοινωνικά Δίκτυα. Σε αυτήν την υποενότητα, θα κάνουμε μια ενδελεχή παρουσίαση των τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί προς αυτήν την κατεύθυνση, καθώς αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Όταν αναφερόμαστε σε peer-to-peer διαμοιρασμό ενέργειας σε ένα Mobile Social Network, κατά βάση εννοούμε πως οι χρήστες με υψηλή ενέργεια στις συσκευές τους μπορούν να μεταφέρουν ενέργεια σε συσκευές με λιγότερη ενέργεια, θεωρώντας ότι θα φορτίσουν με τη σειρά τους όταν το έχουν ανάγκη. Αυτό προσφέρει ευελιξία στους χρήστες, καθώς κάθε συσκευή του δικτύου αποτελεί μια εν δυνάμει πηγή ενέργειας. Επιπλέον, ενδεχομένως να μετριαστεί ο κίνδυνος οι χρήστες να αντιμετωπίσουν μια κατάσταση έκτακτης ανάγκης με εξαντλημένη μπαταρία. Στις ακόλουθες υποενότητες αναφέρουμε διάφορα συστήματα που έχουν αναπτυχθεί εξετάζοντάς τα με βάση το στόχο που προσπαθούν να επιτύχουν.

4.2.1.1 Βελτιστοποίηση της χρήσης της ενέργειας

Οι μελέτες αυτής της κατηγορίας αποσκοπούν στην αξιοποίηση της ομορτουριστικής συμπεριφοράς των χρηστών σε ένα MSN. Στόχος τους είναι η βελτιστοποίηση της χρήσης της ενέργειας στους κόμβους. Ορισμένες μελέτες στοχεύουν στην κάλυψη ενός μέρους των ενεργειακών αναγκών των χρηστών του MSN από την WPT, ενώ άλλες στη διατήρηση της λειτουργικότητας των συσκευών για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Αναφέρουμε, ακολούθως, μερικές από τις πιο επιδραστικές.

Στα [37], [38] χρησιμοποιούνται Μαρκοβιανά μοντέλα αποφάσεων για την διατύπωση βέλτιστης στρατηγικής διαμοιρασμού ενέργειας, που ελαχιστοποιεί την πιθανότητα

εξάντλησης των πόρων του δικτύου. Οι χρήστες κατατάσσονται με βάση τα πιθανά αμοιβαία οφέλη μεταξύ τους όσον αφορά την διαμοιραζόμενη ενέργεια και τα καλύτερα ζεύγη κόμβων εντοπίζονται με τη χρήση της θεωρίας και των αλγορίθμων *stable matching*. Παρόμοια με το [38], στο [6] οι κόμβοι αντιστοιχίζονται σε ζεύγη WPT, που ανταλλάσσουν ενέργεια μόνο μεταξύ τους, όμως αναλύονται επιπλέον μοτίβα φόρτισης και κοινωνικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των χρηστών των δικτύων. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι οι χρήστες καταφέρνουν να καθυστερήσουν τη φόρτιση των συσκευών τους, εξασφαλίζοντας ένα ποσοστό των αναγκών τους από την WPT. Στα [8], [39], εντοπίζονται, χρησιμοποιώντας δυναμικό προγραμματισμό, τα βέλτιστα μοτίβα διαμοιρασμού και παράλειψης διαμοιρασμού ενέργειας. Δηλαδή, μοτίβα που καταδεικνύουν τότε ο χρήστης είναι καλύτερο να παραλείψει κάποια WPT για να εξοικονομήσει ενέργεια.

4.2.1.2 Εξισορρόπηση της ενέργειας του δικτύου

Στόχο των μελετών που θα εξετάσουμε στην παρούσα υποενότητα αποτελεί η κατανομή της ενέργειας που υπάρχει στο δίκτυο με έναν επιθυμητό (δίκαιο) τρόπο. Ως ένας δίκαιος τρόπος διαμοιρασμού ενέργειας μπορεί να θεωρηθεί η τελική κατανομή ενέργειας να καταλήγει συγκεντρωμένη γύρω από μία τιμή, δηλαδή, όλοι οι χρήστες να καταλήγουν με το ίδιο επίπεδο ενέργειας ή με επίπεδο ενέργειας ανάλογο του βάρους τους (της αξίας τους για το δίκτυο) [40]–[43]. Στα συστήματα με αυτό το σκοπό μεταφέρεται σε κάθε ανταλλαγή WPT ένα ορισμένο ποσό ενέργειας (πχ. η μισή διαθέσιμη ενέργεια του κόμβου ή μια μικρή ποσότητα ενέργειας). Όταν ο μέσος όρος της διαθέσιμης ενέργειας στο δίκτυο είναι γνωστός, εξετάζονται πιο αποδοτικοί κανόνες διαμοιρασμού, όπως ο διαμοιρασμός μεταξύ κόμβων που βρίσκονται στις αντίθετες πλευρές του μέσου όρου, για να επιταχυνθεί η σύγκλιση στο μέσο επίπεδο ενέργειας. Για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων, έχουν προταθεί και συστήματα με κατανομημένη αρχιτεκτονική [40], [41], [43]. Υπάρχουν, επίσης, αντίστοιχα τέτοια πρωτόκολλα για συστήματα με βάρη στους κόμβους (δηλαδή, συστήματα στα οποία κάποιοι κόμβοι κρίνονται ως πιο σημαντικοί και άλλοι ως λιγότερο σημαντικοί για τη λειτουργία του δικτύου).

Στην μελέτη [44] εξετάστηκαν δίκτυα με ετερογενείς σχέσεις κόμβων και έγινε χρήση Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (MILP) για τον υπολογισμό του βέλτιστου δυνατού ενεργειακού ισοζυγίου. Στο [45] προτείνεται η αξιοποίηση κοινωνικών πληροφοριών από το διαδίκτυο για τους χρήστες του δικτύου. Στο [46], μάλιστα, κατασκευάζεται ένα στοχαστικό μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει πρόβλεψη κινητικότητας και ενσωμάτωση κοινωνικών πληροφοριών των χρηστών για τη βελτιστοποίηση της εξισορρόπησης της ενέργειας του δικτύου. Όσο εξελίσσεται η έρευνα σε αυτό το επιστημονικό πεδίο, αναπτύσσονται όλο και πιο αποτελεσματικοί αλγόριθμοι εξισορρόπησης ενέργειας, λαμβάνοντας υπ' όψιν πληθώρα παραμέτρων.

4.2.2 Σύντομη αναφορά σε άλλους τύπους δικτύων

Σε αυτή την υποενότητα θα αναφερθούμε σε άλλους τύπους δικτύων, που μπορούν χρησιμοποιήσουν WPT για να επωφεληθούν, καθώς και στα βασικότερα προβλήματα υπό μελέτη για καθένα από αυτά τα δίκτυα [36].

4.2.2.1 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks)

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων περιλαμβάνουν πολλούς αισθητήρες οι οποίοι μπορούν σε κάποιες περιπτώσεις να επικοινωνούν και χρησιμοποιούνται συνήθως για την παρακολούθηση και καταγραφή κάποιου φαινομένου (πχ. παρακολούθηση της άγριας ζωής). Είναι προφανές πως η φόρτιση τέτοιων αισθητήρων με τρόπο διαφορετικό από την WPT μπορεί να είναι χρονοβόρα ή επικίνδυνη, καθώς οι αισθητήρες ενδέχεται να βρίσκονται σε δύσβατες περιοχές και είναι πιθανό να διαταράξει το υπό παρακολούθηση περιβάλλον, καθιστώντας την παρατήρησή του πιο δύσκολη. Αναφέρουμε συνοπτικά τις κύριες κατηγορίες συστημάτων WPT που έχουν μελετηθεί σε έρευνες για τέτοια δίκτυα.

Για την αναπλήρωση της ενέργειας των κόμβων αισθητήρων, ένα ή περισσότερα κινητά οχήματα φόρτισης επισκέπτονται τους αισθητήρες περιοδικά, φορτίζοντάς τους ώστε να τους διατηρούν λειτουργικούς. Οι αισθητήρες μπορεί να θεωρηθούν στατικοί και τα οχήματα φόρτισης κινητά. Επίσης, υπάρχουν συστήματα στα οποία τόσο οι αισθητήρες, όσο και οι φορτιστές τους θεωρούνται στατικοί. Υπάρχουν και έρευνες, όμως, που θεωρούν τους φορτιστές στατικούς και τους αισθητήρες κινητούς. Ένας άλλος τρόπος κατηγοριοποίησης βασίζεται στον αριθμό των φορτιστών που χρησιμοποιούνται. Με έναν μόνο φορτιστή, τις περισσότερες φορές το πρόβλημα επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση της διαδρομής για αποδοτικότερη φόρτιση, ενώ με πολλαπλούς φορτιστές ο συντονισμός μεταξύ τους λαμβάνεται επίσης υπ' όψιν.

4.2.2.2 Δίκτυα Ηλεκτρικών Οχημάτων (EVs)

Τα ηλεκτρικά οχήματα (EVs) έχουν λάβει όλο και μεγαλύτερη προσοχή την τελευταία δεκαετία λόγω της δυνατότητάς τους να παρέχουν ένα πιο βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον σύστημα μεταφορών. Νέα μοντέλα ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων παρουσιάζονται συνεχώς και είναι πια σαφές πως αποτελούν το μέλλον της κίνησης. Εξακολουθούν, όμως, να υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την ευρεία υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων από τους καταναλωτές. Αυτές περιλαμβάνουν: τη μικρή χωρική εμβέλεια οδήγησης με μία φόρτιση, τη μεγάλη διάρκεια φόρτισης και συχνά την έλλειψη σταθμών φόρτισης.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων μέσω WPT, όπως αναφέρονται στο [47] είναι τα εξής:

- Αυτόνομη λειτουργία. Η φόρτιση/εκφόρτιση μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς την παρέμβαση του οδηγού.

- Ασφαλέστερη φόρτιση. Καθώς ο οδηγός δεν απαιτείται να χρησιμοποιήσει ηλεκτρικό αγωγό, δεν υπάρχει κίνδυνος επαφής με ηλεκτρικό ρεύμα υψηλής τάσης. Επιπλέον, αυτός ο τρόπος φόρτισης είναι ασφαλής σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, όπως το χιόνι ή η βροχή.
- Δυναμική φόρτιση. Η WPT διευρύνει τις καταστάσεις στις οποίες μπορεί να φορτιστεί το EV, ώστε να μπορεί να φορτιστεί εν κινήσει ή σταθμευμένο για σύντομο χρονικό διάστημα.

Τέλος, τα κυριότερα μοντέλα για WPT σε EVs είναι:

- Η στατική (static) WPT: το όχημα είναι ακίνητο και ο κινητήρας δεν λειτουργεί.
- Η στάσιμη (stationary) WPT: το όχημα είναι ακίνητο, αλλά, ο κινητήρας λειτουργεί.
- Η δυναμική (dynamic) WPT: το όχημα βρίσκεται σε κίνηση.

Κεφάλαιο 5

Περιγραφή του Συστήματος Δίκαιου Διαμοιρασμού Ενέργειας σε Κινητά Κοινωνικά Δίκτυα

5.1 Περιγραφή του προβλήματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάμε το πρόβλημα του σχεδιασμού τεχνικών δίκαιης κατανομής ενέργειας με ασύρματη μεταφορά σε ομότιμα δίκτυα κινητών ετερογενών συσκευών, λαμβάνοντας υπόψιν την κινητικότητα των χρηστών και κοινωνικά χαρακτηριστικά τους. Στο σύστημα, συμπεριλαμβάνουμε τις απώλειες που οφείλονται τόσο στην εξασθένιση κατά τη μεταφορά ενέργειας, όσο και στην κατανάλωση της μπαταρίας από κάθε χρήστη. Προσεγγίζουμε το πρόβλημα τοποθετώντας τους χρήστες των φορητών συσκευών σε ζεύγη με στόχο το δίκτυο να αποκομίσει μέγιστο όφελος, υπό την έννοια της δίκαιης κατανομής ενέργειας και της επέκτασης του χρόνου ζωής του, με κάθε ευκαιρία ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Χρήστες με υψηλότερη ενεργειακή στάθμη στις συσκευές τους μεταφέρουν ενέργεια στους ομότιμους τους με χαμηλό επίπεδο ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, οι συσκευές με χαμηλή ενεργειακή στάθμη καταφέρνουν να παραμείνουν λειτουργικές για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Επιπλέον, αυτό θα οδηγήσει στην καθυστέρηση της ανάγκης φόρτισης των κινητών συσκευών τους, χωρίς να αλλάξουν τις συνήθειες κατανάλωσης και φόρτισης που έχουν αναπτύξει.

Αρχικά, παρουσιάζουμε τη θεωρητική μοντελοποίηση ενός συστήματος στο οποίο οι χρήστες ενός κινητού κοινωνικού δικτύου κινούνται σε πεπερασμένο χώρο και τους οποίους επιχειρούμε να αντιστοιχίσουμε σε ζεύγη με ομότιμους τους σε κοντινή απόσταση. Η μετακίνηση των χρηστών αποτυπώνεται χρησιμοποιώντας τυχαίους περιπάτους σε γράφο, οι κορυφές του οποίου αποτελούν τις τοποθεσίες τις οποίες επισκέπτονται οι χρήστες. Η πιθανότητα μετάβασης κάθε χρήστη από ένα μέρος σε

ένα άλλο εξαρτάται από το πόσο ταιριάζει η κάθε τοποθεσία στα ενδιαφέροντά του, αλλά και από την απόσταση που έχει κάθε τοποθεσία από αυτήν στην οποία βρισκόταν την προηγούμενη χρονική στιγμή. Κατόπιν, υπολογίζουμε τη σταθερότητα των συνδέσεων (link stability), αξιοποιώντας την έννοια της εντροπίας ως το μέτρο της αβεβαιότητας συνάντησης δύο χρηστών και το ενεργειακό κέρδος που δύναται να αποκομίσει ο καθένας ανταλλάσσοντας ενέργεια. Αυτά, μαζί με ένα μέτρο εμπιστοσύνης μεταξύ των χρηστών, ενδεικτικό της προθυμίας τους να συμμετέχουν σε κάθε ανταλλαγή, αποτελούν τα κριτήρια για το αν θα πραγματοποιηθεί εν τέλει η WPT. Βάσει αυτών των παραγόντων, κάθε χρήστης του δικτύου κατατάσσει τους υπόλοιπους με μια σειρά προτίμησης, τοποθετώντας πρώτο αυτόν τον οποίο θεωρεί βέλτιστο ταιρί για WPT, δεύτερο τον χρήστη που θεωρεί δεύτερο καλύτερο υποψήφιο κ.ο.κ.. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος σταθερής αντιστοίχισης που έχουμε επιλέξει (ο αλγόριθμος που επιλύει το Πρόβλημα των Συγκατοίκων, Stable Roommates Algorithm), τοποθετεί τους χρήστες σε ζεύγη, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις προτιμήσεις τους και προσπαθώντας να εξασφαλίσει την ικανοποίηση όλων των χρηστών.

Ο στόχος του συστήματος που προτείνεται είναι να αυξηθεί το υπόλοιπο της μπαταρίας των συσκευών με την ελάχιστη ενεργειακή στάθμη, καθιστώντας τις λειτουργικές για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια, αν είναι δυνατόν, να αυξηθεί το δεύτερο μικρότερο επίπεδο μπαταρίας στο δίκτυο, κ.ο.κ. [48]. Βεβαίως, το υπόλοιπο της μπαταρίας των συσκευών μειώνεται και ανεξαρτήτως των ανταλλαγών, οπότε αυτό μπορεί να μην είναι πάντα εφικτό. Επιπλέον, διαιρούμε το πρόβλημα σε μικρά χρονικά διαστήματα και εξετάζουμε κάθε ένα ξεχωριστά, κάτι που οδηγεί στη συχνή εναλλαγή των ζευγών ανταλλαγής ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, εκμεταλλευόμαστε τις μετακινήσεις των χρηστών, ώστε ο διαμοιρασμός της ενέργειας να επεκταθεί σε όλο το δίκτυο, οδηγώντας σε μια δίκαιη κατανομή της. Τέλος, η εισαγωγή της ετερογένειας των συσκευών ως προς το ρυθμό κατανάλωσης της μπαταρίας και την απόδοσή τους κατά τη μεταφορά ενέργειας καθώς και η συμπερίληψη ατομικών ενδιαφερόντων και κοινωνικών χαρακτηριστικών, στοχεύουν σε μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση του προβλήματος, τόσο από τεχνικής απόψεως, όσο και από κοινωνικής.

5.2 Μοντέλο Συσκευής

Θεωρούμε ένα σύνολο m χρηστών, καθένας εκ των οποίων μεταφέρει μία φορητή συσκευή, τροφοδοτούμενη από μπαταρία (κινητό τηλέφωνο). Κάθε συσκευή διαθέτει κατάλληλο πομπό και δέκτη για ασύρματη μεταφορά ενέργειας (WPT). Στο παρόν μοντέλο, μια συσκευή χαρακτηρίζεται από: την χωρητικότητα της μπαταρίας της C , έναν σταθερό ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας a και την απόδοση κατά τη μεταφορά ενέργειας β .

Ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας εισάγεται στο μοντέλο για μεγαλύτερο βαθμό ρεαλισμού, καθώς θεωρούμε ότι οι συσκευές πέραν της ασύρματης ανταλλαγής ενέργειας επιτελούν και άλλες λειτουργίες (χρήση εφαρμογών, σύνδεση σε δίκτυο Wi-Fi κλπ). Η επιλογή ο ρυθμός αυτός να είναι σταθερός αποσκοπεί στη μεγαλύτερη δυνα-

τή απλούστευση του μοντέλου στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Διαφορετικά, θα χρειαζόταν είτε πρόβλεψη της κατανάλωσης κάθε χρήστη μέσα από εντοπισμό μοτίβων κατανάλωσης, είτε συνεχής ενημέρωση για τα επίπεδα ενέργειας [49].

Θεωρούμε ότι στο σύστημα ασύρματης ανταλλαγής ενέργειας που περιγράφεται υπάρχουν απώλειες, λόγω εξασθένησης του σήματος κατά την WPT. Επομένως, μόνο ένα μέρος της ενέργειας που εκπέμπεται καταλήγει να φορτίσει την μπαταρία του δέκτη. Η απόδοση $\beta \in (0, 1)$ είναι μια σταθερά που χαρακτηρίζει τον πομπό κατά την WPT και εκφράζει το ποσοστό της εκπεμπόμενης ενέργειας που θα καταλήξει στον δέκτη.

5.3 Ετερογένεια

Στην παρούσα εργασία μελετάμε την ασύρματη μεταφορά ενέργειας σε ετερογενή δίκτυα κινητών συσκευών. Ερμηνεύουμε την ετερογένεια ως ύπαρξη διαφορετικών τύπων συσκευών (C, α, β) . Αρχικά, θεωρούμε σκόπιμο να υπάρχει στο σύστημα μία τιμή χωρητικότητας της μπαταρίας C , καθώς οι συσκευές ίδιας γενιάς έχουν μικρές διαφορές στην μπαταρία [4], [5]. Όπως θα δούμε, άλλωστε, εργαζόμαστε με τα ποσοστά επί της χωρητικότητας της μπαταρίας, επομένως η τιμή του C αυτή καθεαυτή δε μας απασχολεί. Αναφορικά με την απόδοση β κατά την WPT, θεωρούμε ότι είναι ένα γνώρισμα του υλικού της συσκευής (hardware). Ο ρυθμός κατανάλωσης α , από την άλλη, θεωρείται συνδυασμός των εγγενών χαρακτηριστικών της συσκευής και της χρήσης που της γίνεται.

Συμπερασματικά, η τούπλα (C, α, β) αντιστοιχεί σε ένα μοντέλο κινητού τηλεφώνου με ορισμένο υλικό και ορισμένη χρήση (συνήθειες κατανάλωσης και φόρτισης). Εισάγουμε στο μοντέλο m συσκευές (όσες και χρήστες) με μ διαφορετικούς ρυθμούς κατανάλωσης και λ διαφορετικές αποδόσεις. Θεωρούμε ότι κάθε συσκευή του δικτύου είναι συμβατή με κάθε άλλη για ασύρματη μεταφορά ενέργειας.

5.4 Μοντέλο Δικτύου

Οι χρήστες των συσκευών είναι μέλη ενός κινητού κοινωνικού δικτύου G , m χρηστών-κόμβων. Πιο συγκεκριμένα, εγγράφονται σε μια πλατφόρμα κοινωνικής δικτύωσης η οποία “συντονίζει” τις ανταλλαγές ενέργειας. Θέλουμε να προσομοιώσουμε τον κεντρικό εξυπηρετητή της πλατφόρμας ο οποίος αφού επεξεργαστεί εξατομικευμένα τους δεδομένα (τοποθεσία, ενεργειακές ανάγκες, ενδιαφέροντα, κοινωνικά χαρακτηριστικά), εκτελώντας έναν αλγόριθμο σταθερής αντιστοίχισης (stable matching) τους τοποθετεί σε ζεύγη ανταλλαγής ενέργειας.

Μελετάμε το Κινητό Κοινωνικό Δίκτυο G , m χρηστών-κόμβων, οι οποίοι κινούνται σε μια περιοχή ενδιαφέροντος O . Κάθε χρήστης μεταφέρει μια κινητή συσκευή ή $u = (C, \alpha, \beta)$. Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε την αναλυτική μοντελοποίηση του συστήματος που προτείνεται:

Χρήστες: Θεωρούμε το σύνολο των χρηστών, πλήθους m : $U = \{u_1, \dots, u_m\}$ οι οποίοι κινούνται στην περιοχή ενδιαφέροντος, μεταφέροντας τις συσκευές τους.

Χρόνος: Ο χρόνος θεωρείται χωρισμένος σε μικρά χρονικά βήματα (timesteps). Ενδιαφερόμαστε για την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των χρηστών στη διάρκεια t χρονικών βημάτων. Υποθέτουμε ότι ένα timestep αρκεί ώστε ένα ζεύγος χρηστών να ανταλλάξει ένα μερίδιο ενέργειας E .

Τοποθεσίες ενδιαφέροντος: Σε t χρονικά βήματα, οι χρήστες επισκέπτονται κάποιες τοποθεσίες μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος, την τετράγωνη περιοχή $[0, 1]^2$. Το σύνολο των σημείων $O = \{o_1, \dots, o_n\}$, όπου $o_i \in [0, 1]^2$ συμβολίζουν τις τοποθεσίες ενδιαφέροντος.

Όπως αναφέραμε, ο χρόνος θεωρείται χωρισμένος σε timesteps. Σε κάθε timestep ο εξυπηρετητής εκτελεί τον αλγόριθμο σταθερής αντιστοίχισης και τοποθετεί τους χρήστες σε ζεύγη ανταλλαγής ενέργειας. Για να είναι δυνατή η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ δύο συσκευών, οι χρήστες θα πρέπει να βρίσκονται στην ίδια τοποθεσία.

5.5 Κινητικότητα Χρηστών

Πριν αναλύσουμε τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η μοντελοποίηση της κίνησης των χρηστών, ορίζουμε κάποια χαρακτηριστικά, τα οποία αναπαριστούν τα ενδιαφέροντα των χρηστών και αντίστοιχα το κατά πόσο κάθε τοποθεσία σχετίζεται με αυτά τα ενδιαφέροντα. Θεωρούμε, λοιπόν, k θεματικές κατηγορίες που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά των οντοτήτων του συστήματος. Ακολουθεί η περιγραφή των **χαρακτηριστικών χρήστη και τοποθεσίας**:

- Κάθε τοποθεσία o χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών \mathbf{f}_o μεγέθους k . Το στοιχείο $\mathbf{f}_o(i) \in [0, 1]$ εκφράζει τη σχετικότητα του τόπου o ως προς τη θεματική κατηγορία i .
- Κάθε χρήστης u χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών \mathbf{h}_u μεγέθους k . Το στοιχείο $\mathbf{h}_u(i) \in [0, 1]$ εκφράζει τη σχετικότητα του χρήστη u ως προς τη θεματική κατηγορία i .

Ισχύει ότι:

$$\sum_{i=1}^k f_o(i) = \sum_{i=1}^k h_u(i) = 1, \forall o \in O, \forall u \in U. \quad (5.1)$$

Η συνάφεια του χρήστη u με την τοποθεσία o ορίζεται ως η ομοιότητα συννημιτόνου του διανύσματος χαρακτηριστικών του χρήστη u και του διανύσματος χαρακτηριστικών της τοποθεσίας o .

$$\text{sim}(u, o) = \frac{\sum_{i=1}^k \mathbf{h}_u(i) \cdot \mathbf{f}_o(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^k \mathbf{h}_u^2(i)} \sqrt{\sum_{i=1}^k \mathbf{f}_o^2(i)}}. \quad (5.2)$$

Στη συνέχεια, ορίζουμε τον γράφο των τοποθεσιών $G_o = (O, E_o, \mathbf{D})$, στον οποίο θα αναφερόμαστε ως γράφο αποστάσεων (distance graph). Ο πίνακας βαρών \mathbf{D} είναι ο $m \times m$ πίνακας των Ευκλείδειων αποστάσεων μεταξύ των τόπων $\mathbf{D} = (d_{ij})$ με το (i, j) -στοιχείο να είναι ίσο με: $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ με $o_i = (x_i, y_i) \in [0, 1]^2$ και $o_j = (x_j, y_j) \in [0, 1]^2$.

Η κινητικότητα των χρηστών μοντελοποιείται με **τυχαίους περιπάτους** (random walks - RW) στον γράφο αποστάσεων. Οι καταχωρήσεις του (δεξιού) στοχαστικού πίνακα του τυχαίου περιπάτου του χρήστη u , $\mathbf{P}(u)$, υπολογίζονται με βάση την απόσταση μεταξύ των τοποθεσιών και τη συνάφεια του χρήστη με τις τοποθεσίες. Δεδομένου ότι η ομοιότητα χρήστη-τοποθεσίας παίρνει τιμές στην περιοχή $[0, 1]$, κανονικοποιούμε μόνο τις αποστάσεις των χρηστών ως εξής:

$$d'_{i,j} = \frac{d_{i,j} - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} \quad (5.3)$$

Έπειτα, η πιθανότητα του χρήστη u να μετακινηθεί από την τοποθεσία o_i στην τοποθεσία o_j με ένα βήμα (hop) ορίζεται ως:

$$p_{ij}(u) = \frac{\text{sim}(u, o_j) + 1 - d'_{i,j}}{\sum_{j=1}^p (\text{sim}(u, o_j) + 1 - d'_{i,j})} \quad (5.4)$$

Η εξίσωση αυτή (5.4) εξασφαλίζει ότι όλοι οι χρήστες έχουν μη-μηδενικές πιθανότητες να επισκεφθούν κάθε τοποθεσία ενδιαφέροντος στον γράφο αποστάσεων G_o . Επομένως, οι τυχαίοι περίπατοι πραγματοποιούνται στον πλήρη γράφο G_o με βρόχους, δηλαδή, συμπεριλαμβανομένων των ακμών από έναν κόμβο στον εαυτό του (self-edges).

Θεωρούμε το διάνυσμα της αρχικής κατανομής του χρήστη u , $\mathbf{p}_u^{(0)}$, με $\mathbf{p}_u^{(0)}(o)$ να είναι η πιθανότητα του χρήστη u να βρίσκεται στην τοποθεσία o στην αρχή του περιπάτου του στο γράφημα G_o . Οι πιθανότητες του χρήστη u να επισκεφθεί οποιαδήποτε τοποθεσία σε t timesteps δίνονται από την εξίσωση: $\mathbf{p}_u^{(t)} = \mathbf{p}_u^{(0)} \mathbf{P}^{(t)}(u)$.

Έστω $\{X_{uv}(i)\}_i$ μια οικογένεια τυχαίων μεταβλητών-δεικτών (που περιγράφουν ανεξάρτητες αλλά όχι πανομοιότυπα κατανεμημένες δοκιμές Bernoulli) για τις οποίες ισχύει ότι:

$$X_{uv}(i) = \begin{cases} 1, & \text{αν ο } u \text{ συναντήσει τον } v \text{ τη χρονική στιγμή } i, \\ 0, & \text{αν ο } u \text{ δεν συναντήσει τον } v \text{ τη χρονική στιγμή } i. \end{cases} \quad (5.5)$$

Οι χρήστες επισκέπτονται ανεξάρτητα τα σημεία ενδιαφέροντος. Η πιθανότητα για τους χρήστες u, v να συναντηθούν μετά από i χρονικά βήματα, $i \in [0, t] \in \mathbb{N}$, δίνεται από την έκφραση:

$$P(X_{uv}(i) = 1) = \mathbf{p}_u^{(i)} \cdot \mathbf{p}_v^{(i)\top}. \quad (5.6)$$

Στη συνέχεια, ορίζουμε την εντροπία της τυχαίας μεταβλητής $X_{uv}(i)$, δηλαδή το μέσο επίπεδο αβεβαιότητας ότι δύο χρήστες θα συναντηθούν στο timestep i :

$$H(X_{uv}(i)) = - \sum_{x \in \{0,1\}} P(X_{uv}(i) = x) \log p(X_{uv}(i) = x). \quad (5.7)$$

5.6 Δείκτης Προτίμησης

Όπως αναφέραμε, κάθε χρήστης σε κάθε timestep κατατάσσει τους υπόλοιπους με μια σειρά προτίμησης, τοποθετώντας πρώτο αυτόν τον οποίο θεωρεί βέλτιστο ταίρι για WPT, δεύτερο τον χρήστη που θεωρεί δεύτερο καλύτερο υποψήφιο κ.ο.κ. Η προτίμηση αυτή αποτυπώνεται με έναν δείκτη προτίμησης. Στον δείκτη προτίμησης ενσωματώνονται οι εξής παράμετροι, που υποδεικνύουν την καταλληλότητα κάθε υποψηφίου χρήστη να γίνει ζεύγος WTP:

- Το ενεργειακό κέρδος που μπορεί να προσφέρει ως πομπός στην WTP.
- Το κατά πόσο είναι έμπιστος ότι θα πραγματοποιήσει όντως την WTP.
- Τη βεβαιότητα με την οποία οι χρήστες θα συναντηθούν στο timestep που εξετάζεται.

Αυτούς τους παράγοντες εξετάζουμε ξεχωριστά στις επόμενες ενότητες, παραθέτοντας τους ακριβείς ορισμούς τους καθώς και τα εργαλεία που χρησιμοποιήσαμε για την μοντελοποίησή τους.

5.6.1 Κέρδος

Έχουμε ορίσει το μερίδιο ενέργειας $E = e$, που ανταλλάσσουν δύο χρήστες u και v σε ένα timestep, εφόσον πληρούν τις χωρικές προϋποθέσεις για να γίνει η ασύρματη μεταφορά ενέργειας. Επίσης, ορίζουμε E_u και E_v τα επίπεδα ενέργειας, δηλαδή, τα ποσοστά επί της μπαταρίας των δύο συσκευών και θεωρούμε χωρίς τη βλάβη της γενικότητας $E_u < E_v$. Επομένως ο χρήστης v , είναι ο πομπός κατά την WPT και ο u ο δέκτης. Τότε, το ενεργειακό κέρδος του κόμβου u από τον κόμβο v , για το timestep i θα είναι:

$$g_i(u, v) = \beta_v e \quad (5.8)$$

Τέλος, το κανονικοποιημένο κέρδος είναι το εξής:

$$g_i^{norm}(u, v) = \frac{g_i(u, v)}{E} \quad (5.9)$$

Με άλλα λόγια, το κανονικοποιημένο κέρδος που δυνάμει θα αποκομίσει ο δέκτης ταυτίζεται με την απόδοση του πομπού β_v κατά την WPT, καθώς $\beta \in (0, 1)$ και το ποσό ενέργειας που ανταλλάσσεται είναι $E = e$, σταθερό για όλες τις ανταλλαγές.

5.6.2 Εμπιστοσύνη

Ένας παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά το σύστημα που μελετάμε είναι η προθυμία των χρηστών να ανταλλάξουν ενέργεια μεταξύ τους. Σε αυτό το σημείο εισάγουμε την έννοια της εμπιστοσύνης στο μοντέλο. Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η εμπιστοσύνη αποτελεί σημαντικό παράγοντα των ανθρώπινων κοινωνικών σχέσεων [50]. Θεωρούμε πως όσο πιο ισχυρή κοινωνική σχέση έχουν δύο χρήστες, τόσο μεγαλύτερη εμπιστοσύνη υπάρχει ανάμεσά τους και άρα τόσο θα αυξάνεται η προθυμία τους να ανταλλάξουν ενέργεια.

Στην επιστήμη υπολογιστών, η έννοια της εμπιστοσύνης μπορεί να αφορά είτε τον χρήστη είτε το σύστημα. Η έννοια της εμπιστοσύνης χρήστη, που εξετάζουμε εμείς, καθώς θεωρούμε δεδομένη την εμπιστοσύνη των χρηστών στο σύστημα, προέρχεται από από την ψυχολογία και την κοινωνιολογία και αναφέρεται στη σιγουριά που έχει μια υποκειμενική οντότητα πως κάποια άλλη οντότητα θα δράσει με έναν αναμενόμενο τρόπο. Μιλάμε, λοιπόν, για προσωπική εμπιστοσύνη, εγγενώς εξατομικευμένη [50], [51].

Εισάγουμε στο μοντέλο έναν παράγοντα που εκφράζει το κατά πόσο ένας χρήστης u εμπιστεύεται έναν άλλο χρήστη του δικτύου v , το μέτρο εμπιστοσύνης (measure of trust), $MT(u, v)$, το οποίο μπορεί να παίρνει τιμές στο διάστημα $[0, 1]$, με την τιμή μηδέν να εκφράζει την παντελή έλλειψη εμπιστοσύνης και την τιμή ένα την απόλυτη εμπιστοσύνη. Η εμπιστοσύνη, στο παρόν μοντέλο είναι ασύμμετρη, δηλαδή, ένας χρήστης μπορεί να εμπιστεύεται έναν άλλον περισσότερο από ό,τι ο δεύτερος τον εμπιστεύεται [50]. Τέλος, παρόλο που η εμπιστοσύνη εν γένει είναι μεταβλητή, στην παρούσα εργασία θεωρούμε ότι η τιμή του μέτρου εμπιστοσύνης παραμένει σταθερή στη διάρκεια κάθε πειράματος.

5.6.3 Link Stability (Σταθερότητα των Συνδέσεων)

Όπως ορίσαμε στην ενότητα 5.5 Κινητικότητα Χρηστών αναλυτικά, χρησιμοποιούμε στο μοντέλο μας πρόβλεψη κίνησης και καταλήγουμε, κάνοντας χρήση του μεγέθους της εντροπίας σε ένα μέτρο ενδεικτικό της αβεβαιότητας της συνάντησης δύο χρηστών σε κάθε timestep (εξίσωση 5.7). Στο παρόν μοντέλο, μας ενδιαφέρει να γνωρίζουμε το μέτρο της βεβαιότητας της συνάντησης δύο χρηστών. Γι' αυτό το λόγο, ορίζουμε ένα νέο μέγεθος, το link stability $LS(u, v)$ (σταθερότητα των συνδέσεων) μεταξύ δύο χρηστών u και v για το χρονικό βήμα i , ως εξής:

$$LS_i(u, v) = 1 - H(X_{uv}(i)) \quad (5.10)$$

Επεξηγηματικά, μεγάλη εντροπία, σημαίνει μεγάλη αβεβαιότητα, άρα μικρό link stability και αντιστρόφως. Η εντροπία H παίρνει τιμές στο διάστημα $[0, 1]$, για τ.μ. Bernoulli, επομένως και το link stability LS είναι φραγμένο στο διάστημα $[0, 1]$.

5.6.4 Υπολογισμός Δείκτη Προτίμησης

Ο κεντρικός εξυπηρετητής σε κάθε timestep υπολογίζει για κάθε χρήστη τις παραμέτρους του κανονικοποιημένου ενεργειακού κέρδους g^{norm} , του link stability LS και του μέτρου εμπιστοσύνης MT , που αναλύσαμε στις προηγούμενες ενότητες. Στη συνέχεια, με βάση αυτά υπολογίζει για κάθε χρήστη τον δείκτη προτίμησης κάθε άλλου χρήστη, ο οποίος καταχωρείται σε μία λίστα, την λίστα προτίμησης PL . Έστω ότι εξετάζουμε τον δείκτη προτίμησης του κόμβου u ως προς τον κόμβο v , για το timestep i . Αυτό, εκφράζεται με την εξής καταχώρηση στη λίστα προτίμησης του u :

$$PL_i(u, v) = w_g g_i^{norm}(u, v) + w_l LS_i(u, v) + w_s MT(u, v) \quad (5.11)$$

Όπου:

$$w_g + w_l + w_s = 1 \quad (5.12)$$

Τα w_g , w_l και w_s είναι τα βάρη που αντιστοιχούν στα τρία κριτήρια του δείκτη προτίμησης: το κέρδος, το link stability και το μέτρο εμπιστοσύνης, αντίστοιχα. Χρησιμοποιούμε βάρη στις κανονικοποιημένες τιμές ώστε μεταβάλλοντας τις τιμές των βαρών να έχουμε πλήρη έλεγχο της επιρροής κάθε κριτηρίου στον δείκτη προτίμησης. Το άθροισμα γινομένων με βάρη έχει χρησιμοποιηθεί ξανά για την περιγραφή μεγεθών με ετερόκλητους παράγοντες σε αντίστοιχα προβλήματα [52].

Επιπλέον, επισημαίνουμε πως ο δείκτης προτίμησης είναι ένας κυρτός συνδυασμός σημείων. Στην κυρτή γεωμετρία και τη διανυσματική άλγεβρα, ένας κυρτός συνδυασμός είναι ένας γραμμικός συνδυασμός σημείων (τα οποία μπορεί να είναι διανύσματα, βαθμωτά μεγέθη ή γενικότερα σημεία σε έναν αφινικό χώρο) όπου όλοι οι συντελεστές είναι μη αρνητικοί και έχουν άθροισμα 1 [53]. Πιο συγκεκριμένα, για ένα πεπερασμένο πλήθος σημείων x_1, x_2, \dots, x_n που ανήκουν σε έναν πραγματικό διανυσματικό χώρο, ένας κυρτός συνδυασμός αυτών είναι ένα σημείο της μορφής:

$$\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n \quad (5.13)$$

όπου $\alpha_i \in \mathbb{R}$, $\alpha_i > 0, \forall i$ και $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n = 1$

Τέλος, ύστερα από τον υπολογισμό όλων των λιστών προτίμησης, αυτές ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα όλοι οι χρήστες να καταλήγουν με μια λίστα, στην πρώτη θέση της οποίας βρίσκεται ο καλύτερος υποψήφιος για να ανταλλάξουν ενέργεια, ενώ στην τελευταία θέση ο χειρότερος, βάσει των κριτηρίων που έχουμε θέσει.

5.7 Αλγόριθμος Αντιστοίχισης

5.7.1 Πρόβλημα Σταθερής Αντιστοίχισης Συγκατοίκων

Μετά τον υπολογισμό των λιστών προτίμησης, μένει να τοποθετηθούν οι χρήστες σε ζεύγη WPT. Το πρόβλημα αντιστοίχισης που επιλύουμε είναι το πρόβλημα της

Σταθερής Αντιστοίχισης Συγκατοίκων (Stable Roommates Problem - SRP), καθώς επιτρέπουμε αντιστοιχίσεις μεταξύ κάθε πιθανού ζεύγους από το σύνολο $|U|$ και όχι μεταξύ διαχωρισμένων κλάσεων όπως στο πρόβλημα Σταθερού Γάμου (Stable Marriage Problem). Στην επόμενη παράγραφο, υπενθυμίζουμε συνοπτικά στον αναγνώστη τον αλγόριθμο επίλυσης του SRP, τον οποίο έχουμε παρουσιάσει αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2 - Θεωρητικό Υπόβαθρο, στην Ενότητα 2.3.2.

Ο αλγόριθμος παίρνει σαν είσοδο το σύνολο των χρηστών και τις λίστες προτίμησής τους και επιστρέφει στην έξοδο τα ζεύγη των χρηστών. Αρχικά, κανένας χρήστης δεν έχει ζευγάρι. Κάθε χρήστης βρίσκει τον ομοτίμό του με τον υψηλότερο δείκτη προτίμησης και του ζητά να γίνουν ζευγάρι. Εάν αυτός είναι ήδη σε αντιστοιχία με κάποιον άλλον, ελέγχει ποιος εκ των δύο βρίσκεται ψηλότερα στη λίστα προτίμησής του και επιλέγει αυτόν για ζευγάρι. Με τον τρόπο αυτό επεξεργάζονται όλοι οι κόμβοι μέχρι να αποκτήσουν ζευγάρι. Εάν ένας κόμβος απορριφθεί από αυτόν στον οποίο έκανε πρόταση, τον αφαιρεί από τη λίστα του και επαναλαμβάνει την προσφορά στον αμέσως επόμενο υποψήφιο στη λίστα προτίμησής του κ.ο.κ. Στη δεύτερη φάση του αλγορίθμου εντοπίζονται και αφαιρούνται όλοι οι κύκλοι “all-or-nothing” που θα οδηγούσαν αμέσως στο σχηματισμό ενός ζεύγους το οποίο θα έκανε το ταίριασμα unstable. Στο τέλος αυτής της φάσης, κάθε χρήστης έχει το πολύ έναν ομοτίμο του στη λίστα προτίμησής του. Η αντιστοίχιση όλων των χρηστών με αυτούς που βρίσκονται στη λίστα προτίμησής τους θα οδηγήσει σε ένα stable matching. Εάν κάποιος χρήστης καταλήξει με κενή λίστα, τότε δεν υπάρχει stable matching για το γύρο, το ταίριασμα θα είναι ασταθές (unstable). Ο αλγόριθμος επιστρέφει τα ζεύγη των χρηστών που σχηματίστηκαν, είτε η αντιστοίχιση είναι σταθερή είτε όχι και έχει πολυπλοκότητα $O(m^2)$.

Όπως αναφέραμε και στο Κεφάλαιο 2, δεν υπάρχει stable matching για κάθε σύνολο και σε αυτήν την περίπτωση δεν καταλήγουν όλοι οι χρήστες με ζεύγος. Παρόλα αυτά, για το υποσύνολο των χρηστών το οποίο καταλήγει με ζεύγος, υπάρχει stable matching και είναι αυτό το οποίο επιστρέφει ο αλγόριθμος. Επιπλέον, ένα stable matching απαιτεί ζυγό αριθμό χρηστών. Αυτό στην προσομοίωση είναι εύκολο να επιλυθεί, επιλέγοντας κατάλληλο αριθμό χρηστών. Στην πραγματικότητα, αν οι χρήστες είναι μονός αριθμός, το πρόβλημα επίσης επιλύεται εύκολα, εισάγοντας στο σύστημα έναν πλασματικό χρήστη (dummy user), με μηδενικό δείκτη προτίμησης.

Θεωρούμε πως ο αλγόριθμος αυτός εκτελείται σε κάθε timestep και υπολογίζει τα ζεύγη που θα προκύψουν στο ακριβώς επόμενο timestep. Κρίνεται κατάλληλος για το σύστημα που προτείνουμε, καθώς λαμβάνονται υπ’ όψιν οι προτιμήσεις όλων των χρηστών του δικτύου και κάθε χρήστης θα αντιστοιχηθεί στο ζευγάρι με τον μέγιστο επιτρεπτό δείκτη προτίμησης στη λίστα του. Σε κάθε timestep, λοιπόν, μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου SRP, πραγματοποιούνται οι WPT μεταξύ των χρηστών σύμφωνα με τα ζεύγη που έχουν διαμορφωθεί.

5.7.2 Εναλλακτικός Αλγόριθμος Αντιστοίχισης

Κατόπιν, παρουσιάζουμε έναν βοηθητικό αλγόριθμο, τον οποίο θα χρησιμοποιήσουμε ώστε να διαπιστώσουμε αν και κατά πόσο επιδρά στο σύστημα ο αριθμός των stable matching που προκύπτουν.

Θεωρούμε πως ο αλγόριθμος εκτελείται σε κάθε time-step και υπολογίζει τα ζεύγη που θα προκύψουν στο ακριβώς επόμενο time-step. Ο αλγόριθμος παίρνει σαν είσοδο το σύνολο των χρηστών και τις λίστες προτίμησής τους και επιστρέφει στην έξοδο τα ζεύγη των χρηστών. Αρχικά, κανένας χρήστης δεν έχει ζευγάρι. Κάποιος **ελεύθερος** χρήστης βρίσκει τον ομότιμό του με τον υψηλότερο δείκτη προτίμησης και του ζητά να γίνουν ζευγάρι. Εάν και ο χρήστης στον οποίο γίνεται η προσφορά είναι ελεύθερος, οι δύο χρήστες σχηματίζουν ζευγάρι. Αλλιώς, εάν αυτός είναι ήδη σε αντιστοιχία με κάποιον άλλον, ελέγχει αν ο χρήστης που του κάνει πρόταση βρίσκεται ψηλότερα στη λίστα προτίμησής του από αυτόν με τον οποίο έχει αντιστοιχηθεί προσωρινά. Αν ο χρήστης-proposer, απορριφθεί από τον ομότιμό του, τότε τον διαγράφει από τη λίστα προτίμησης και επαναλαμβάνει την προσφορά στον αμέσως επόμενο στη λίστα προτίμησής του. Αλλιώς, εάν ο χρήστης-proposer γίνει δεκτός, τότε σχηματίζεται το νέο ζευγάρι και ο χρήστης που απορρίφθηκε γίνεται proposer, δηλαδή αναζητεί νέο ζεύγος. Ο αλγόριθμος αυτός έχει επίσης πολυπλοκότητα $O(n^2)$, για σύνολο μεγέθους n , όπως και ο αλγόριθμος του Stable Roommates Problem.

Τονίζουμε πως η διαφορά αυτού του αλγορίθμου από τον Stable Roommates αλγόριθμο είναι πως **αν κάποιος χρήστης αντιστοιχισθεί σε ζεύγος και δεν απορριφθεί ποτέ, τότε η προτίμησή του δεν θα ληφθεί καθόλου υπόψιν**. Επομένως, η προτίμηση κάποιων χρηστών δε λαμβάνεται ποτέ υπόψιν για την διαμόρφωση των ζευγών ανταλλαγής ενέργειας.

5.8 Πρωτόκολλο Ανταλλαγής Ενέργειας

Αυτή είναι η τελευταία ενότητα του κεφαλαίου και περιλαμβάνει αναλυτικά το πρωτόκολλο ανταλλαγής ενέργειας, δηλαδή τους κανόνες που διέπουν την πραγματοποίηση της WPT.

Έχουμε ορίσει το μερίδιο ενέργειας $E = e$, που ανταλλάσσουν δύο χρήστες u και v σε ένα timestep, εφόσον πληρούν τις χωρικές προϋποθέσεις για να γίνει η ασύρματη μεταφορά ενέργειας. Επίσης, ορίζουμε E_u και E_v τα επίπεδα ενέργειας, δηλαδή, τα ποσοστά επί της μπαταρίας των δύο συσκευών και θεωρούμε χωρίς τη βλάβη της γενικότητας $E_u < E_v$, που σημαίνει πως ο χρήστης v αναλαμβάνει το ρόλο του πομπού, ενώ ο u του δέκτη. Ορίζουμε, ακόμα, ένα ελάχιστο επιτρεπτό επίπεδο ενέργειας E_{min} , από το οποίο και κάτω είναι αδύνατο μια συσκευή να λάβει μέρος σε ανταλλαγή ενέργειας ως πομπός. Το επίπεδο αυτό είναι το ελάχιστο επίπεδο ενέργειας που υπάρχει στο δίκτυο σε κάθε γύρο. Τέλος, θεωρούμε E_{sp} την ενέργεια που θα έχει δυνητικά ο πομπός μετά την πραγματοποίηση της WPT:

$$E_{sp} = E_v - e \quad (5.14)$$

Αν $E_{sp} \leq E_{min}$, δηλαδή αν η ενέργεια του πομπού μετά την WPT πέσει στο ή κάτω από το τρέχον ελάχιστο επίπεδο ενέργειας στο δίκτυο, τότε η WPT δεν πραγματοποιείται. Δηλαδή, αν και μόνο αν $E_{sp} > E_{min}$, θα πραγματοποιηθεί η ανταλλαγή ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση, τα επίπεδα ενέργειας των χρηστών u και v μετά την WPT, θα είναι:

$$E_v^{i+1} = E_v^i - e \quad (5.15)$$

$$E_u^{i+1} = E_u^i + \beta_v e \quad (5.16)$$

Όπου β_v , η απόδοση της συσκευής v , του πομπού, i το τρέχον timestep και $i + 1$ το επόμενο timestep.

Κεφάλαιο 6

Παρουσίαση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό, παραθέτουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διεξήχθησαν στο μοντέλο. Αναφέρονται αναλυτικά οι τεχνικές που εφαρμόσαμε και οι διαφορετικοί συνδυασμοί παραμέτρων που χρησιμοποιήσαμε προκειμένου να αξιολογήσουμε το μοντέλο, τη συμπεριφορά και την απόδοσή του. Τα πειράματα διεξάγονται σε συνθετικά δεδομένα. Συγκεκριμένα, για διαφορετικό συνδυασμό στις τιμές των παραμέτρων που επηρεάζουν το σύστημα, παρατηρούμε τη μεταβολή του μέσου επιπέδου ενέργειας στην αρχή και μετά το πέρας κάθε πειράματος (average battery level). Επιπλέον, εξετάζουμε το μέσο αρχικό και το μέσο τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας (average minimum battery level) σε κάθε δίκτυο που προσομοιώνουμε. Αντικείμενο παρατήρησης αποτελεί και ο μέσος αριθμός ανταλλαγών ενέργειας (average number of exchanges) κάθε πειράματος. Τέλος, παρουσιάζουμε κάποια ιστογράμματα κατανομής του αρχικού και τελικού επιπέδου μπαταρίας των συσκευών, για να αξιολογήσουμε τον τρόπο με τον οποίο το μοντέλο διαμοιράζει την ενέργεια στο δίκτυο.

Στις προσομοιώσεις, των οποίων τα αποτελέσματα ακολουθούν, εξετάζουμε πώς επιδρά στο μοντέλο το πλήθος των χρηστών του δικτύου, το πλήθος των τοποθεσιών του χώρου ενδιαφέροντος, το πλήθος των θεματικών κατηγοριών των χρηστών και των τοποθεσιών, το πλήθος των γύρων ανταλλαγής ενέργειας, το διαφορετικό εύρος και οι διαφορετικές τιμές αποδόσεων κατά τη μεταφορά ενέργειας και ρυθμών κατανάλωσης της μπαταρίας των χρηστών. Επιπλέον, παραθέτουμε αναλυτικά τα αποτελέσματα που αποσπάσαμε για διαφορετικές τιμές των συντελεστών των λιστών προτίμησης.

Τέλος, εκτός από την απόδοση του μοντέλου που αναπτύχθηκε ως προς τις παραμέτρους αυτές, εξετάζουμε δύο ακόμα παράγοντες που επηρεάζουν το σύστημα και θα αναλυθούν στις ομότιτλες ενότητες 6.9 και 6.10 αυτού του κεφαλαίου:

- α) το Πρωτόκολλο Ανταλλαγής Ενέργειας
- β) τον Αλγόριθμο Αντιστοίχισης

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σε γλώσσα Python και έκδοση 3.8.

6.1 Σύνολο Δεδομένων και Προεπιλεγμένες Παράμετροι

Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα, για την πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της απόδοσης του μοντέλου χρησιμοποιήσαμε συνθετικά σύνολα δεδομένων. Υπενθυμίζουμε στον αναγνώστη τα εξής:

- Η κατανομή των τοποθεσιών στο χώρο προκύπτει μέσω ομοιόμορφης κατανομής στο μοναδιαίο τετράγωνο $[0, 1]^2$.
- Τα διανύσματα χαρακτηριστικών των χρηστών και των τοποθεσιών του χώρου ενδιαφέροντος του συστήματος παράγονται χρησιμοποιώντας τυχαία δείγματα ομοιόμορφης κατανομής.
- Οι πιθανότητες μετάβασης των χρηστών στις τοποθεσίες αρχικοποιούνται τυχαία μέσω ομοιόμορφης κατανομής.
- Τα επίπεδα ενέργειας (ποσοστά της χωρητικότητας της μπαταρίας από 10 έως 100) των συσκευών αρχικοποιούνται τυχαία χρησιμοποιώντας δείγματα κανονικής κατανομής.
- Με δείγματα κανονικής κατανομής αρχικοποιούνται τυχαία τόσο η απόδοση των συσκευών κατά την ανταλλαγή ενέργειας β στα διαστήματα που ορίζουμε, η οποία δύναται να πάρει τιμές στο διάστημα $[0, 1]$, όσο και ο ρυθμός κατανάλωσης α της μπαταρίας των συσκευών, ο οποίος μπορεί να πάρει τιμές στο διάστημα $[0, 100]$.

Για να διαπιστώσουμε τη συμπεριφορά και την απόκριση του μοντέλου για κάθε παράμετρο του συστήματος, έχουμε διεξάγει πειράματα στα οποία μεταβάλλουμε μία παράμετρο κάθε φορά, κρατώντας τις υπόλοιπες σταθερές. Για να γίνει στατιστική μελέτη του μοντέλου, κάθε πείραμα με σταθερές παραμέτρους έχει εκτελεστεί 10 φορές, καθώς, όπως είδαμε, κάποια μεγέθη αρχικοποιούνται με τυχαίο τρόπο. Τα αποτελέσματα που θα παρουσιάσουμε περιλαμβάνουν τον μέσο όρο όλων των μεγεθών, όπως τον λάβαμε από τις 10 επαναλήψεις που πραγματοποιήθηκαν.

Θεωρούμε τις εξής τιμές παραμέτρων ως προεπιλογή. Όταν κάποιο μέγεθος δε θα αναγράφεται, από εδώ και στο εξής θα θεωρείται ότι έχει την τιμή που ορίζεται σε αυτό το σημείο. Επίσης, το πείραμα με τις ακόλουθες τιμές παραμέτρων συμβολίζεται ως S_1 . Οι προεπιλεγμένες τιμές είναι:

- Πλήθος Χρηστών $|U| = 100$
- Πλήθος Τοποθεσιών $|O| = 10$
- Πλήθος Θεματικών Κατηγοριών $k = 5$
- Πλήθος Γύρων $r = 10$
- Απόδοση (efficiency) $\beta \in [0.6, 0.8]$ με βήμα 0.1
- Ρυθμός Κατανάλωσης (consumption rate) $\alpha \in [1, 3]$ με βήμα 1
- Βάρος Κέρδους $w_g = 0.33$
- Βάρος Link Stability $w_l = 0.33$

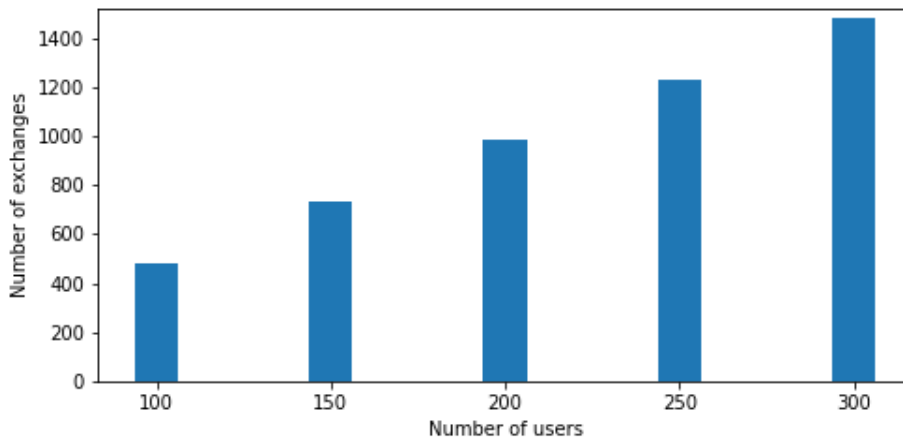
- Βάρος Μέτρου Εμπιστοσύνης (measure of trust) $w_s = 0.33$

6.2 Πλήθος Χρηστών

Η πρώτη παράμετρος που εξετάζουμε την επίδρασή της στο σύστημα μας είναι το πλήθος των συσκευών στο δίκτυο. Κρατώντας σταθερές τις προεπιλεγμένες τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων, μεταβάλλουμε το πλήθος του συνόλου χρηστών-συσκευών U . Παραθέτουμε τα αποτελέσματα για τις εξής διαφορετικές τιμές του συνόλου U :

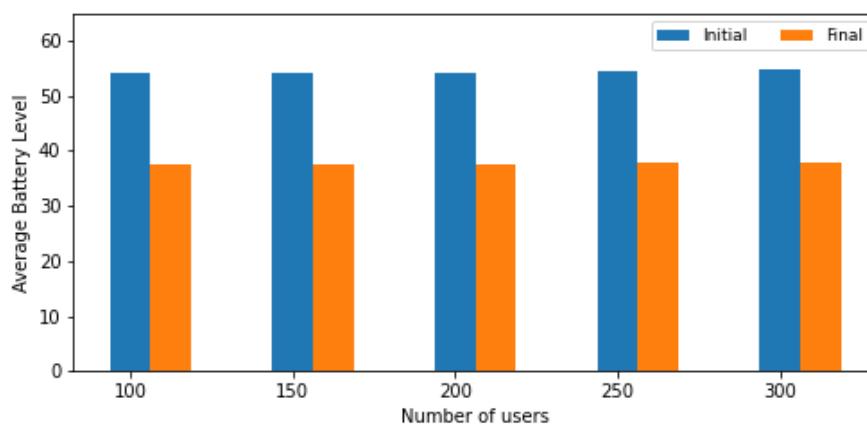
- $|U| = 100, 150, 200, 250, 300$

Ακολουθούν τα γραφήματα που αναπαριστούν τις μεταβολές των μεγεθών: μέσος αριθμός ανταλλαγών ενέργειας (average number of exchanges), μέσο επίπεδο ενέργειας (average battery level) και μέσο ελάχιστο επίπεδο ενέργειας (average minimum battery level), για το διαφορετικό πλήθος συσκευών:

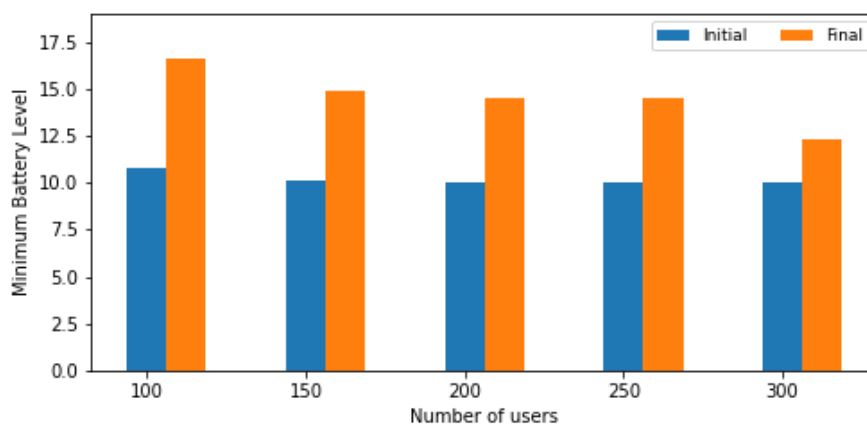


Σχήμα 6.1: Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας για διαφορετικό πλήθος συσκευών στο σύστημα

Μία προφανής παρατήρηση με βάση το Σχήμα 6.1 είναι πως όσο αυξάνεται ο αριθμός χρηστών αυξάνεται και ο αριθμός ανταλλαγών. Αυτό δείχνει ότι είναι πολύ λίγες αναλογικά οι φορές που ο αλγόριθμος δεν καταφέρνει να καταλήξει σε stable matching και επομένως είναι ελάχιστες οι συσκευές που δεν αντιστοιχίζονται με κάποιο ζεύγος σε κάθε γύρο. Σύμφωνα με το Σχήμα 6.2α' το μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο μπαταρίας στο δίκτυο δεν επηρεάζεται από τον αριθμό των συσκευών. Στο Σχήμα 6.2β' παρατηρούμε αρχικά πως το τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας υπερβαίνει το αρχικό. Δηλαδή, επιτεύχθηκε επέκταση του χρόνου ζωής του δικτύου, παρατείνοντας το χρόνο που θα παραμείνουν λειτουργικές οι συσκευές με το ελάχιστο επίπεδο ενέργειας. Επιπλέον, σχολιάζουμε πως το αρχικό ελάχιστο επίπεδο μπαταρίας είναι μεγαλύτερο για 100 συσκευές, ενώ για μεγαλύτερο αριθμό συσκευών μειώνεται. Το



(α') Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος

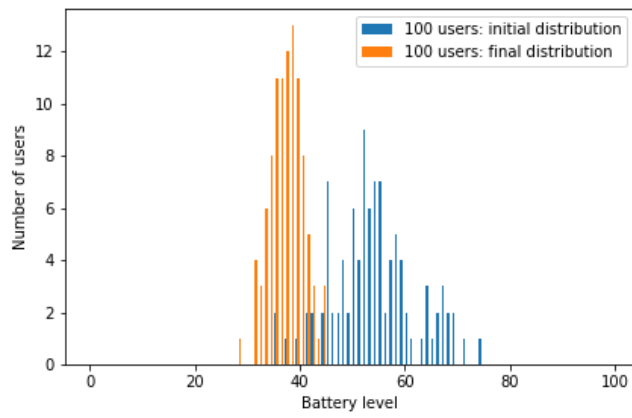


(β') Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος

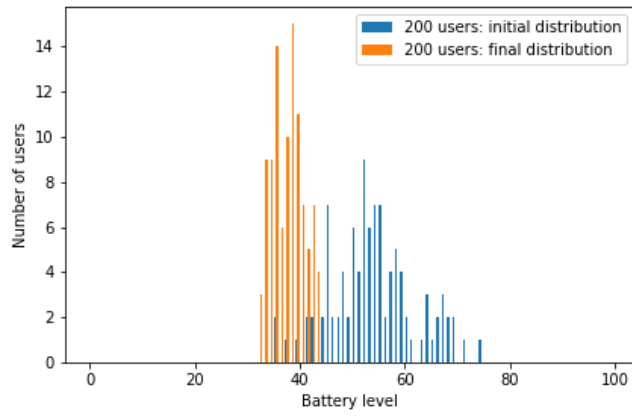
Σχήμα 6.2: Μέσα επίπεδα ενέργειας για διαφορετικό πλήθος συσκευών στο σύστημα

ελάχιστο επίπεδο μπαταρίας είναι φθίνουσα συνάρτηση του αριθμού χρηστών. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το πλήθος των συσκευών, τόσο μεγαλώνει ο αριθμός ανταλλαγών που αντιστοιχούν σε κάθε χρήστη, καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η μείωση, λοιπόν, του ελάχιστου επιπέδου ενέργειας με την αύξηση των χρηστών συνάδει με τον μεγαλύτερο αριθμό ανταλλαγών ανά χρήστη, που συνεπάγεται μεγαλύτερες απώλειες στην WPT. Παρόλα αυτά, όπως είδαμε το μέσο επίπεδο μπαταρίας στο δίκτυο δεν εξαρτάται από τον αριθμό των χρηστών.

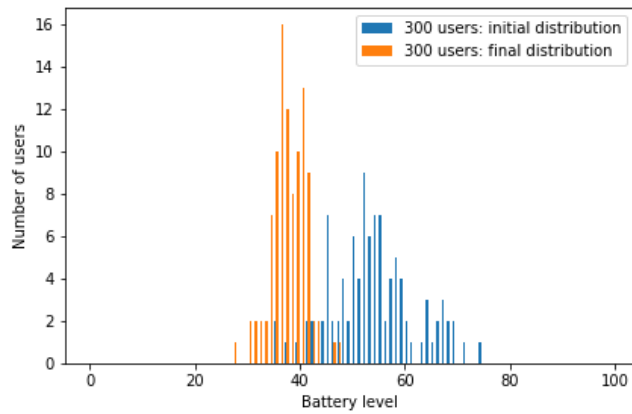
Επιπλέον, παρατηρούμε από τα διαγράμματα του Σχήματος 6.3, που παρουσιάζουν τις κατανομές του επιπέδου της μπαταρίας, πως η αρχική καμπύλη της κατανομής είναι πιο “απλωμένη”, περιλαμβάνει, δηλαδή, μεγαλύτερο εύρος τιμών του επιπέδου μπαταρίας. Η τελική καμπύλη της κατανομής είναι μετατοπισμένη αριστερά, όπως



(α) Δίκτυο 100 συσκευών



(β) Δίκτυο 200 συσκευών



(γ) Δίκτυο 300 συσκευών

Σχήμα 6.3: Κατανομές ενέργειας για το πείραμα S_1

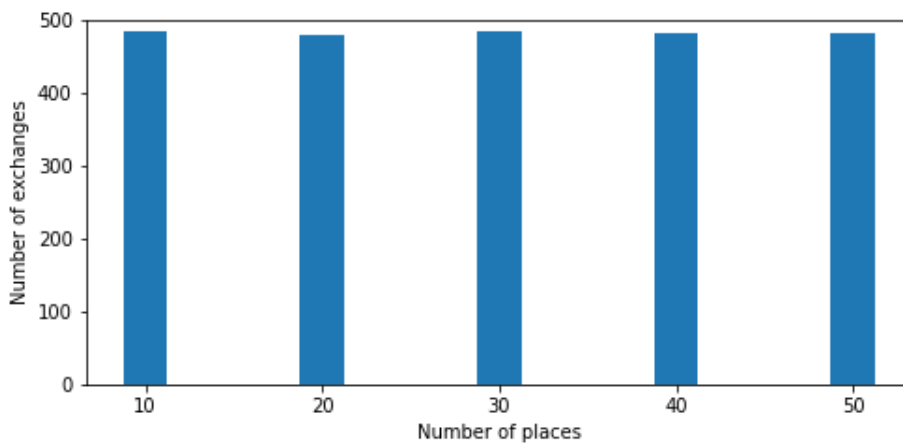
είναι αναμενόμενο, καθώς το μέσο επίπεδο ενέργειας στο δίκτυο μειώνεται, λόγω των απωλειών της WPT και της κατανάλωσης μπαταρίας. Η κατανομή είναι όμως και πιο στενή, δηλαδή, το εύρος τιμών της μπαταρίας είναι μικρότερο. Αυτό σημαίνει πως οι χρήστες έχουν τελικά μικρότερη απόκλιση στο επίπεδο μπαταρίας τους από ότι είχαν στην αρχή. Αυτό είναι μια ένδειξη πως η ενέργεια διαμοιράζεται δίκαια στο σύνολο των συσκευών με τρόπο που επεκτείνει το χρόνο ζωής του δικτύου. Παρόλα αυτά, στο Σχήμα 6.3γ', παρατηρούμε πως για μεγάλη αύξηση του πλήθους χρηστών, η κατανομή ανοίγει και υπάρχουν μεγαλύτερες αποκλίσεις στα τελικά επίπεδα ενέργειας. Φαίνεται, όμως, να ακολουθεί κανονική κατανομή, επομένως η πλειονότητα των χρηστών θα έχουν τιμή επιπέδου μπαταρίας κοντά στη μέση τιμή στο τέλος της προσομοίωσης.

6.3 Πλήθος Τοποθεσιών

Η επόμενη παράμετρος υπό εξέταση είναι το πλήθος των τοποθεσιών στο δίκτυο. Κρατώντας σταθερές τις προεπιλεγμένες τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων, μεταβάλλουμε το πλήθος του συνόλου τοποθεσιών $|O|$, μέσα στο χώρο ενδιαφέροντος. Παραθέτουμε τα αποτελέσματα για τις εξής διαφορετικές τιμές του συνόλου O :

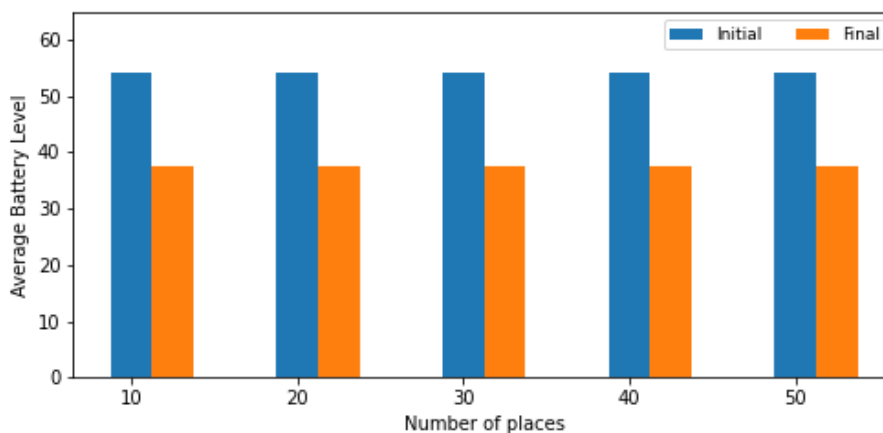
- $|O| = 10, 20, 30, 40, 50$

Ακολουθούν τα γραφήματα που αναπαριστούν τις μεταβολές των μεγεθών: μέσος αριθμός ανταλλαγών ενέργειας (average number of exchanges), μέσο επίπεδο ενέργειας (average battery level) και μέσο ελάχιστο επίπεδο ενέργειας (average minimum battery level), για διαφορετικό πλήθος τοποθεσιών:

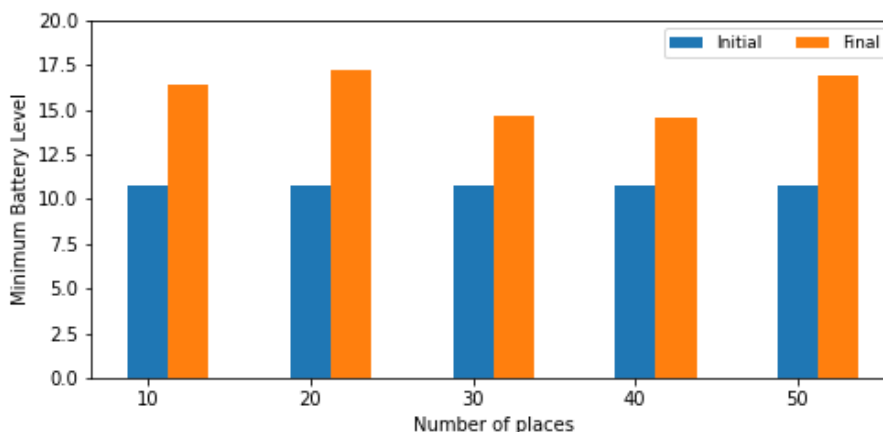


Σχήμα 6.4: Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας για διαφορετικό πλήθος τοποθεσιών στο χώρο ενδιαφέροντος

Αναφορικά με τον αριθμό ανταλλαγών ενέργειας (Σχήμα 6.4), παρατηρούμε πολύ μικρή μείωση όσο αυξάνεται το πλήθος των τοποθεσιών του δικτύου. Επίσης παρατηρούμε ελάχιστη αύξηση του μέσου επιπέδου ενέργειας όσο αυξάνεται το πλήθος



(α') Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος



(β') Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος

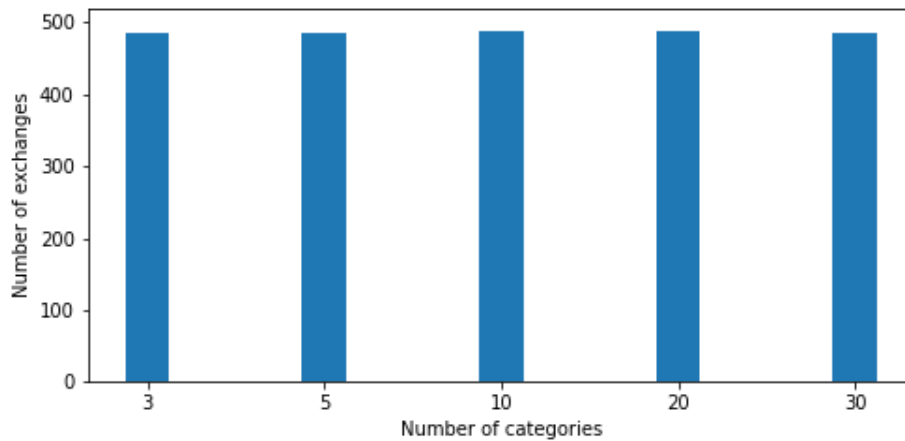
Σχήμα 6.5: Μέσα επίπεδα ενέργειας για διαφορετικό πλήθος τοποθεσιών στο χώρο ενδιαφέροντος

των τοποθεσιών, η οποία διακρίνεται με δυσκολία στο Σχήμα 6.5α'. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς περισσότερες ανταλλαγές συνεπάγονται αυξημένες απώλειες λόγω εξασθένησης κατά την WPT. Αναφορικά με το Σχήμα 6.5β' παρατηρούμε μείωση του ελάχιστου επιπέδου ενέργειας, παρά την αύξηση της μέσης ενέργειας, όσο μεγαλώνει το πλήθος των τοποθεσιών, χωρίς ωστόσο να είναι μονότονη συνάρτηση του $|O|$. Δηλαδή, όταν το δίκτυό μας είναι πιο αραιό ο αριθμός των ανταλλαγών περιορίζεται λόγω της τοπολογίας, όμως το σύστημα δεν επιτυγχάνει βέλτιστο διαμοιρασμό της ενέργειας.

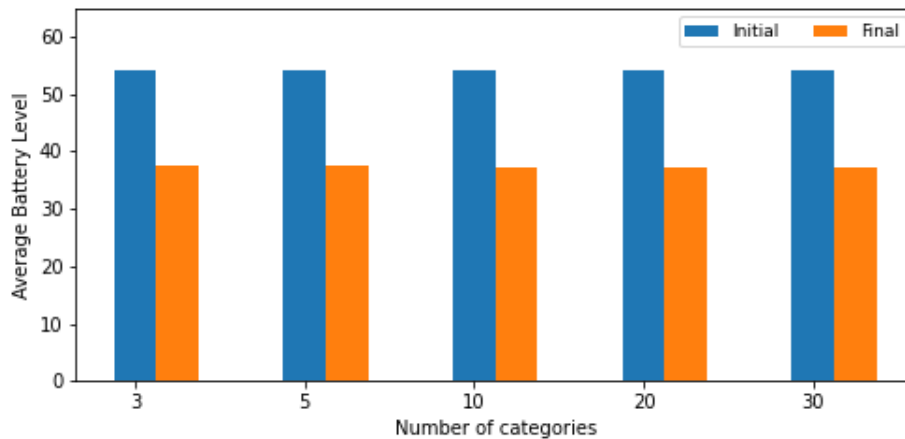
6.4 Πλήθος Κατηγοριών

Στην παρούσα ενότητα, μεταβάλλουμε το πλήθος των θεματικών κατηγοριών k , το οποίο καθορίζει το μέγεθος του διανύσματος χαρακτηριστικών των χρηστών και των τοποθεσιών του συστήματος. Παραθέτουμε τα αποτελέσματα για τις εξής διαφορετικές τιμές k :

- $k = 3, 5, 10, 20, 30$

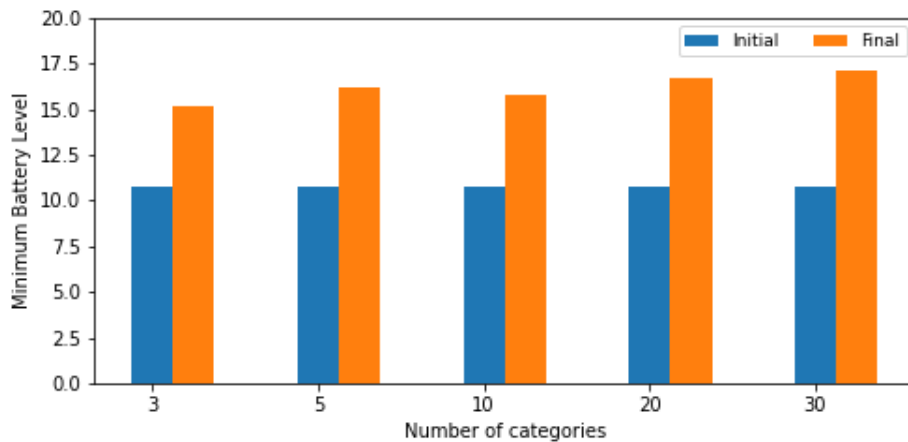


Σχήμα 6.6: Αριθμός ανταλλαγών για διαφορετικό πλήθος κατηγοριών



Σχήμα 6.7: Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος για διαφορετικό πλήθος κατηγοριών

Οι θεματικές κατηγορίες και η ομοιότητα συνημιτόνου, επιδρούν σε ένα βαθμό στις πιθανότητες μετάβασης και επομένως, την πιθανότητα συνάντησης των χρηστών.



Σχήμα 6.8: Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος για διαφορετικό πλήθος κατηγοριών

Επομένως, επηρεάζεται το link stability και κατ' επέκταση οι λίστες προτίμησης των χρηστών. Στο Σχήμα 6.6 παρατηρούμε αμελητέες διαφορές στον αριθμό ανταλλαγών ενέργειας σε σχέση με τον αριθμό των κατηγοριών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, τα μέσα επίπεδα ενέργειας στο σύστημα να μην μεταβάλλονται σημαντικά, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 6.7.

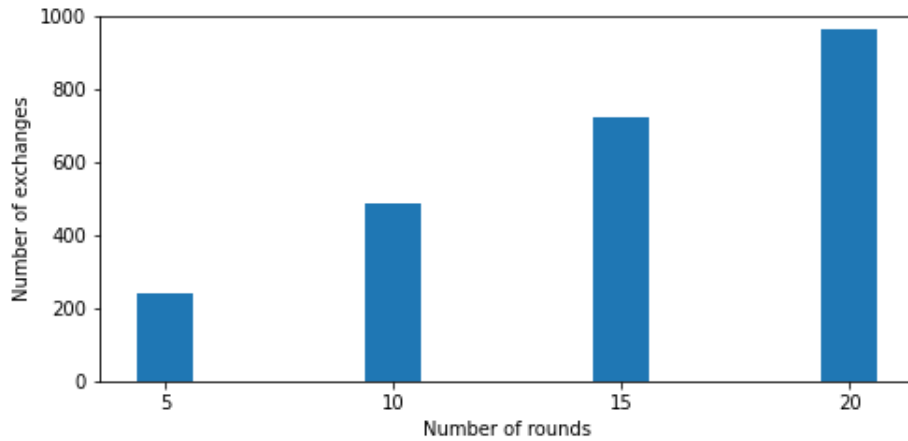
Παρατηρώντας το Σχήμα 6.8 είναι εμφανές πως το ελάχιστο επίπεδο μπαταρίας δεν είναι γνησίως μονότονη συνάρτηση του αριθμού κατηγοριών, χωρίς όμως να παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Παρατηρούμε ένα τοπικό ελάχιστο για 10 κατηγορίες, ωστόσο σε γενικές γραμμές, το μέσο τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας παρουσιάζει μικρή άνοδο με την αύξηση του πλήθους θεματικών κατηγοριών. Δηλαδή, οι συσκευές με το ελάχιστο επίπεδο μπαταρίας θα καταφέρουν να επιτύχουν μικρή επέκταση του χρόνου για τον οποίο θα παραμείνουν λειτουργικές.

Διαπιστώνουμε, λοιπόν, πως λόγω της ομοιόμορφης κατανομής που ακολουθεί το διάλυμα χαρακτηριστικών των χρηστών και των τοποθεσιών, κανένα χαρακτηριστικό δεν θα είναι κυρίαρχο. Επομένως, περιμένουμε κοντινή τιμή ομοιότητας μεταξύ ενός ατόμου και όλων των δυνατών τοποθεσιών, για όλες τις τιμές του πλήθους θεματικών κατηγοριών. Αυτό σημαίνει πως οι αποστάσεις μεταξύ των τοποθεσιών έχουν σημαντικότερο ρόλο στη διαμόρφωση των πιθανοτήτων συνάντησης των χρηστών και κατ' επέκταση του link stability, σε σχέση με το πλήθος των κατηγοριών.

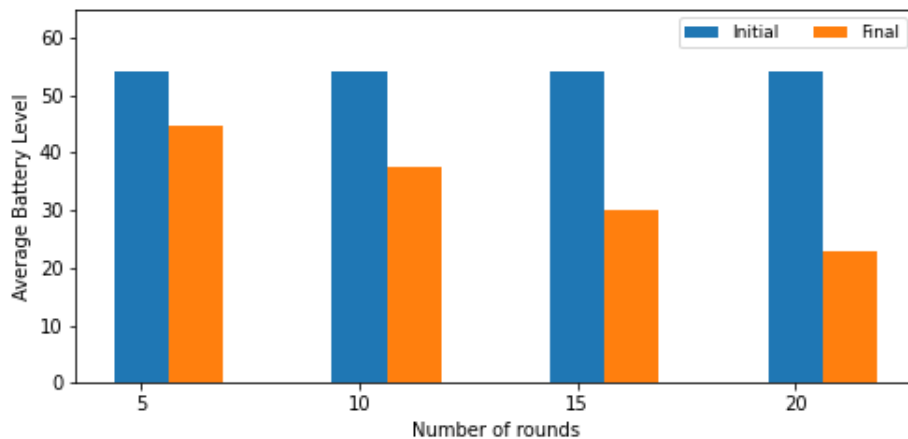
6.5 Πλήθος Γύρων

Στην παρούσα ενότητα, μεταβάλλουμε το πλήθος των γύρων r , δηλαδή τον αριθμό των δυνατών ανταλλαγών ενέργειας, στις οποίες μπορεί να συμμετάσχει ένας χρήστης σε ένα πείραμα. Παραθέτουμε τα αποτελέσματα για τις εξής διαφορετικές τιμές r :

- $r = 5, 10, 15, 20$



Σχήμα 6.9: Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας για διαφορετικό πλήθος γύρων

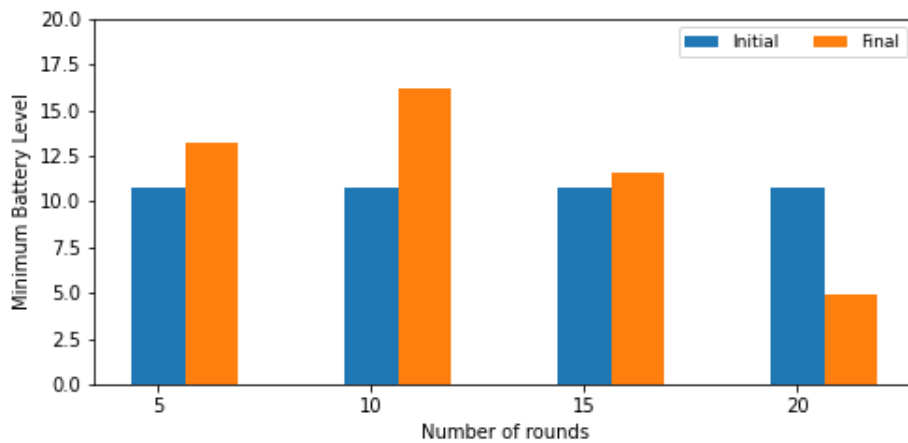


Σχήμα 6.10: Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος για διαφορετικό πλήθος γύρων

Μία προφανής παρατήρηση με βάση το Σχήμα 6.9 είναι πως όσο αυξάνεται ο αριθμός των γύρων αυξάνεται σχεδόν ανάλογα ο αριθμός των ανταλλαγών. Αυτό συνάδει με τις προσδοκίες μας, καθώς όπως αναφέραμε περισσότεροι γύροι ισοδυναμούν με περισσότερες επαναλήψεις εφαρμογής του αλγόριθμου σταθερής αντιστοίχισης και ανταλλαγής ενέργειας. Παρατηρούμε, ακόμα στο Σχήμα 6.10 ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των γύρων η μέση ενέργεια η οποία υπάρχει στο σύστημα μετά το πέρας του πειράματος, μειώνεται, όπως είναι αναμενόμενο, καθώς τόσο οι απώλειες ενέργειας κατά την μεταφορά με WPT, όσο και η ενέργεια που χάνεται λόγω κατανάλωσης της

μπαταρίας των συσκευών από τους χρήστες, είναι αυξημένες. Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό πως όταν οι προσομοιώσεις και ο διαμοιρασμός ενέργειας διαρκούν για μεγάλο χρονικό διάστημα, εξαντλούνται οι πόροι του δικτύου στις ανταλλαγές.

Το πιο ενδιαφέρον Σχήμα είναι το 6.11, καθώς μας δείχνει ότι στους 10 γύρους φτάνουμε στο μέγιστο, ενώ από εκείνη την τιμή και ύστερα, η ελάχιστη τιμή μπαταρίας μειώνεται και η ενέργεια του συστήματος εξαντλείται. Βλέπουμε, λοιπόν, ότι οι 10 γύροι είναι πράγματι η καλύτερη επιλογή για τη μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής του δικτύου, καθώς σε 5 γύρους δεν έχει διαμοιραστεί η ενέργεια αρκετά και υπάρχει ακόμα περιθώριο οφέλους, ώστε να επιτευχθεί μέγιστη αύξηση του ελάχιστου επιπέδου ενέργειας.



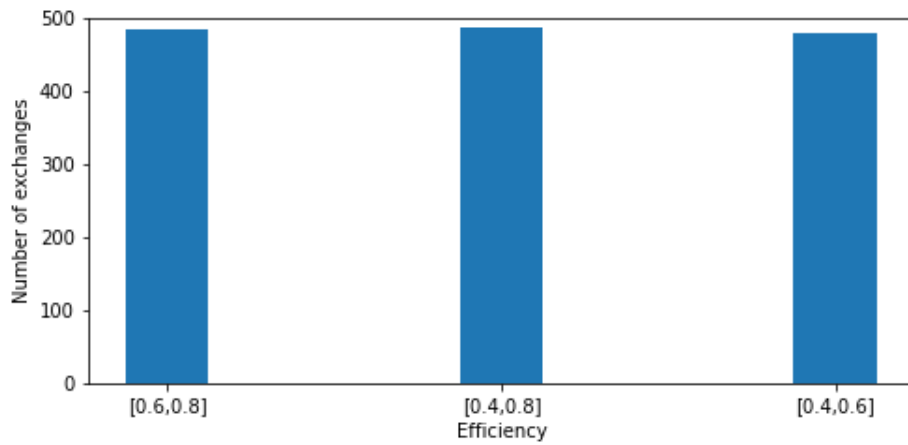
Σχήμα 6.11: Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος για διαφορετικό πλήθος γύρων

6.6 Απόδοση (efficiency)

Καθώς μελετάμε ετερογενή δίκτυα, δεν υπάρχει μία μοναδική τιμή απόδοσης κατά την ανταλλαγή ενέργειας, όπως εξηγήσαμε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5 - Μοντέλο Συστήματος. Στην παρούσα ενότητα, λοιπόν, μεταβάλλουμε το εύρος τιμών που λαμβάνει η απόδοση. Εξετάζουμε πώς ανταποκρίθηκε το μοντέλο λαμβάνοντας τιμές από τα διαφορετικά διαστήματα τιμών απόδοσης κατά την ανταλλαγή ενέργειας:

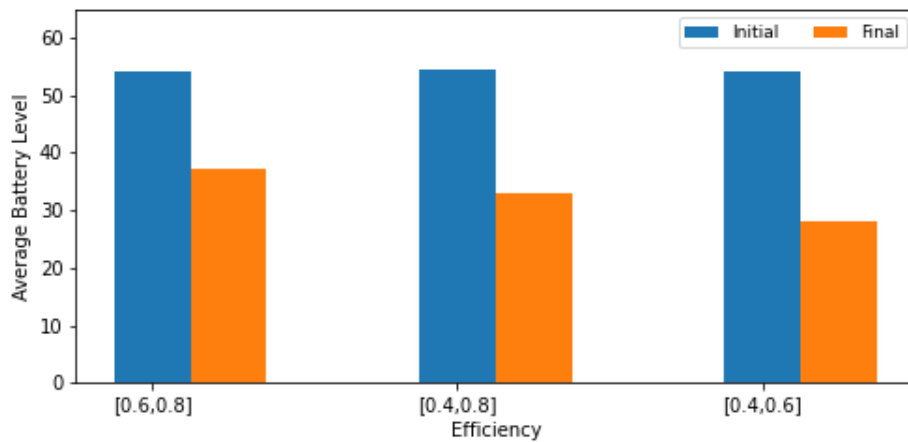
- $\beta = \{[0.6, 0.8], [0.4, 0.8], [0.4, 0.6]\}$, με βήμα 0.1

Υπενθυμίζουμε σε αυτό το σημείο στον αναγνώστη πως η παράμετρος της απόδοσης ακολουθεί κανονική κατανομή (normal distribution) στο διάστημα το οποίο λαμβάνει τιμές. Παρατηρούμε στο Σχήμα 6.12 πως όσο μειώνεται η μέση τιμή της απόδοσης, σε γενικές γραμμές μειώνεται ο αριθμός ανταλλαγών ενέργειας. Αυτό είναι λογικό, καθώς όσο μειώνεται η μέση απόδοση κατά την WPT, ο μέσος ρυθμός με τον οποίο αναπληρώνουν μπαταρία οι συσκευές του δικτύου, επίσης μειώνεται. Δηλαδή, οι



Σχήμα 6.12: Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας για διαφορετικές αποδόσεις

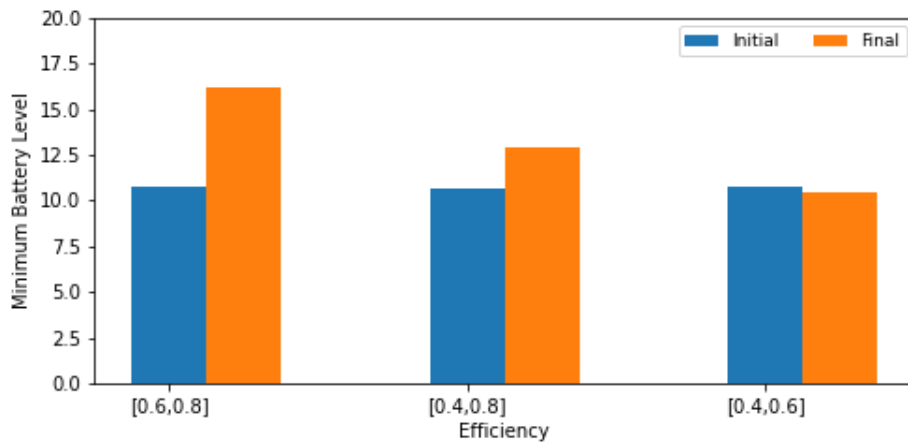
συσκευές αδυνατούν όλο και περισσότερο να ωφεληθούν από την WPT. Επιπλέον, οι απώλειες κατά τη μεταφορά ενέργειας επιδρούν και στο τελικό μέσο επίπεδο ενέργειας (Σχήμα 6.13), το οποίο μειώνεται, όσο μειώνεται και η μέση τιμή της απόδοσης.



Σχήμα 6.13: Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος για διαφορετικές αποδόσεις

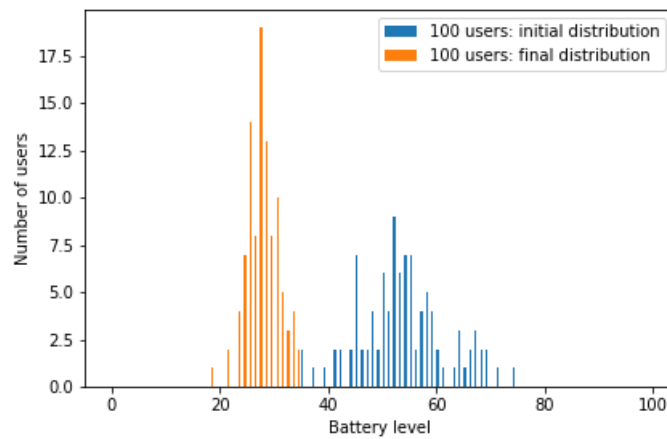
Στη συνέχεια, παρατηρούμε για τους ίδιους λόγους στο Σχήμα 6.14 ότι με τη μείωση της μέσης τιμής της απόδοσης, μειώνεται το τελικό ελάχιστο επίπεδο μπαταρίας στο δίκτυο. Το σύστημα, μάλιστα, αδυνατεί να το αυξήσει σε τιμή μεγαλύτερη της αρχικής όταν πλέον η μέση τιμή της απόδοσης έχει φτάσει το 0.5, δηλαδή χάνεται το 50% της ενέργειας που μεταφέρεται με κάθε WPT.

Σε αυτό τη σημείο ορίζουμε ως πείραμα S_7 , το πείραμα με όλες τις προεπιλεγμένες



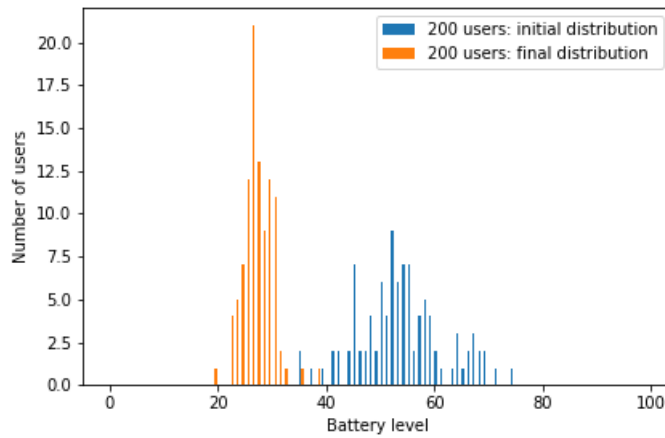
Σχήμα 6.14: Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος για διαφορετικές αποδόσεις

παραμέτρους εκτός της απόδοσης α , η οποία λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0.4, 0.6]$ με βήμα 0.1. Θέλουμε να συγκρίνουμε τις κατανομές ενέργειας που παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.15, 6.16 και 6.17 με αυτές του Σχήματος 6.3, το οποίο απεικονίζει το πείραμα S_1 , με τις παραμέτρους προεπιλογής (δηλαδή, με απόδοση α , η οποία λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0.6, 0.8]$ με βήμα 0.1).

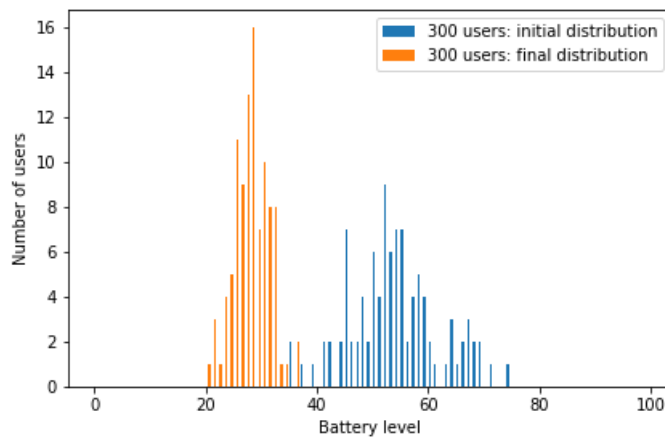


Σχήμα 6.15: Κατανομές ενέργειας για το πείραμα S_7 , σε δίκτυο 100 συσκευών

Παρατηρούμε στα Σχήματα με το πείραμα S_7 , πως η τελική κατανομή είναι πιο απλωμένη σε σχέση με του S_1 . Είναι, όμως, πιο ευδιάκριτο πως πρόκειται για κανονική κατανομή, επομένως η πλειονότητα των χρηστών θα έχουν τιμή επιπέδου μπαταρίας κοντά στη μέση τιμή στο τέλος της προσομοίωσης. Επιπροσθέτως, οι τελικές κατανομές του S_7 , είναι περισσότερο μετατοπισμένες αριστερά και η επικάλυψη με τις



Σχήμα 6.16: Κατανομές ενέργειας για το πείραμα S_7 , σε δίκτυο 200 συσκευών



Σχήμα 6.17: Κατανομές ενέργειας για το πείραμα S_7 , σε δίκτυο 300 συσκευών

αρχικές κατανομές είναι μικρότερη. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς μικρότερη απόδοση κατά την WPT, συνεπάγεται μικρότερο ποσό ενέργειας να φτάνει στον δέκτη σε κάθε WPT και επομένως περισσότερες απωλίες. Παρόλα αυτά, το σύστημα φαίνεται να τις διαχειρίζεται ικανοποιητικά.

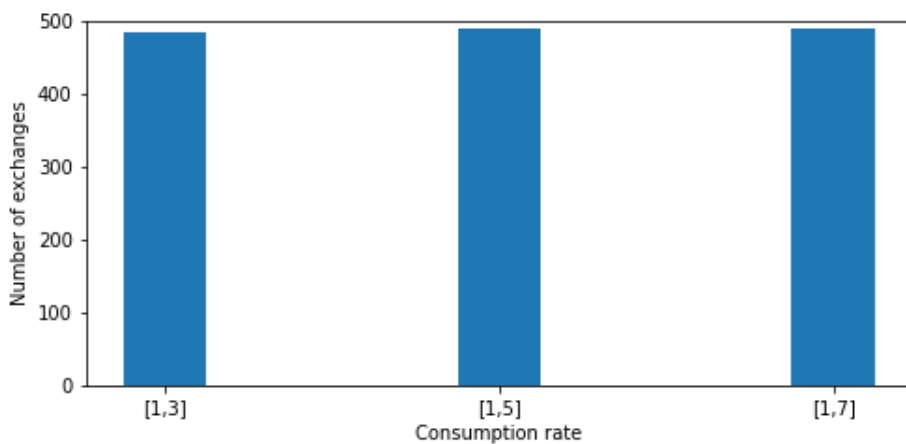
6.7 Ρυθμός Κατανάλωσης Μπαταρίας

Λόγω της ετερογένειας του δικτύου, δεν υπάρχει μία μοναδική τιμή ρυθμού κατανάλωσης στο μοντέλο. Μεταβάλλουμε, λοιπόν, το διάστημα του πεδίου τιμών του ρυθμού κατανάλωσης, το οποίο υπενθυμίζουμε ότι ακολουθεί κανονική κατανομή. Ο ρυθμός κατανάλωσης εκφράζει την απώλεια μονάδων ενέργειας (ως ποσοστό της συ-

βολικής μπαταρίας) ανά γύρο ανταλλαγών WPT, δηλαδή, ανά timestep. Εξετάζουμε πώς ανταποκρίθηκε το μοντέλο λαμβάνοντας τιμές από τα εξής διαφορετικά διαστήματα τιμών ρυθμού κατανάλωσης κατά την ανταλλαγή ενέργειας:

- $\alpha = \{[1, 3], [1, 5], [1, 7]\}$, με βήμα 1

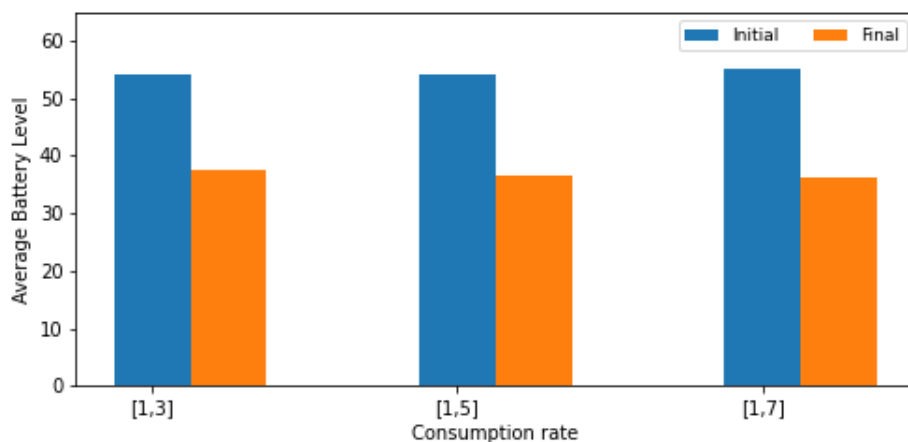
Παρατηρούμε στο Σχήμα 6.18 πως όσο αυξάνεται η μέση τιμή του ρυθμού κατανάλωσης, φαίνεται να αυξάνονται ελαφρώς και οι ανταλλαγές ενέργειας στις προσομοιώσεις. Αυτό, εξαντλεί τους πόρους του δικτύου, όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 6.19 που μας δείχνει πως όσο αυξάνεται ο μέσος ρυθμός κατανάλωσης, τόσο μειώνεται η συνολική μέση ενέργεια του δικτύου, όπως είναι αναμενόμενο.



Σχήμα 6.18: Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας για διαφορετικούς ρυθμούς κατανάλωσης

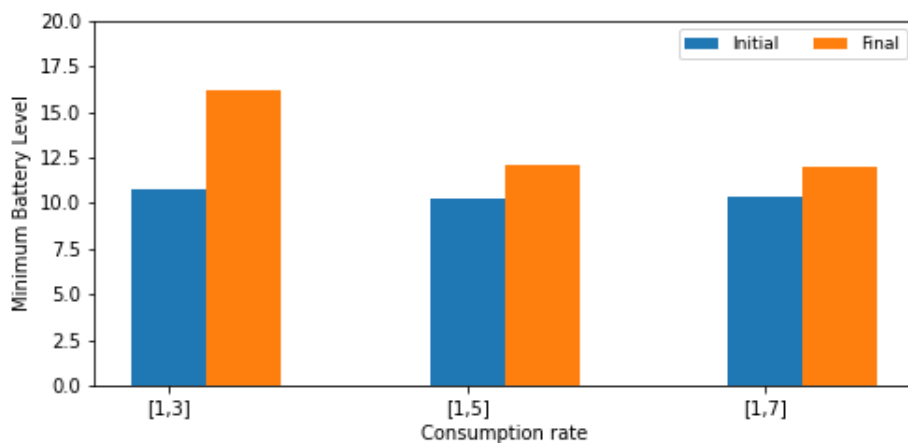
Οι αυξημένοι ρυθμοί κατανάλωσης αναπαριστούν τους χρήστες που καταναλώνουν την μπαταρία τους πιο γρήγορα σε σχέση με το “μέσο χρήστη”. Παρόλα αυτά, οι απώλειες λόγω κατανάλωσης δεν είναι τόσο μεγάλες και λόγω της κανονικής κατανομής που ακολουθεί το μέγεθος αυτό, θα είναι λιγότεροι οι χρήστες με τη μέγιστη κατανάλωση, σε σχέση με τους χρήστες με τη μέση τιμή του ρυθμού κατανάλωσης. Επιπλέον, κανονική κατανομή ακολουθούν και οι αρχικές τιμές των επιπέδων ενέργειας, καθιστώντας τους χρήστες με ελάχιστη ενεργειακή στάθμη στις συσκευές τους στην αρχή της προσομοίωσης και ταυτόχρονα μέγιστο ρυθμό κατανάλωσης, ολιγάριθμους. Αυτά, σε συνδυασμό με το ότι ο ρυθμός κατανάλωσης είναι κατά μέσο όρο μικρότερος από το ρυθμό με τον οποίο οι συσκευές μπορούν να αναπληρώσουν ενέργεια μέσω WPT, αποτελούν τα αίτια που το σύστημα δεν φαίνεται να αποκλείει χρήστες από τις ανταλλαγές. Επιπλέον, όσο αυξάνεται η μέση τιμή του ρυθμού κατανάλωσης, οι χρήστες χάνουν ενέργεια με αυξανόμενο ρυθμό και δημιουργείται συνεχώς ανάγκη για αναπλήρωση ενέργειας μέσω WPT.

Όσο αυξάνεται, λοιπόν, ο μέσος όρος του ρυθμού κατανάλωσης, τόσο μειώνεται ο ρυθμός με τον οποίο οι συσκευές αναπληρώνουν ενέργεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το σύστημα να δυσκολεύεται να αυξήσει το ελάχιστο επίπεδο ενέργειας και ως εκ



Σχήμα 6.19: Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος για διαφορετικούς ρυθμούς κατανάλωσης

τούτου, τον χρόνο ζωής του (Σχήμα 6.20). Αξιοσημείωτο είναι πάντως, πως κατά την αύξηση της μέσης κατανάλωσης από 2.5 σε 3.5 μονάδες ανά ανταλλαγή, το τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας μειώθηκε μόλις 0.2 μονάδες επί της συνολικής μπαταρίας, κάτι που αποδεικνύει την επάρκεια του συστήματος που προτείνουμε.



Σχήμα 6.20: Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος για διαφορετικούς ρυθμούς κατανάλωσης

6.8 Βάρη του δείκτη προτίμησης

Για να εξετάσουμε σε βάθος το ρόλο των βαρών του δείκτη προτίμησης και την επίδραση καθενός από αυτά στο σύστημα, επιλέγουμε στα πειράματα που ακολουθούν διαφορετικούς συνδυασμούς τιμών. Αρχικά, υπενθυμίζουμε στον αναγνώστη, τη συνάρτηση από την οποία προκύπτει ο δείκτης προτίμησης ενός χρήστη u , για έναν ομότιμο χρήστη του δικτύου v , στο timestep i :

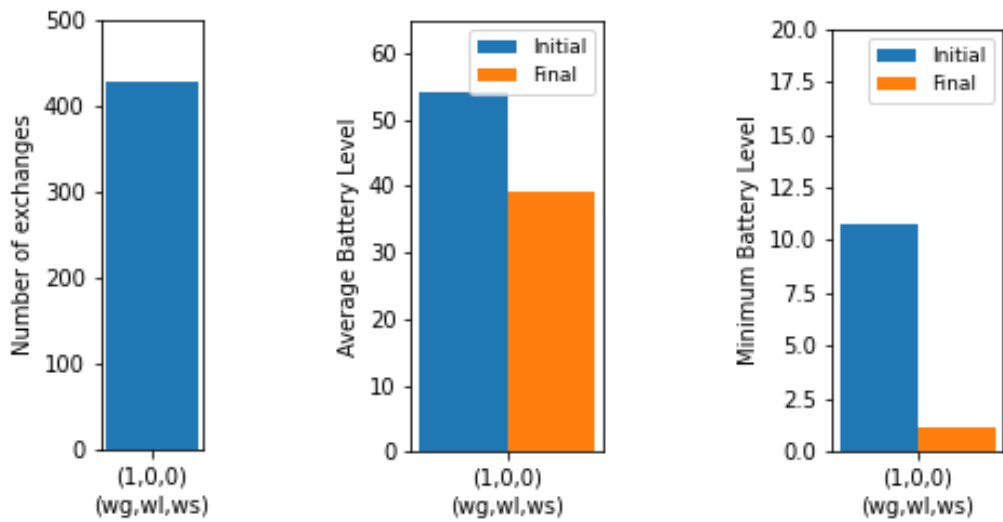
$$PL_i(u, v) = w_g g_i^{norm}(u, v) + w_l LS_i(u, v) + w_s MT(u, v) \quad (6.1)$$

Αναλυτικά, το βάρος w_g , αναφέρεται ως βάρος κέρδους, καθώς είναι ο συντελεστής της παραμέτρου του κανονικοποιημένου ενεργειακού κέρδους που δύναται να αποκομίσει ο χρήστης u , από τον v . Το βάρος w_l , του συντελεστή του link stability που αντικατοπτρίζει το μέτρο της βεβαιότητας συνάντησης των δύο χρηστών. Επιπλέον, το βάρος w_s , ο συντελεστής του μέτρου εμπιστοσύνης (measure of trust) που αντιπροσωπεύει το κατά πόσο εμπιστεύεται ο u τον v , αναφέρεται ως βάρος εμπιστοσύνης. Οι συνδυασμοί τιμών που έλαβαν τα βάρη στα πειράματα της παρούσας ενότητας είναι οι εξής:

$$(w_g, w_l, w_s) \in \{(1, 0, 0), (0.4, 0.4, 0.2), (0.4, 0.2, 0.4), (0.2, 0.4, 0.4), (0, 1, 0), (0, 0, 1), (0.33, 0.33, 0.33)\} \quad (6.2)$$

Θα αναφερθούμε στα πειράματα ξεχωριστά, παρουσιάζοντας τα διαγράμματα του αριθμού ανταλλαγών ενέργειας, της μέσης ενέργειας στο σύστημα και του μέσου ελαχίστου επιπέδου μπαταρίας στην αρχή και μετά το πέρας κάθε προσομοίωσης. Επιπλέον, παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις της κατανομής ενέργειας για κάθε πείραμα, στην αρχή και στο τέλος των ανταλλαγών.

Θα ξεκινήσουμε την ανάλυση των αποτελεσμάτων με το πείραμα με συνδυασμό βαρών $(w_g, w_l, w_s) = (1, 0, 0)$, δηλαδή το πείραμα κατά το οποίο οι χρήστες κατατάσσουν τα πιθανά ζεύγη τους αυστηρά με βάση μόνο το πιθανό ενεργειακό όφελος. Το κέρδος των χρηστών που εξετάζεται πριν από τον αλγόριθμο αντιστοίχισης είναι ανάλογο της απόδοσης. Οι χρήστες με υψηλές αποδόσεις βρίσκονται στην κορυφή της λίστας προτίμησης όλων των χρηστών, ενώ αυτοί με τις χαμηλές κατατάσσονται τελευταίοι σε όλες τις λίστες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα χρήστες με χαμηλή τιμή απόδοσης, να αντιστοιχίζονται πιο δύσκολα και στην περίπτωση που δεν καταφέρουν να βρουν ταίριασμα, η ενεργειακή τους στάθμη να μειώνεται περαιτέρω, λόγω της κατανάλωσης της μπαταρίας που γίνεται στη συσκευή τους. Επιπλέον, καθώς με το πέρας των ανταλλαγών οι χρήστες με την υψηλή απόδοση μεταφέρουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από αυτούς οι οποίοι έχουν χαμηλή απόδοση, πιθανώς στους τελευταίους γύρους οι συσκευές οι οποίες ανταλλάσσουν ενέργεια να έχουν παραπλήσια αποθέματα, οδηγώντας κάποια στιγμή τους χρήστες με χαμηλή απόδοση στο ελάχιστο επίπεδο ενέργειας, αφού την αναπληρώνουν με μικρότερο ρυθμό.

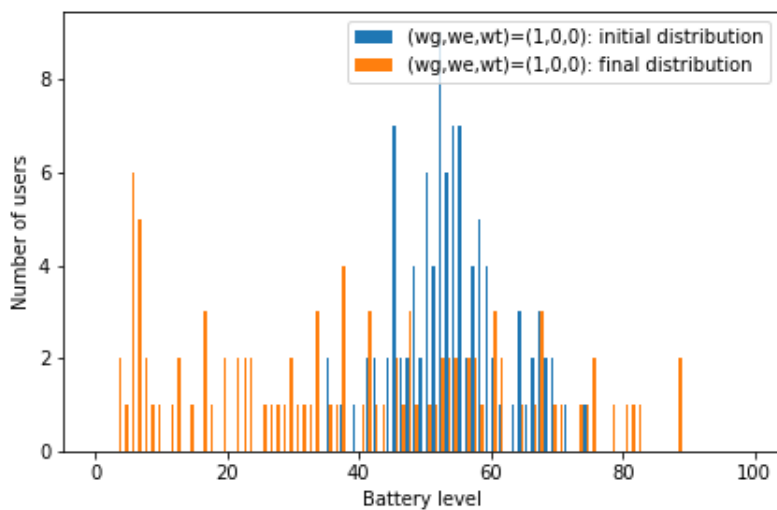


(α) Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας

(β) Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας

(γ) Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας

Σχήμα 6.21: Αποτελέσματα για $(w_g, w_l, w_s) = (1, 0, 0)$

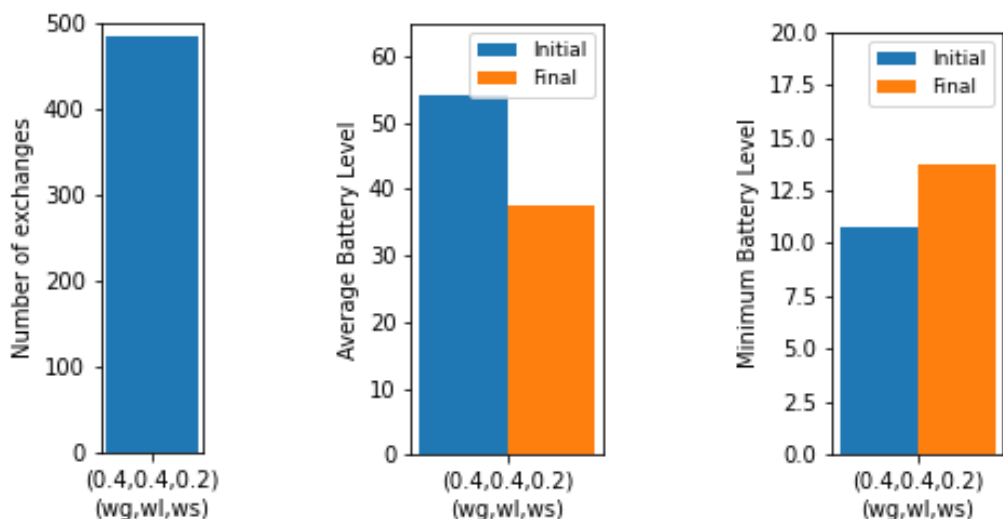


Σχήμα 6.22: Κατανομή ενέργειας στο δίκτυο για το πείραμα με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (1, 0, 0)$

Αυτά επιβεβαιώνουμε παρατηρώντας στο Σχήμα 6.21α' πως ο αριθμός των ανταλλαγών ενέργειας εμφανίζεται μειωμένος. Ακολουθεί το Σχήμα 6.21β', στο οποίο η τελική μέση ενέργεια του συστήματος εμφανίζεται από τις υψηλότερες σε σχέση με τα υπόλοιπα πειράματα της ενότητας. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς μειώνονται οι

απώλειες κατά τη μεταφορά ενέργειας. Σύμφωνα, όμως με το Σχήμα 6.22 το σύστημα φαίνεται να αδυνατεί να αυξήσει το ελάχιστο επίπεδο ενέργειας, παρουσιάζοντας απώλεια 9.7% επί της συνολικής μπαταρίας στο τελικό επίπεδο ενέργειας, το οποίο είναι το χαμηλότερο από όλα όσα έχουμε συναντήσει μέχρι στιγμής.

Τέλος, παρατηρούμε την κατανομή ενέργειας στο δίκτυο στο Σχήμα 6.22. Η μικρή τιμή της τυπικής απόκλισης είναι ενδεικτική μεγάλης διακαιότητας της κατανομής και αντιστρόφως. Στο πείραμα, η τελική κατανομή εμφανίζεται πολύ περισσότερο απλωμένη από την αρχική, με αρκετές συσκευές, μάλιστα, να έχουν χαμηλές τιμές μπαταρίας. Αυτό σημαίνει πως, ο διαμοιρασμός ενέργειας δεν γίνεται με δίκαιο τρόπο καθώς τελικά υπάρχουν λίγοι χρήστες με υψηλή ενεργειακή στάθμη και πολλοί χρήστες με μειωμένη ενεργειακή στάθμη στην μπαταρία της συσκευής τους. Όταν, λοιπόν, η αντιστοίχιση των χρηστών σε ζεύγη γίνεται αυστηρά με ενεργειακά οφελιμιστικά κριτήρια, εν τέλει, αυξάνεται η ενεργειακή ψαλίδα στο σύστημα. Δηλαδή, ούτε η πλειονότητα των χρηστών ωφελείται από την ανταλλαγή ενέργειας, ούτε το δίκτυο επιτυγχάνει την επέκταση του χρόνου ζωής του.



(α') Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας

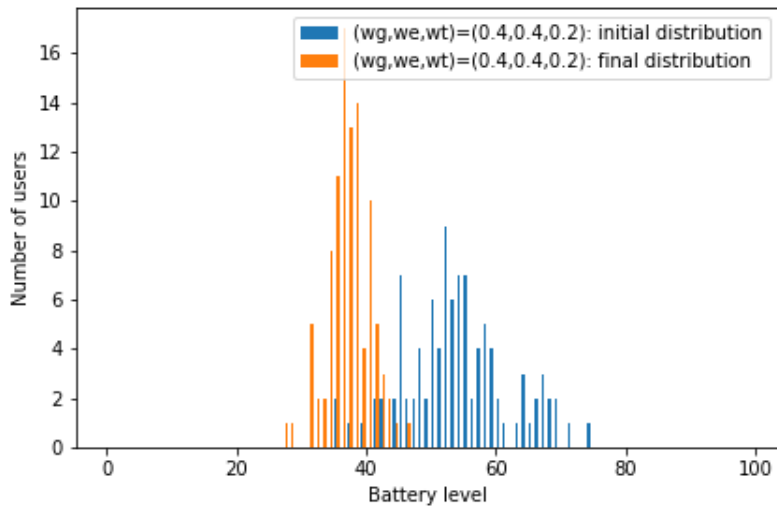
(β') Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας

(γ') Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας

Σχήμα 6.23: Αποτελέσματα για $(w_g, w_l, w_s) = (0.4, 0.4, 0.2)$

Προχωράμε σχολιάζοντας το πείραμα με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (0.4, 0.4, 0.2)$, δηλαδή αυτό κατά το οποίο η κατάταξη των χρηστών στις λίστες προτίμησης γίνεται ισάξια για τα κριτήρια του ενεργειακού κέρδους και του link stability, ενώ λαμβάνεται λιγότερο υπ' όψιν το μέτρο εμπιστοσύνης μεταξύ του πιθανού ζεύγους ανταλλαγής ενέργειας.

Παρατηρούμε υψηλό αριθμό ανταλλαγών (Σχήμα 6.23α') ως εκ τούτου μειωμένη μέση ενέργεια στο δίκτυο μετά το πέρας της προσομοίωσης (Σχήμα 6.23β'). Το ελάχιστο επίπεδο μπαταρίας στο δίκτυο, παρουσιάζεται αυξημένο σε σχέση με το



Σχήμα 6.24: Κατανομή ενέργειας στο δίκτυο για το πείραμα με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (0.4, 0.4, 0.2)$

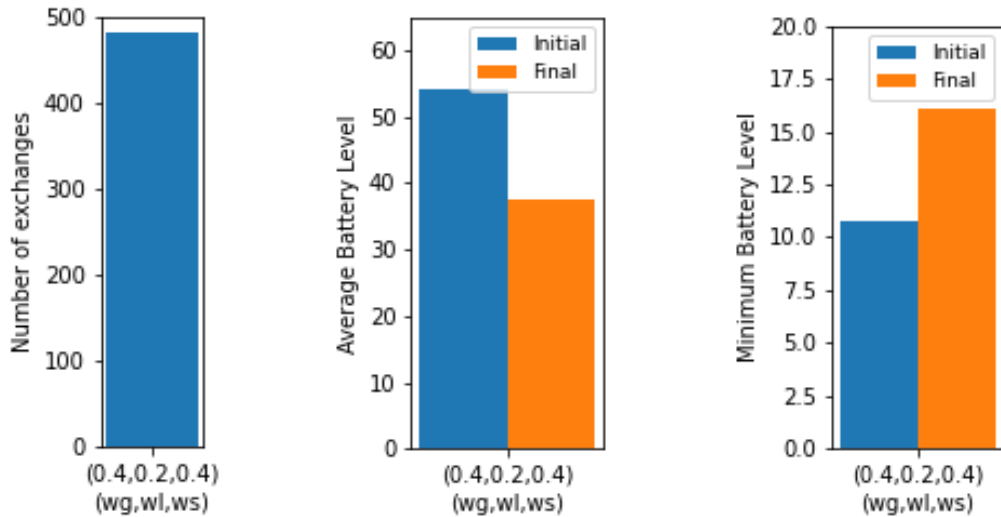
αρχικό (Σχήμα 6.23γ'), κατά 3.6% της συνολικής μπαταρίας, αρκετά καλό σε σχέση με όσα έχουμε παρατηρήσει μέχρι στιγμής.

Εξετάζοντας το γράφημα που απεικονίζει την κατανομή ενέργειας στο δίκτυο (Σχήμα 6.24), παρατηρούμε καλύτερη συμπεριφορά του συστήματος ως προς τη δικαιοσύνη του διαμοιρασμού ενέργειας, όχι βέλτιστη όμως. Η τελική κατανομή εμφανίζεται πιο στενή, δηλαδή, έχει περιοριστεί το εύρος τιμών μπαταρίας στο δίκτυο, μάλιστα φαίνεται λίγοι χρήστες να έχουν ακραίες τιμές επιπέδων μπαταρίας. Επιπλέον, η καμπύλη είναι μετατοπισμένη προς τα αριστερά, λόγω της μείωσης της μέσης ενέργειας του δικτύου.

Το επόμενο πείραμα είναι αυτό με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (0.4, 0.2, 0.4)$, δηλαδή αυτό κατά το οποίο η κατάταξη των χρηστών στις λίστες προτίμησης γίνεται ισάξια για τα κριτήρια του ενεργειακού κέρδους και του μέτρου εμπιστοσύνης, ενώ λαμβάνεται λιγότερο υπ' όψιν το link stability των χρηστών. Παρατηρούμε και πάλι υψηλό αριθμό ανταλλαγών (Σχήμα 6.25α'), που επιδρά σε μειωμένη μέση ενέργεια στο δίκτυο μετά το πέρας της προσομοίωσης (Σχήμα 6.25β'). Το ελάχιστο επίπεδο μπαταρίας στο δίκτυο, παρουσιάζεται αρκετά αυξημένο σε σχέση με το αρχικό (Σχήμα 6.25γ'), με αύξηση κατά 4.5% της συνολικής μπαταρίας. Η αύξηση που παρατηρείται είναι πολύ ικανοποιητική, ως η τρίτη υψηλότερη μεταξύ των προσομοιώσεων.

Παρατηρώντας το γράφημα που απεικονίζει την κατανομή ενέργειας στο δίκτυο (Σχήμα 6.26), παρατηρούμε σχετικά καλή συμπεριφορά του συστήματος ως προς τη δικαιοσύνη του διαμοιρασμού ενέργειας. Η τελική κατανομή (Σχήμα 6.24) εμφανίζεται και πάλι πιο στενή, δηλαδή, έχει περιοριστεί το εύρος τιμών μπαταρίας στο δίκτυο, με σχετικά λίγους χρήστες να έχουν ακραίες τιμές επιπέδων μπαταρίας, ωστόσο η καμπύλη απλώνεται λίγο περισσότερο προς τα αριστερά, δηλαδή υπάρχουν περισσότεροι

χρήστες που καταλήγουν με το ελάχιστο επίπεδο μπαταρίας στο τέλος της προσομοίωσης.

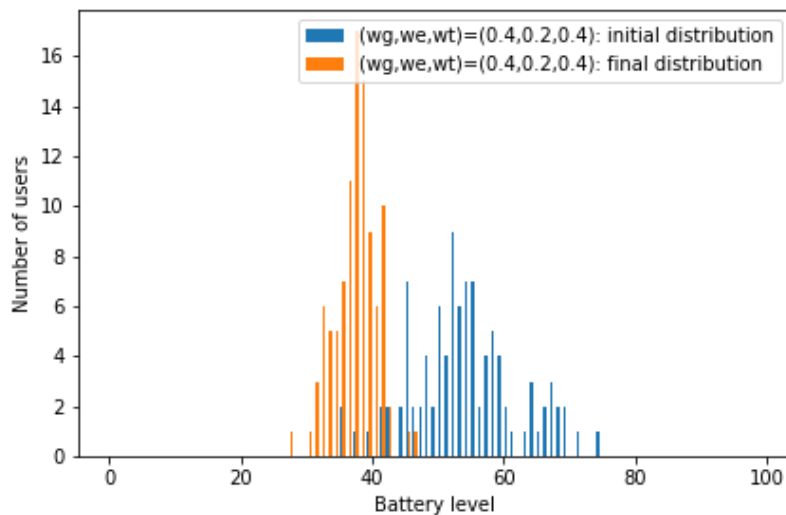


(α') Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας

(β') Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας

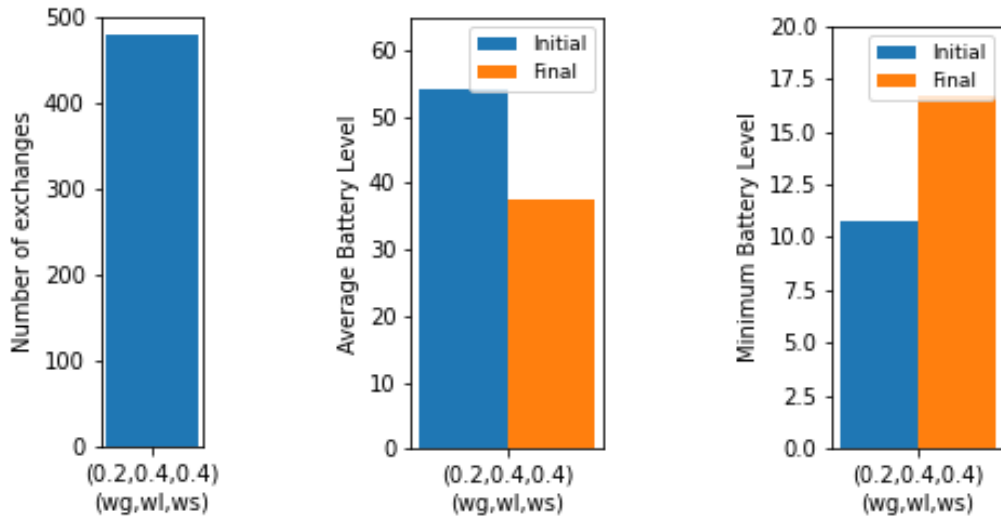
(γ') Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας

Σχήμα 6.25: Αποτελέσματα για $(w_g, w_l, w_s) = (0.4, 0.2, 0.4)$



Σχήμα 6.26: Κατανομή ενέργειας στο δίκτυο για το πείραμα με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (0.4, 0.2, 0.4)$

Στη συνέχεια, σχολιάζουμε το πείραμα με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (0.2, 0.4, 0.4)$, δηλαδή αυτό κατά το οποίο η κατάταξη των χρηστών στις λίστες προτίμησης γίνεται

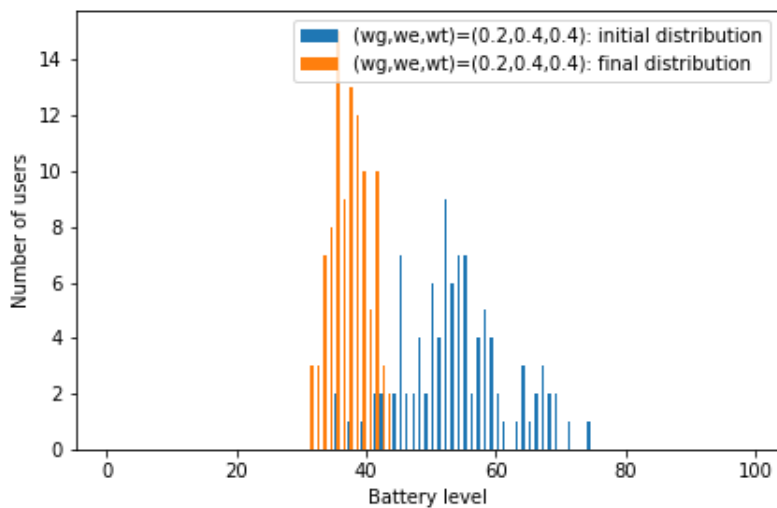


(α) Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας

(β) Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας

(γ) Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας

Σχήμα 6.27: Αποτελέσματα για $(w_g, w_l, w_s) = (0.2, 0.4, 0.4)$

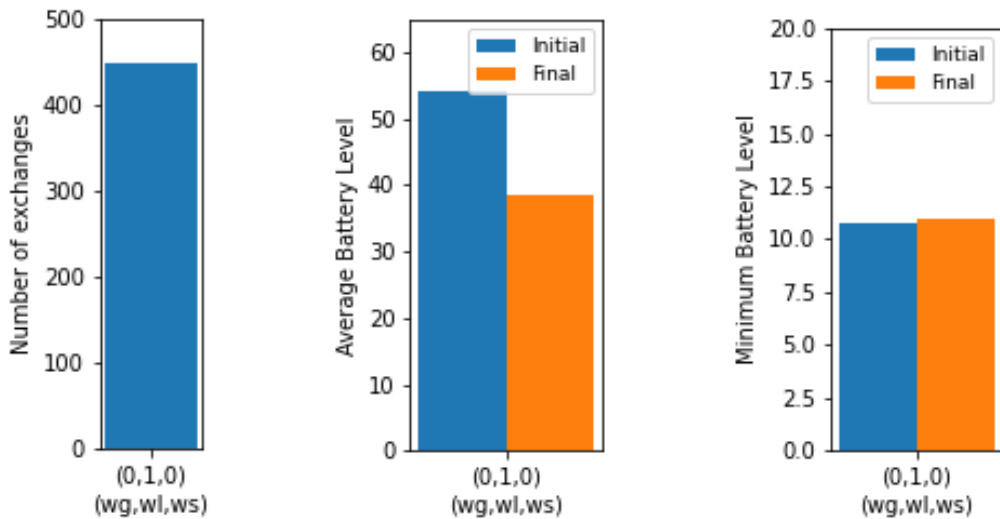


Σχήμα 6.28: Κατανομή ενέργειας στο δίκτυο για το πείραμα με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (0.2, 0.4, 0.4)$

ισάζια για τα κριτήρια του μέτρου εμπιστοσύνης και του link stability και λαμβάνεται λιγότερο υπ' όψιν το ενεργειακό όφελος της WPT. Παρατηρούμε και πάλι υψηλό αριθμό ανταλλαγών (Σχήμα 6.27α') και μειωμένη μέση ενέργεια στο δίκτυο μετά το πέρας της προσομοίωσης (Σχήμα 6.27β'). Το ελάχιστο επίπεδο μπαταρίας στο δίκτυο, παρουσιάζει μέγιστη αύξηση σε σχέση με το αρχικό (Σχήμα 6.27γ'), κατά 7.1% της συνολικής μπαταρίας.

Βλέποντας το γράφημα που απεικονίζει την κατανομή ενέργειας στο δίκτυο (Σχήμα 6.28), παρατηρούμε πολύ καλή συμπεριφορά του συστήματος ως προς τη δικαιοσύνη του διαμοιρασμού ενέργειας. Η κατανομή εμφανίζεται πιο μαζεμένη και οι κεντρικές τιμές της παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. Δηλαδή, καταλήγουμε με περιορισμένο εύρος τιμών μπαταρίας στο δίκτυο και τους περισσότερους χρήστες τελικά να έχουν κοινή στάθμη μπαταρίας στις συσκευές τους. Συμπερασματικά, το σύστημα έχει εξαιρετική απόδοση με αυτό τον συνδυασμό βαρών και επιτυγχάνει να επεκτείνει αρκετά το χρόνο ζωής του.

Προβαίνουμε στο σχολιασμό του πειράματος με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (0, 1, 0)$, δηλαδή αυτό κατά το οποίο η κατάταξη των χρηστών στις λίστες προτίμησης γίνεται αυστηρά και μόνο με βάση το link stability, το οποίο εκφράζει το μέτρο της βεβαιότητας συνάντησης δύο χρηστών ως κριτήριο για WPT. Ο αριθμός ανταλλαγών ενέργειας εμφανίζεται μειωμένος (Σχήμα 6.29α') και η τελική μέση ενέργεια στο δίκτυο ελαφρώς αυξημένη (Σχήμα 6.29β'), όπως αναμένουμε καθώς περιορίζονται οι απώλειες λόγω μεταφοράς ενέργειας. Το ελάχιστο επίπεδο μπαταρίας στο δίκτυο, είναι αυξημένο ελάχιστα, κοντά στο αρχικό (Σχήμα 6.29γ').

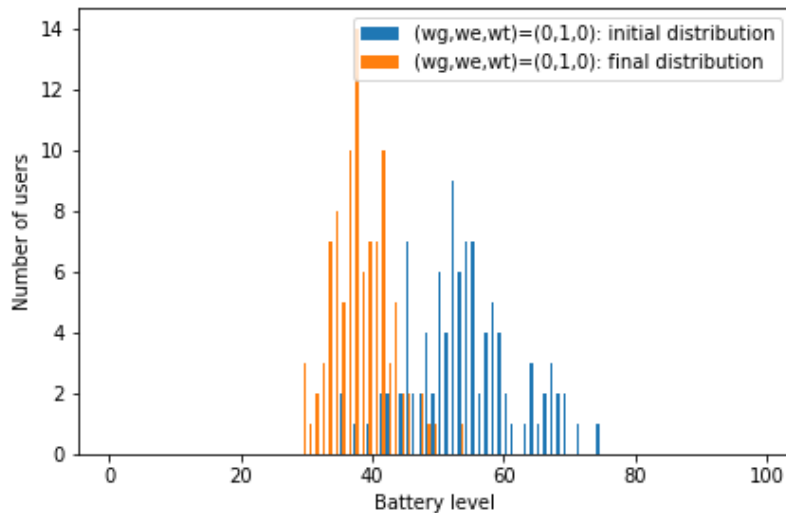


(α') Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας

(β') Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας

(γ') Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας

Σχήμα 6.29: Αποτελέσματα για $(w_g, w_l, w_s) = (0, 1, 0)$



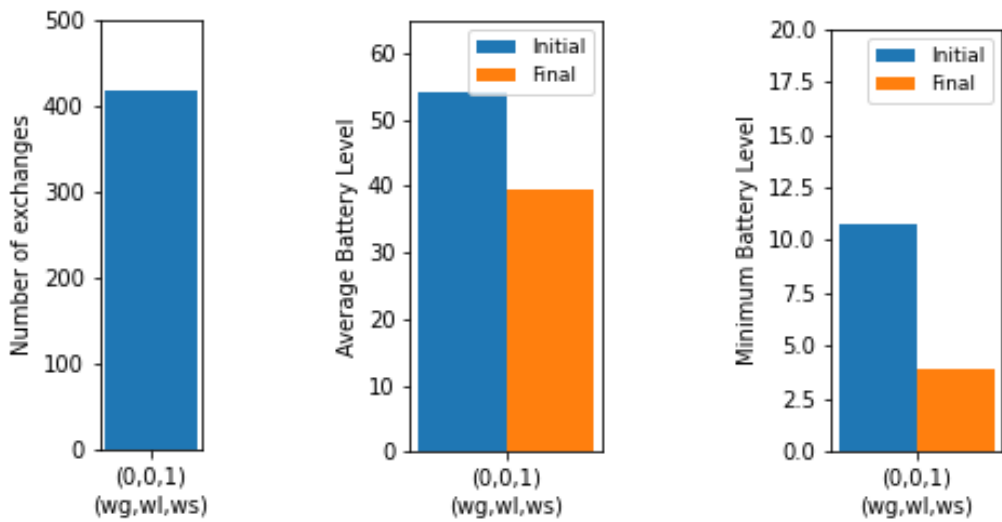
Σχήμα 6.30: Κατανομή ενέργειας στο δίκτυο για το πείραμα με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (0,1,0)$

Τέλος, παρατηρούμε την γραφική παράσταση της κατανομής ενέργειας στο δίκτυο στο Σχήμα 6.30, όπου βλέπουμε πως η τελική κατανομή στενεύει μεν, όχι πολύ δε. Φαίνεται όντως να περιορίζεται κάπως το εύρος τιμών της τελικής μπαταρίας των χρηστών και παρατηρούμε οι δύο κατανομές να επικαλύπτονται αρκετά, λόγω της αυξημένης μέσης ενέργειας που υπάρχει τελικά στο δίκτυο.

Όταν, λοιπόν, η αντιστοίχιση των χρηστών σε ζεύγη γίνεται αυστηρά με βάση το link stability, το μέτρο της βεβαιότητας συνάντησης των χρηστών, το ταίριασμα δεν είναι βέλτιστο. Πολλές πιθανές ανταλλαγές περιορίζονται και αυτές που γίνονται δεν αρκούν για να διαμοιραστεί αρκετά δίκαια η ενέργεια στο δίκτυο, χωρίς να είναι κακή η απόκριση του μοντέλου. Εν τέλει, ούτε οι χρήστες ωφελούνται τα μέγιστα από την ανταλλαγή ενέργειας, ούτε και το δίκτυο επιτυγχάνει ικανοποιητική επέκταση του χρόνου ζωής του.

Στη συνέχεια, αναλύουμε τα αποτελέσματα του πειράματος με τιμές βαρών $(w_g, w_l, w_s) = (0, 0, 1)$, δηλαδή την προσομοίωση εκείνη κατά την οποία η κατάταξη των χρηστών στις λίστες προτίμησης γίνεται αυστηρά και μόνο με βάση το μέτρο εμπιστοσύνης, το οποίο αντικατοπτρίζει την προθυμία των χρηστών να ανταλλάξουν ενέργεια, στην παρούσα εργασία.

Ο αριθμός ανταλλαγών ενέργειας είναι ο ελάχιστος (Σχήμα 6.31α') και η τελική μέση ενέργεια στο δίκτυο η μέγιστη (Σχήμα 6.31β'), καθώς περιορίζονται κατά πολύ οι απώλειες λόγω WPT. Το τελικό ελάχιστο επίπεδο μπαταρίας στο δίκτυο, βέβαια είναι το δεύτερο μικρότερο και το σύστημα δεν καταφέρνει να πετύχει αύξησή του σε σχέση με το αρχικό ελάχιστο επίπεδο μπαταρίας με απώλεια κατά 6.3 μονάδες (Σχήμα 6.31γ'), κάτι που είναι ενδεικτικό όχι καλής λειτουργίας του συστήματος.

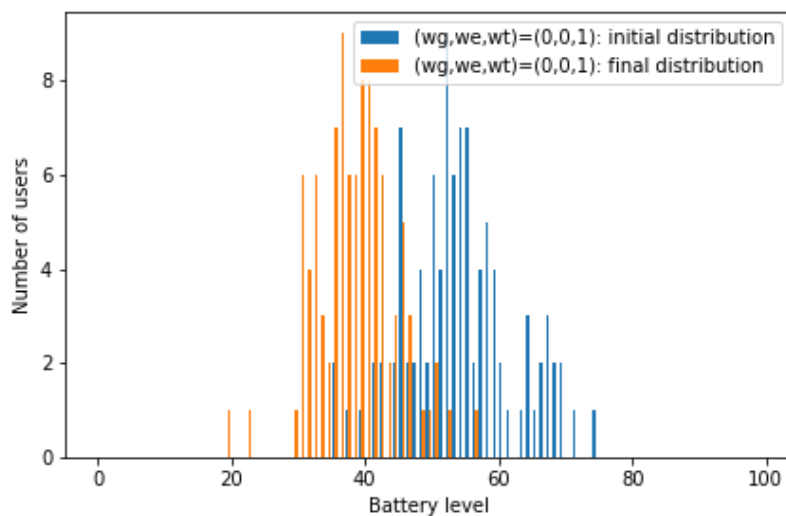


(α) Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας

(β) Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας

(γ) Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας

Σχήμα 6.31: Αποτελέσματα για $(w_g, w_l, w_s) = (0, 0, 1)$



Σχήμα 6.32: Κατανομή ενέργειας στο δίκτυο για το πείραμα με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (0, 0, 1)$

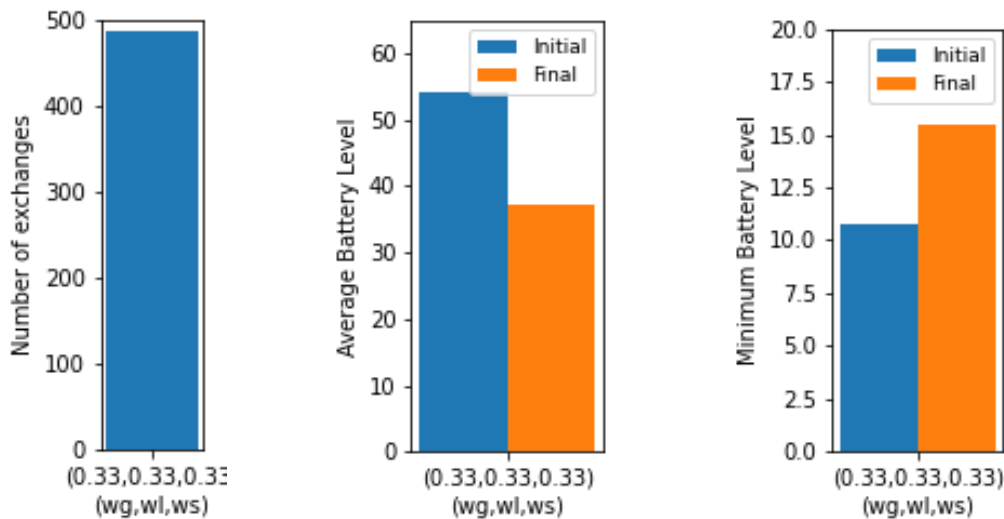
Παρατηρώντας την γραφική παράσταση της κατανομής ενέργειας στο δίκτυο στο Σχήμα 6.32, βλέπουμε πως πράγματι η τελική κατανομή έχει μετατοπιστεί απλώς αριστερά, λόγω της απώλειας ενέργειας στο σύστημα, χωρίς έχει αλλάξει σημαντικά τη μορφή της. Το χάσμα στα επίπεδα ενέργειας των συσκευών φαίνεται να έχει μειωθεί

ελάχιστα. Ως εκ τούτου ο διαμοιρασμός ενέργειας δεν μπορεί να χαρακτηριστεί δίκαιος.

Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς όταν οι χρήστες κατατάσσονται στις λίστες προτίμησης με βάση το μέτρο εμπιστοσύνης, ουσιαστικά, από την άποψη του συστήματος, εξασφαλίζεται ότι οι χρήστες θα είναι πιο πρόθυμοι να ανταλλάξουν ενέργεια, όμως δεν εξετάζονται καθόλου χωρικά κριτήρια ή κριτήρια με βάση το ενεργειακό όφελος που θα μπορούσαν οι χρήστες να αποκομίσουν, ούτε λαμβάνεται υπ' όψιν τελικά αν θα ωφεληθεί το σύστημα από τις ανταλλαγές. Παρά την επικάλυψη των δύο κατανομών, παρατηρούμε στα άκρα της καμπύλης πως υπάρχουν τόσο χρήστες με υψηλές τιμές επιπέδου μπαταρίας, όσο και χρήστες με χαμηλές τιμές σε σχέση με τη μέση τιμή μπαταρίας στο δίκτυο, που σημαίνει ότι το δίκτυο δεν καταφέρνει να επεκτείνει σημαντικά τον χρόνο ζωής του.

Το τελευταίο πείραμα αυτής της υποενότητας είναι αυτό με τιμές βαρών $(w_g, w_l, w_s) = (0.33, 0.33, 0.33)$, δηλαδή αυτό κατά το οποίο οι τρεις παράμετροι της λίστας προτίμησης συμμετέχουν ισότιμα στη διαμόρφωση του δείκτη προτίμησης και στην κατάταξη των χρηστών στις λίστες προτίμησης.

Ο αριθμός ανταλλαγών ενέργειας είναι υψηλός (Σχήμα 6.33α') και ως αποτέλεσμα η τελική μέση ενέργεια στο δίκτυο είναι από τις μικρότερες (Σχήμα 6.33β'), καθώς υπάρχουν πολλές απώλειες λόγω μεταφοράς ενέργειας. Το τελικό ελάχιστο επίπεδο μπαταρίας στο δίκτυο, είναι το δεύτερο μεγαλύτερο, παρουσιάζοντας αύξηση κατά 5.4 μονάδες (Σχήμα 6.33γ'), σε σχέση με το αρχικό. Το σύστημα, λοιπόν, ανταποκρίνεται καλά.

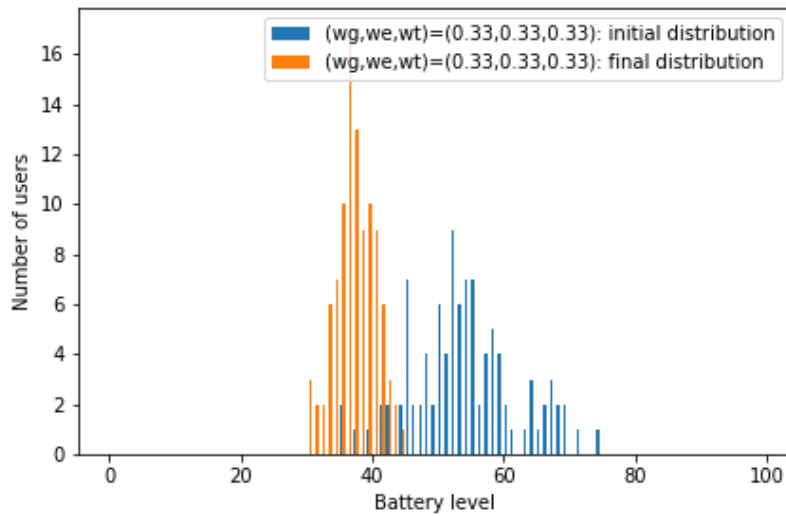


(α') Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας

(β') Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας

(γ') Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας

Σχήμα 6.33: Αποτελέσματα για $(w_g, w_l, w_s) = (0.33, 0.33, 0.33)$



Σχήμα 6.34: Κατανομή ενέργειας στο δίκτυο για το πείραμα με βάρη $(w_g, w_l, w_s) = (0.33, 0.33, 0.33)$

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.34, η τελική κατανομή ενέργειας στο πείραμα αυτό είναι ίσως η καλύτερη που έχει παρατηρηθεί. Παρατηρούμε πως η καμπύλη έχει στενέψει, περιορίζοντας το εύρος τιμών μπαταρίας των συσκευών και άρα η κατανομή μπορεί να χαρακτηριστεί δίκαιη. Επιπλέον, είναι περισσότερο εμφανές, πως η κατανομή είναι κανονική και άρα τα περισσότερα δείγματά της βρίσκονται κοντά στη μέση τελική ενέργεια του δικτύου.

Συνοψίζοντας, σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτής της ενότητας, τα πειράματα που ανταποκρίθηκαν καλύτερα τόσο στην αύξηση του ελάχιστου επιπέδου ενέργειας, όσο και από άποψη δικαιοσύνης στην τελική κατανομή ενέργειας, ήταν αυτά με τιμές βαρών $(w_g, w_l, w_s) = (0.2, 0.4, 0.4), (0.33, 0.33, 0.33), (0.4, 0.2, 0.4)$ και $(0.4, 0.4, 0.2)$. Γενικώς, στα πειράματα που περιλάμβαναν μόνο ένα εκ των τριών κριτηρίων το σύστημα είχε τις χειρότερες επιδόσεις, για λόγους που παρουσιάσαμε αναλυτικά. Αυτό σημαίνει πως είναι απαραίτητη η συνύπαρξη και των τριών κριτηρίων, όπως έχουν διαμορφωθεί στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Καλύτερες τιμές βαρών θεωρούνται αυτές που παρουσιάζουν τη μικρότερη απόκλιση μεταξύ τους.

6.9 Πρωτόκολλο Ανταλλαγής Ενέργειας

Σε αυτή την ενότητα εξετάζουμε το πρωτόκολλο ανταλλαγής ενέργειας, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο καθορίζεται το ποσό ενέργειας E που θα ανταλλάσσεται σε κάθε WPT. Όπως παρουσιάσαμε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5, στην ενότητα 5.8, στο μοντέλο μας το ποσό ενέργειας που μεταφέρεται σε κάθε ανταλλαγή είναι $E = e$. Υπενθυμίζουμε στον αναγνώστη πως για να καθορίσουμε αν θα γίνει η WPT,

εξετάζουμε αν το επίπεδο μπαταρίας του πομπού θα παραμείνει πάνω από το τρέχον ελάχιστο επίπεδο ενέργειας E_{min} στο δίκτυο, μετά την μεταφορά ενέργειας ποσού e . Αν συμβεί αυτό, η μεταφορά πραγματοποιείται, διαφορετικά δεν πραγματοποιείται. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε στην εργασία [48]. Μία διαφορετική προσέγγιση, του πρωτοκόλλου μεταφοράς ενέργειας είναι η εξής:

Έχουμε ορίσει το ποσό ενέργειας e , ως το μέγιστο ποσό που μπορούν να ανταλλάξουν δύο χρήστες u και v σε κάθε WPT. Επίσης, ορίζουμε E_u και E_v τα επίπεδα ενέργειας, δηλαδή, τα ποσοστά επί της μπαταρίας των δύο συσκευών και θεωρούμε χωρίς τη βλάβη της γενικότητας $E_u < E_v$. Ορίζουμε, ακόμα, ένα ελάχιστο επίπεδο ενέργειας E_{min} , κάτω από το οποίο είναι αδύνατο μια συσκευή να λάβει μέρος σε ανταλλαγή ενέργειας ως πομπός. Τέλος, θεωρούμε E_v^{sp} την ενέργεια που μπορεί να ξοδέψει ο χρήστης v (πομπός), μέχρι να φτάσει την ελάχιστη επιτρεπτή ενέργεια E_{min} , δεδομένου ότι $E_v > E_{min}$. Επομένως:

$$E_v^{sp} = E_v - E_{min} \quad (6.3)$$

Τότε, το ποσό ενέργειας που θα μεταφερθεί θα είναι:

$$E = \min(e, E_v^{sp}) \quad (6.4)$$

Με απλά λόγια, στην πρώτη περίπτωση ανταλλάσσεται αυστηρά ενέργεια $E = e$, ενώ στη δεύτερη μπορεί να μεταφερθεί και ποσό ενέργειας μικρότερο του e . Για τα πειράματα που ακολουθούν, έχουμε θέσει $e = 10$.

Διευκρινίζουμε σε αυτό το σημείο τα πειράματα που παρουσιάζονται στα γραφήματα της ενότητας και αναφέρονται ως "Network Setup":

Πείραμα S₁, το πείραμα αυτό έχει όλες τις προεπιλεγμένες παραμέτρους:

- Πλήθος Χρηστών $|U| = 100$
- Πλήθος Τοποθεσιών $|O| = 10$
- Πλήθος Θεματικών Κατηγοριών $k = 5$
- Πλήθος Γύρων $r = 10$
- Απόδοση (efficiency) $\beta = [0.6, 0.8]$ με βήμα 0.1
- Ρυθμός Κατανάλωσης (consumption rate) $\alpha = [1, 3]$ με βήμα 1
- Βάρος Κέρδους $w_g = 0.33$
- Βάρος Link Stability $w_l = 0.33$
- Βάρος Μέτρου Εμπιστοσύνης (measure of trust) $w_s = 0.33$

Πείραμα S₂, το πείραμα αυτό έχει όλες τις προεπιλεγμένες παραμέτρους, που αναφέρθηκαν εκτός του πλήθους χρηστών:

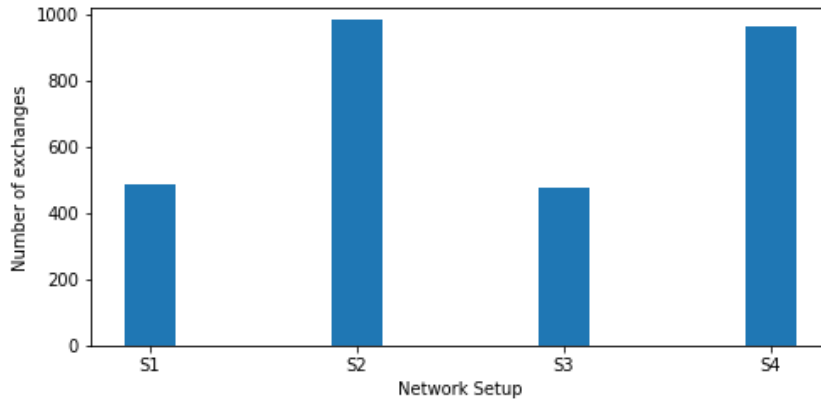
- Πλήθος Χρηστών $|U| = 200$

Πείραμα S₃, το πείραμα αυτό έχει όλες τις προεπιλεγμένες παραμέτρους, που αναφέρθηκαν εκτός του πλήθους τοποθεσιών:

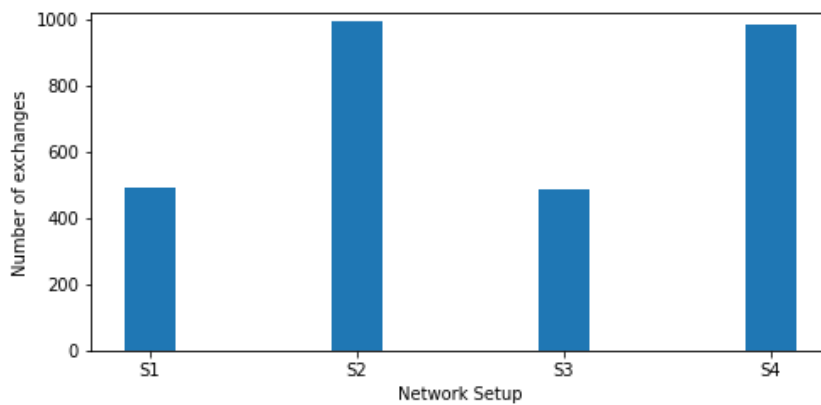
- Πλήθος Τοποθεσιών $|O| = 20$

Πείραμα S₄ το πείραμα αυτό έχει όλες τις προεπιλεγμένες παραμέτρους, που αναφέρθηκαν εκτός του πλήθους γύρων:

- Πλήθος Γύρων $r = 20$



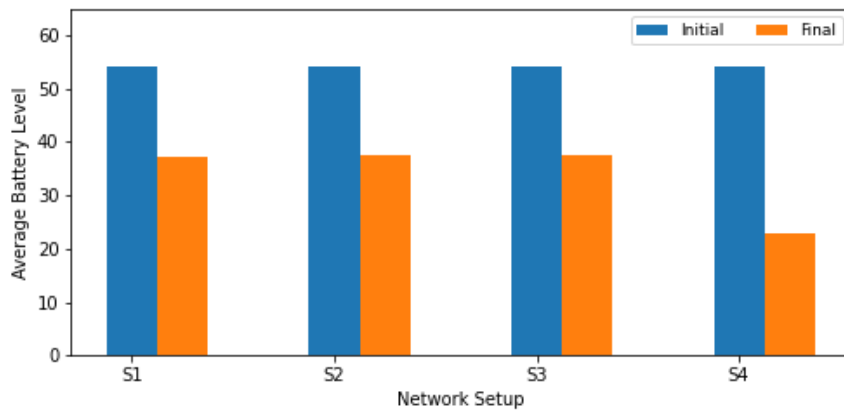
Σχήμα 6.35: Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας με μεταφερόμενη ενέργεια $E = e$



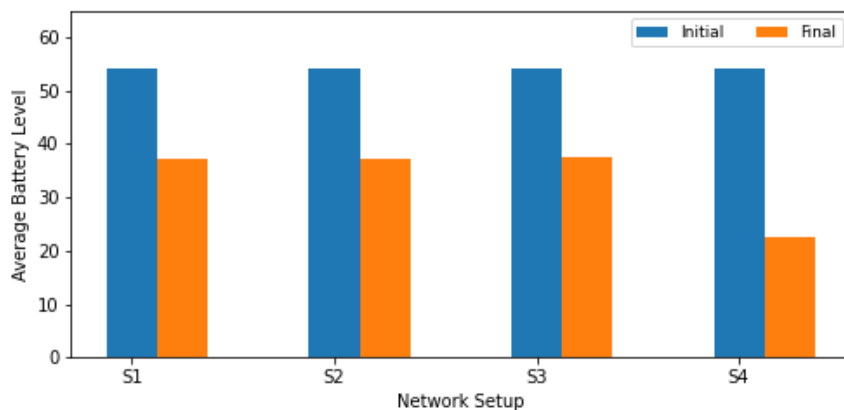
Σχήμα 6.36: Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας με μεταφερόμενη ενέργεια E να λαμβάνει τιμές στο διάστημα $(0, e)$

Παρατηρούμε συγκρίνοντας τα Σχήματα 6.35 και 6.36 πως ο αριθμός ανταλλαγών είναι ελαφρώς αυξημένος στα πειράματα κατά τα οποία η μεταφερόμενη ενέργεια E μπορεί να λαμβάνει τιμές στο διάστημα $(0, e)$. Όπως αναμένουμε, η τελική μέση ενέργεια του συστήματος είναι μειωμένη στα πειράματα αυτά, σε σχέση με τις προσομοιώσεις στις οποίες $E = e$, καθώς περισσότερες ανταλλαγές ισοδυναμούν με μεγαλύτερες απώλειες κατά τη μεταφορά ενέργειας (Σχήματα 6.37 και 6.38).

Παρατηρώντας τα γραφήματα με το ελάχιστο επίπεδο ενέργειας στο δίκτυο στα Σχήματα 6.39 και 6.40, βλέπουμε το τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας στα πειράματα κατά τα οποία η μεταφερόμενη ενέργεια E μπορεί να λαμβάνει τιμές στο διάστημα $(0, e)$ είναι αρκετά χαμηλότερο από ότι τα πειράματα κατά τα οποία $E = e$. Όπως



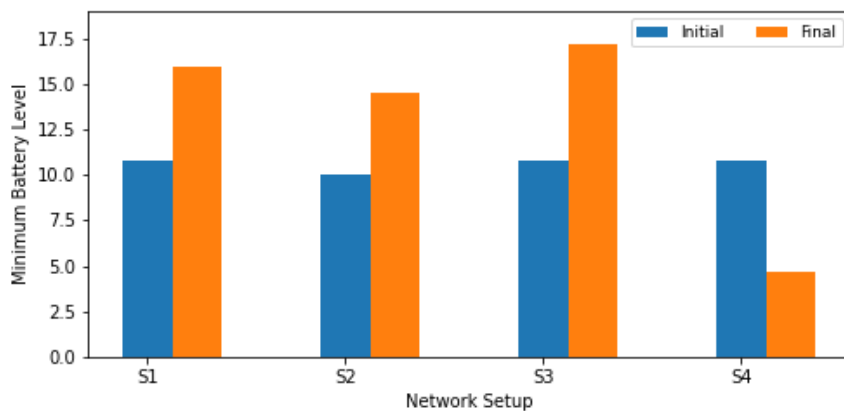
Σχήμα 6.37: Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος με μεταφερόμενη ενέργεια $E = e$



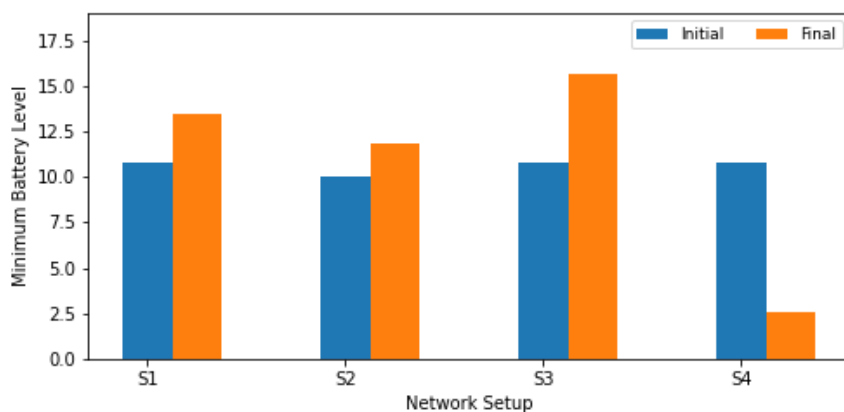
Σχήμα 6.38: Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος με μεταφερόμενη ενέργεια E να λαμβάνει τιμές στο διάστημα $(0, e)$

είναι λογικό, όμως, τα τελικά επίπεδα ενέργειας ακολουθούν την ίδια μονοτονία και στις δύο περιπτώσεις.

Από τα αποτελέσματα που πήραμε, γίνεται αντιληπτό πως για το πρωτόκολλο ανταλλαγής ενέργειας κατά το οποίο $E \in (0, e]$ αυξάνεται ο αριθμός ανταλλαγών και ως εκ τούτου οι απώλειες κατά την WPT. Σαν αποτέλεσμα, η συνολική μέση ενέργεια του συστήματος μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό. Το ελάχιστο επίπεδο μπαταρίας, λοιπόν δεν παρουσιάζει μέγιστη αύξηση. Αυτό, είναι λογικό καθώς στις προσομοιώσεις με $E = e$, απαγορεύουμε κάποιες ανταλλαγές, με αποτέλεσμα να γίνονται οι πραγματικά κερδοφόρες για το σύστημα και το ελάχιστο επίπεδο μπαταρίας, όντως να αυξάνεται. Επομένως, το πρωτόκολλο ανταλλαγής ενέργειας που επιλέξαμε είναι μεταξύ των δύο το βέλτιστο.



Σχήμα 6.39: Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος με μεταφερόμενη ενέργεια $E = e$



Σχήμα 6.40: Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος με μεταφερόμενη ενέργεια E να λαμβάνει τιμές στο διάστημα $(0, e)$

6.10 Αλγόριθμος Αντιστοίχισης

Σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε αναλυτικά την επίδραση του αλγορίθμου που τοποθετεί τους χρήστες του δικτύου σε ζεύγη ανταλλαγής ενέργειας, συγκρίνοντας τον αλγόριθμο του Stable Roommates Problem, με τον Εναλλακτικό Αλγόριθμο Αντιστοίχισης, τους οποίους παρουσιάσαμε στο Κεφάλαιο 5, στην Ενότητα 5.7. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιούμε στην παρούσα εργασία (Αλγόριθμος 2.3) είναι αυτός που επιλύει το Stable Roommates Problem, που παρουσιάστηκε στο [23]. Το ζητούμενο είναι σε κάθε γύρο ανταλλαγής ενέργειας να βρεθεί ένα stable matching. Έχει αποδειχθεί πως δεν υπάρχει για όλα τα σύνολα σταθερή αντιστοίχιση [24]. Υπενθυμίζουμε πως ο αλγόριθμος αυτός λαμβάνει υπ'όψιν τις προτιμήσεις όλων

των χρηστών, πριν καταλήξει στην τελική ανάθεση ζευγαριών. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει stable matching, τότε ο αλγόριθμος επιστρέφει ένα ταίριασμα, στο οποίο δεν έχουν όλοι οι χρήστες ζεύγος, το οποίο είναι προφανώς ασταθές, παρόλα αυτά, οι χρήστες που καταλήγουν με ζεύγος ανήκουν σε ένα υποσύνολο του συνόλου $|U|$, για το οποίο υπάρχει stable matching. Ο Εναλλακτικός Αλγόριθμος Αντιστοίχισης δεν παράγει stable matchings, καθώς τοποθετεί μεν τους χρήστες του συνόλου σε ζεύγη ανταλλαγής ενέργειας, **χωρίς όμως να λαμβάνει υπ'όψιν τις προτιμήσεις όλων των χρηστών.**

Διευκρινίζουμε σε αυτό το σημείο τα πειράματα που παρουσιάζονται στα γραφήματα της ενότητας και αναφέρονται ως "Network Setup":

Πείραμα S₁, το πείραμα αυτό έχει όλες τις προεπιλεγμένες παραμέτρους:

- Πλήθος Χρηστών $|U| = 100$
- Πλήθος Τοποθεσιών $|O| = 10$
- Πλήθος Θεματικών Κατηγοριών $k = 5$
- Πλήθος Γύρων $r = 10$
- Απόδοση (efficiency) $\beta = [0.6, 0.8]$ με βήμα 0.1
- Ρυθμός Κατανάλωσης (consumption rate) $\alpha = [1, 3]$ με βήμα 1
- Βάρος Κέρδους $w_g = 0.33$
- Βάρος Link Stability $w_l = 0.33$
- Βάρος Μέτρου Εμπιστοσύνης (measure of trust) $w_s = 0.33$

Πείραμα S₂, το πείραμα αυτό έχει όλες τις προεπιλεγμένες παραμέτρους, που αναφέρθηκαν εκτός του πλήθους χρηστών:

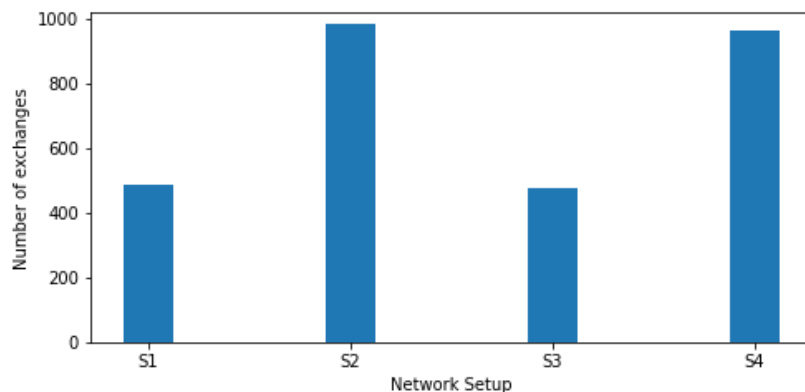
- Πλήθος Χρηστών $|U| = 200$

Πείραμα S₃, το πείραμα αυτό έχει όλες τις προεπιλεγμένες παραμέτρους, που αναφέρθηκαν εκτός του πλήθους τοποθεσιών:

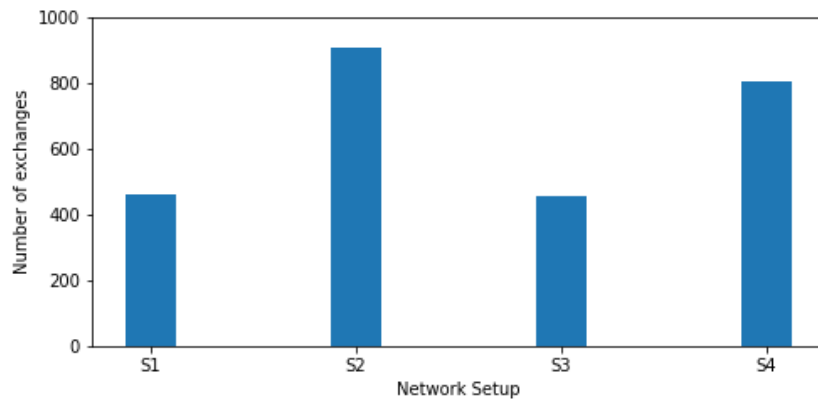
- Πλήθος Τοποθεσιών $|O| = 20$

Πείραμα S₄ το πείραμα αυτό έχει όλες τις προεπιλεγμένες παραμέτρους, που αναφέρθηκαν εκτός του πλήθους γύρων:

- Πλήθος Γύρων $r = 20$



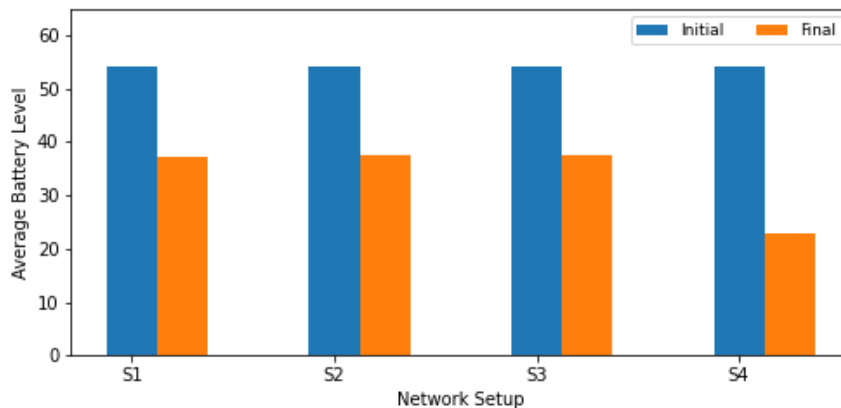
Σχήμα 6.41: Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας με τον SR Αλγόριθμο



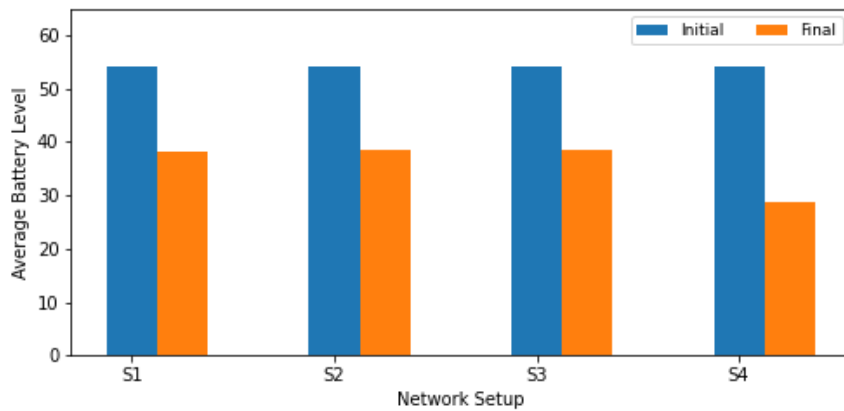
Σχήμα 6.42: Αριθμός ανταλλαγών ενέργειας με τον Εναλλακτικό Αλγόριθμο

Παρατηρούμε συγκρίνοντας τα Σχήματα 6.41 και 6.42 πως ο αριθμός ανταλλαγών είναι αυξημένος στα πειράματα με τον αλγόριθμο Stable Roommates, που παράγει stable matchings. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς όταν δεν επιτυγχάνεται stable matching, είναι περισσότεροι οι χρήστες που καταλήγουν χωρίς ζεύγος και άρα δεν συμμετέχουν στην ανταλλαγή ενέργειας.

Όπως αναμένουμε, η τελική μέση ενέργεια του συστήματος είναι μειωμένη στα πειράματα αυτά, σε σχέση με τις προσομοιώσεις στις οποίες η αντιστοίχιση σε ζεύγη γίνεται με τον εναλλακτικό αλγόριθμο, καθώς περισσότερες ανταλλαγές ισοδυναμούν με μεγαλύτερες απώλειες κατά τη μεταφορά ενέργειας (Σχήματα 6.43 και 6.44).

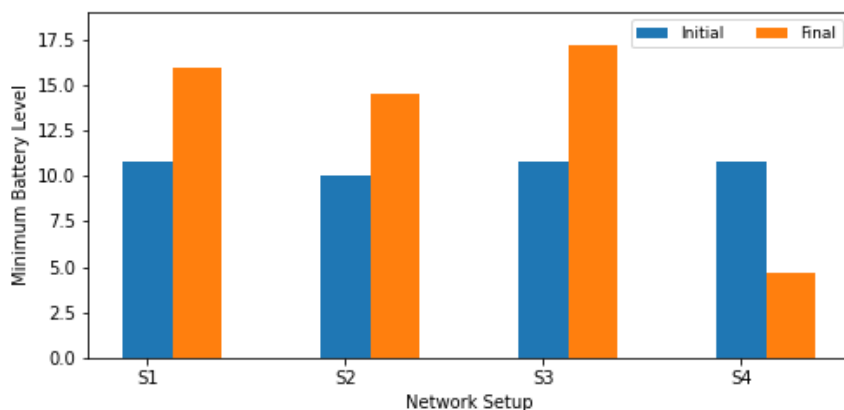


Σχήμα 6.43: Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος με τον SR Αλγόριθμο

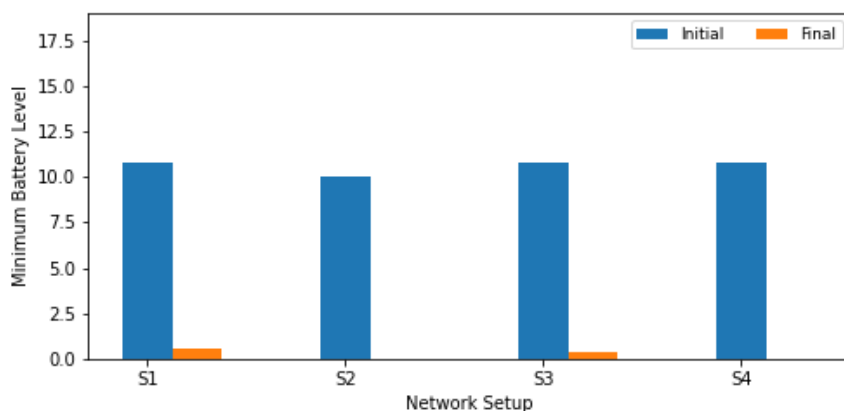


Σχήμα 6.44: Μέσο αρχικό και τελικό επίπεδο ενέργειας συστήματος με τον Εναλλακτικό Αλγόριθμο

Προχωρώντας στον σχολιασμό των γραφημάτων με το μέσο ελάχιστο επίπεδο ενέργειας στο δίκτυο στα Σχήματα 6.45 και 6.46, αντιλαμβανόμαστε την επίπτωση της ύπαρξης περισσότερων unstable matchings στο σύνολο των προσομοιώσεων. Βλέπουμε το τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας στα πειράματα κατά τα οποία η αντιστοίχιση των χρηστών γίνεται με τον εναλλακτικό αλγόριθμο να είναι μειωμένο έως και κατά 11% επί της συνολικής χωρητικότητας της μπαταρίας, σε σχέση με αυτά στα οποία παράγονται stable matchings. Τα Σχήματα 6.43 και 6.46, λοιπόν, μαρτυρούν πως να μεν οι πόροι του δικτύου δεν εξαντλούνται στην προσπάθεια να αναπληρωθεί η μπαταρία των συσκευών με την ελάχιστη ενεργειακή στάθμη, το trade-off όμως είναι συνολικά το δίκτυο να αποτυγχάνει να επεκτείνει ικανοποιητικά το χρόνο ζωής του όταν χρησιμοποιείται ο Εναλλακτικός Αλγόριθμος.

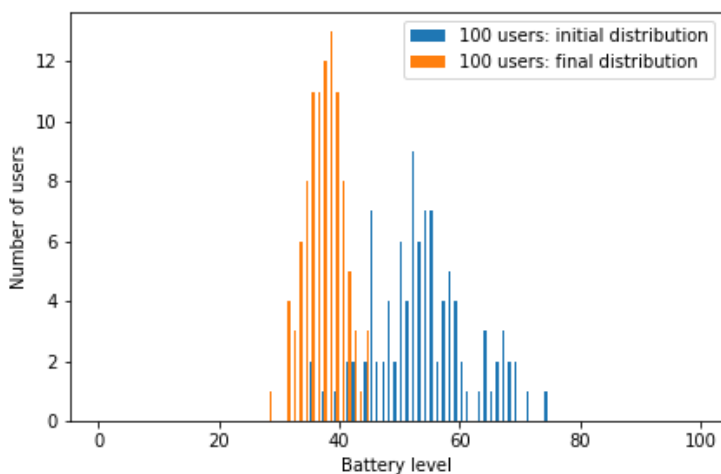


Σχήμα 6.45: Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος με τον SR Αλγόριθμο



Σχήμα 6.46: Μέσο αρχικό και τελικό ελάχιστο επίπεδο ενέργειας συστήματος με τον Εναλλακτικό Αλγόριθμο

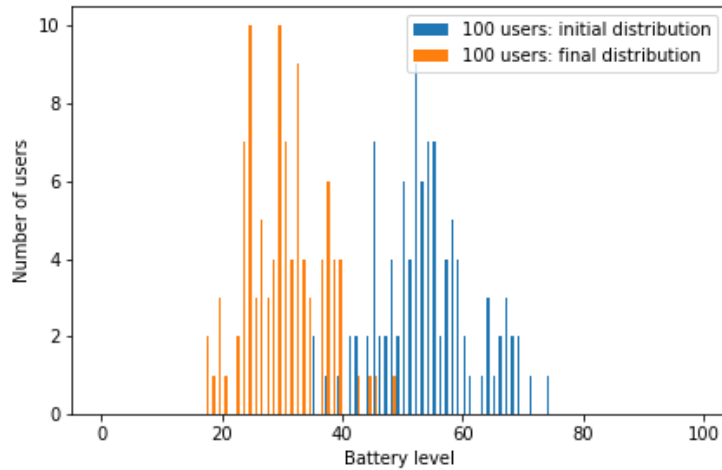
Τέλος, εξετάζοντας τις κατανομές ενέργειας στο δίκτυο, που απεικονίζονται στα Σχήματα 6.47 και 6.48, επιβεβαιώνονται τα όσα αναφέραμε. Στο Σχήμα 6.47, παρατηρούμε πως η τελική κατανομή είναι πιο στενή από την αρχική και η πλειονότητα των χρηστών καταλήγει με κοντινά επίπεδα ενέργειας. Η τελική κατανομή είναι βεβαίως μετατοπισμένη αριστερά, καθώς υπάρχουν απώλειες ενέργειας, τόσο από τις ανταλλαγές, όσο και από το σταθερό ρυθμό κατανάλωσης της μπαταρίας των συσκευών.



Σχήμα 6.47: Κατανομή ενέργειας με τον SR Αλγόριθμο, για 100 χρήστες

Αντίθετα, στο Σχήμα 6.48, βλέπουμε πως η τελική κατανομή, είναι μεν μετατοπισμένη αριστερά, για τους ίδιους λόγους, όμως το σύστημα δεν έχει καταφέρει να περιορίσει ικανοποιητικά το εύρος τιμών που έχουν τα επίπεδα μπαταρίας των χρηστών. Ως εκ τούτου, οι ανταλλαγές ενέργειας δεν καταφέρνουν να διαμοιράσουν την

ενέργεια στο δίκτυο με δίκαιο τρόπο, επομένως οι συσκευές που εζ' αρχής είχαν χαμηλή ενεργειακή στάθμη δεν θα καταφέρουν να παραμείνουν λειτουργικές για μεγάλο διάστημα και ο χρόνος ζωής του δικτύου δεν θα παραταθεί.



Σχήμα 6.48: Κατανομή ενέργειας με τον Εναλλακτικό Αλγόριθμο, για 100 χρήστες

Συμπερασματικά, καταλήγουμε πως ο αλγόριθμος που επιλέξαμε (Stable Roommates Algorithm) έχει τη βέλτιστη απόδοση μεταξύ των δύο, εξυπηρετώντας επαρκώς το σύστημα που έχουμε αναπτύξει και επεκτείνοντας ικανοποιητικά το χρόνο ζωής του δικτύου.

Κεφάλαιο 7

Επίλογος

7.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της ομότιμης ανταλλαγής ενέργειας με ασύρματη μεταφορά (peer-to-peer Wireless Power Transfer) μεταξύ των χρηστών ενός Κινητού Κοινωνικού Δικτύου με ετερογενείς συσκευές. Προτείναμε ένα μοντέλο συστήματος με κεντρική (centralised) αρχιτεκτονική (πελάτη - εξυπηρετητή) στο οποίο οι χρήστες, εγγραφόμενοι σε μια πλατφόρμα κοινωνικής δικτύωσης και παραχωρώντας προσωπικά τους δεδομένα, μπορούν να βρουν ένα βέλτιστο ζεύγος ώστε να ανταλλάξουν ενέργεια. Λάβαμε, επιπλέον, υπ' όψιν τις απώλειες λόγω εξασθένησης κατά την ανταλλαγή ενέργειας και την κατανάλωση της μπαταρίας των συσκευών. Η κίνηση των χρηστών προσομοιώθηκε με Τυχαίους Περιπάτους. Η αντιστοίχιση των χρηστών σε ζεύγη πραγματοποιήθηκε με χρήση του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε για το Πρόβλημα των Συγκατοίκων (Stable Roommates Problem), κατά το οποίο τα άτομα ενός συνόλου επιχειρείται να τοποθετηθούν σε ζεύγη, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις προτιμήσεις τους. Στη δική μας προσέγγιση, η διαμόρφωση των προτιμήσεων έγινε ενσωματώνοντας στον τελικό δείκτη προτίμησης το δυνάμει ενεργειακό κέρδος, τις κοινωνικές σχέσεις και πρόβλεψη της κινητικότητας των χρηστών. Ο στόχος του συστήματος που αναπτύξαμε είναι η μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του δικτύου, ιδανικά καταλήγοντας με δίκαια κατανεμημένη την ενέργεια στους χρήστες του συστήματος. Ο τρόπος με τον οποίο προσεγγίσαμε το πολυπαραγοντικό αυτό πρόβλημα ήταν ένας συνδυασμός απλών μεθόδων, ευρέως χρησιμοποιούμενων στη βιβλιογραφία αλλά και τεχνικών που στόχο είχαν την αύξηση του βαθμού ρεαλισμού του μοντέλου, όπως η συμπερίληψη της ετερογένειας των συσκευών, η πρόβλεψη κινητικότητας και η εξέταση της προθυμίας των χρηστών να συμμετέχουν σε ανταλλαγές ενέργειας, βάσει των κοινωνικών τους δεσμών.

Η προσομοίωση του συστήματος πραγματοποιήθηκε σε συνθετικά δεδομένα. Λόγω της σύνθετης φύσης του μοντέλου, πραγματοποιήθηκαν πειράματα για διαφορετικούς συνδυασμούς παραγόντων, αναζητώντας τις συνθήκες κάτω από τις οποίες το σύστημά μας παρουσιάζει βέλτιστη απόδοση. Η αξιολόγηση του μοντέλου έγινε παρατη-

ρώντας και ερμηνεύοντας τον μέσο αριθμό ανταλλαγών ενέργειας και την μεταβολή του μέσου επιπέδου ενέργειας και του μέσου ελαχίστου επιπέδου ενέργειας στο δίκτυο στην αρχή και μετά το πέρας κάθε πειράματος. Επιπλέον, παραθέσαμε κάποια ιστογράμματα κατανομής της ενέργειας του δικτύου, ώστε να αξιολογήσουμε το κατά πόσο είναι δίκαιος ο διαμοιρασμός της. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων κρίθηκαν ικανοποιητικά ως πολύ καλά για τους περισσότερους συνδυασμούς παραμέτρων που εφαρμόσαμε στο μοντέλο. Παρατηρήθηκε πως το σύστημά μας επιτυγχάνει αύξηση του ελαχίστου επιπέδου μπαταρίας, επεκτείνοντας σημαντικά το χρόνο ζωής του. Μάλιστα, διαπιστώσαμε πως ο διαμοιρασμός της ενέργειας γίνεται ως επί το πλείστον με δίκαιο τρόπο, καθώς οι χρήστες καταλήγουν με κοντινά επίπεδα ενέργειας στις μπαταρίες των συσκευών τους, μετά το τέλος των προσομοιώσεων.

7.2 Μελλοντική Εργασία

Το σύστημα που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, διαθέτει ενδιαφέρουσες προεκτάσεις. Κάποιες από τις εργασίες που μπορούν να πραγματοποιηθούν μελλοντικά, τόσο για την διαμόρφωση μιας πληρέστερης εικόνας της απόδοσης του μοντέλου που αναπτύξαμε, όσο και για να καταστεί κατάλληλο για υλοποίηση σε πραγματικό επίπεδο, είναι οι ακόλουθες:

1. Η περαιτέρω αξιολόγηση του συστήματος χρησιμοποιώντας περισσότερες μετρικές που θα αφορούν αφενός το ποσοστό των ενεργειακών αναγκών των χρηστών που καλύφθηκαν μέσω του διαμοιρασμού ενέργειας με WPT και αφετέρου το μέτρο της δικαιοσύνης της κατανομής ενέργειας στο δίκτυο.
2. Η σύγκριση του συστήματός μας με άλλα συστήματα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Η ύπαρξη διαφορετικών τύπων συσκευών δεν είναι συνηθισμένη στις υπάρχουσες μελέτες, επομένως θα πρέπει εισάγοντας ετερογενείς συσκευές και διεξάγοντας προσομοιώσεις με ίδια χρονική διάρκεια να παραγάγουμε αποτελέσματα για κοινές μετρικές, συγκρίνοντας την επίδοση του μοντέλου μας με άλλα, ώστε να διαπιστώσουμε αν όντως προσφέρει κάτι αξιολογικό σε αυτό το ερευνητικό πεδίο.
3. Η προσομοίωση του συστήματος που προτείνεται με χρήση πραγματικών συνόλων δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο θα παρατηρηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου σε πιο ρεαλιστικές συνθήκες. Καθώς, βέβαια, το σύστημά μας είναι πολυπαραγοντικό, απαιτείται να γνωρίζουμε: την κατανάλωση των χρηστών, την ενεργειακή στάθμη των συσκευών τους, τις διαδρομές που ακολουθήσαν σε πραγματικό γεωγραφικό χώρο, τα ενδιαφέροντά τους καθώς και τις μεταξύ τους κοινωνικές σχέσεις.
4. Η ρεαλιστικότερη μοντελοποίηση της κίνησης των χρηστών, συμπεριλαμβάνοντας τις κοινωνικές τους σχέσεις στο μοντέλο κινητικότητας.

5. Η μελέτη δυναμικών MSNs, στα οποία οι κοινωνικές σχέσεις των χρηστών αλλάζουν και εξελίσσονται με την πάροδο του χρόνου.

Βιβλιογραφία

- [1] *Your phone is now more powerful than your PC*, <https://insights.samsung.com/2021/08/19/your-phone-is-now-more-powerful-than-your-pc-3/> (2023/05/02).
- [2] D. Shelag, *How mobile users spend their time on their smartphones in 2023*, <https://www.insiderintelligence.com/insights/mobile-users-smartphone-usage/> (2023/18/01).
- [3] T. Wheelwright, *2022 Cell Phone Usage Statistics: How Obsessed Are We?* <https://www.reviews.org/mobile/cell-phone-addiction> (2023/24/01).
- [4] N. Spendelow, *Best phone battery life 2023: The longest-lasting smartphones ranked*, <https://www.expertreviews.co.uk/mobile-phones/1402071/best-phone-battery-life> (2023/18/01).
- [5] N. Spendelow, *Best mid-range smartphone 2023: Great, affordable phones you can buy today*, <https://www.expertreviews.co.uk/mobile-phones/1408886/best-mid-range-smartphone> (2023/18/01).
- [6] E. Bulut και B. K. Szymanski, “Mobile Energy Sharing through Power Buddies,” στο *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2017, σσ. 1–6.
- [7] *Wireless power transfer*, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Wireless_power_transfer&oldid=1136101511(2023/05/02).
- [8] A. Dhungana, T. Arodz και E. Bulut, “Exploiting Peer-to-Peer Wireless Energy Sharing for Mobile Charging Relief,” *Ad Hoc Networks*, τόμ. 91, 2019.
- [9] A. Bondy και U. Murty, *Graph Theory*. 2008.
- [10] *Simple Graph*, <https://mathworld.wolfram.com/SimpleGraph.html> (2023/13/02).
- [11] J. Agbinya, “Markov Chain and its Applications an Introduction,” στο *Αύγ.* 2020, σσ. 1–16.

- [12] R. Serfozo, *Basics of Applied Stochastic Processes*, http://www.stat.yale.edu/~jtc5/251/readings/Basics%20of%20Applied%20Stochastic%20Processes_Serfozo.pdf (2023/12/02).
- [13] E. Howell, *Markov Chains Simply Explained*, <https://towardsdatascience.com/markov-chains-simply-explained-dc77836b47e3> (2023/12/02).
- [14] J. Blitzstein, *Markov Chains Handout for Stat 110*, https://projects.iq.harvard.edu/files/stat110/files/markov_chains_handout.pdf (2023/12/02).
- [15] *Random walk*, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Random_walk&oldid=1130148280(2023/12/02).
- [16] D. A. Spielman, *Random Walks on Graphs*, <https://www.cs.yale.edu/homes/spielman/561/lect10-18.pdf> (2023/12/02).
- [17] *Random Walks and Markov Chains*, <https://www.cs.cmu.edu/~avrim/598/chap5only.pdf> (2023/12/02).
- [18] *Εντροπία πληροφορίας*, https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BD%CF%84%CF%81%CE%BF%CF%80%CE%AF%CE%B1_%CF%80%CE%BB%CE%B7%CF%81%CE%BF%CF%86%CE%BF%CF%81%CE%B9%CF%8E%CE%BD (2023/28/02).
- [19] *Stable marriage problem*, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Stable_marriage_problem&oldid=1131248490"(2023/05/02).
- [20] R. Irving, P. Leather και D. Gusfield, "An efficient algorithm for the "optimal" stable marriage," *J. ACM*, τόμ. 34, σσ. 532–543, 1987.
- [21] *Stable Marriage Problem*, <https://www.geeksforgeeks.org/stable-marriage-problem/> (2023/11/02).
- [22] D. Gale και L. S. Shapley, "College Admissions and the Stability of Marriage," *The American Mathematical Monthly*, τόμ. 69, αρθμ. 1, σσ. 9–15, 1962.
- [23] R. W. Irving, "An Efficient Algorithm for the "Stable Roommates" Problem," *J. Algorithms*, τόμ. 6, σσ. 577–595, 1985.
- [24] D. Gusfield και R. W. Irving, "The Stable marriage problem - structure and algorithms," στο *Foundations of computing series*, 1989.
- [25] *The stable roommates problem*, https://matching.readthedocs.io/en/latest/discussion/stable_roommates/index.html#the-stable-roommates-problem (2023/11/02).
- [26] *matching.algorithms package*, <https://matching.readthedocs.io/en/latest/reference/source/matching.algorithms.html> (2023/11/02).

- [27] M. E. J. Newman, “The Structure and Function of Complex Networks,” *SIAM Review*, τόμ. 45, αρθμ. 2, σσ. 167–256, 2003.
- [28] S. Wasserman και K. Faust, *Social network analysis: Methods and applications*. Cambridge university press, 1994, τόμ. 8.
- [29] N. Vastardis και K. Yang, “Mobile Social Networks: Architectures, Social Properties, and Key Research Challenges,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, τόμ. 15, αρθμ. 3, σσ. 1355–1371, 2013.
- [30] Z. Mao, Y. Jiang, G. Min, S. Leng, X. Jin και K. Yang, “Mobile Social Networks: Design Requirements, Architecture, and State-of-the-Art Technology,” *Computer Communications*, τόμ. 100, 2016.
- [31] *Re-imagining Decentralized and Distributed*, https://www.windley.com/archives/2015/01/re-imagining_decentralized_and_distributed.shtml (2023/15/02).
- [32] X. Hu, T. Chu, E. Ngai, P. Kruchten και H. Chan, “A Survey on Mobile Social Networks: Applications, Platforms, System Architectures, and Future Research Directions,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, τόμ. 17, 2014.
- [33] H. Barbosa, M. Barthelemy, G. Ghoshal κ.ά., “Human Mobility: Models and Applications,” *Physics Reports*, τόμ. 734, 2017.
- [34] J. Huang, Y. Zhou, Z. Ning και H. Gharavi, “Wireless Power Transfer and Energy Harvesting: Current Status and Future Prospects,” *IEEE Wireless Communications*, τόμ. 26, αρθμ. 4, 2019.
- [35] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim και Z. Han, “Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, τόμ. 18, αρθμ. 2, σσ. 1413–1452, 2016.
- [36] A. Dhungana και E. Bulut, “Peer-to-Peer Energy Sharing in Mobile Networks: Applications, Challenges, and Open Problems,” *Ad Hoc Networks*, τόμ. 97, σ. 102 029, Οκτ. 2019.
- [37] D. Niyato, P. Wang, D. I. Kim, W. Saad και Z. Han, “Mobile Energy Sharing Networks: Performance Analysis and Optimization,” τόμ. 65, αρθμ. 5, σσ. 3519–3535, 2016.
- [38] D. Niyato, P. Wang, D. I. Kim και W. Saad, “Finding the best friend in mobile social energy networks,” στο *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2015, σσ. 3240–3245.

- [39] A. Dhungana, T. Arodz και E. Bulut, “Charging Skip Optimization with Peer-to-Peer Wireless Energy Sharing in Mobile Networks,” στο *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2018, σσ. 1–6.
- [40] A. Madhja, S. Nikolettseas, T. P. Raptis, C. Raptopoulos και D. Tso-
lovos, “Peer-to-Peer Wireless Energy Transfer in Populations of Very
Weak Mobile Nodes,” στο *2017 IEEE Wireless Communications and
Networking Conference Workshops (WCNCW)*, 2017, σσ. 1–6.
- [41] S. Nikolettseas, T. P. Raptis και C. Raptopoulos, “Interactive Wireless
Charging for Energy Balance,” στο *2016 IEEE 36th International Con-
ference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, 2016, σσ. 262–
270.
- [42] S. Nikolettseas, T. P. Raptis και C. Raptopoulos, “Energy Balance w-
ith Peer-to-Peer Wireless Charging,” στο *2016 IEEE 13th Internatio-
nal Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*, 2016,
σσ. 101–108.
- [43] S. Nikolettseas, T. P. Raptis και C. Raptopoulos, “Wireless charging
for weighted energy balance in populations of mobile peers,” *Ad Hoc
Networks*, τόμ. 60, σσ. 1–10, 2017.
- [44] A. Dhungana και E. Bulut, “Mobile Energy Balancing in Heterogeneous
Opportunistic Networks,” στο *2019 IEEE 16th International Confere-
nce on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*, 2019, σσ. 335–
343.
- [45] T. P. Raptis, “Online Social Network Information Can Influence W-
ireless Crowd Charging,” στο *2019 15th International Conference on
Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, 2019, σσ. 481–
486.
- [46] T. Ojha, T. P. Raptis, M. Conti και A. Passarella, “Balanced wire-
less crowd charging with mobility prediction and social awareness,”
Computer Networks, τόμ. 211, σ. 108989, 2022.
- [47] A. Triviño, J. Aguado και J. Gonzalez-Gonzalez, *Wireless Power Tran-
sfer for Electric Vehicles: Foundations and Design Approach*. 2019.
- [48] M. Vitoropoulou, V. Karyotis και S. Papavassiliou, “On the Fair E-
nergy Sharing in Networks with Wireless Charging-capable Devices,”
στο *2022 18th International Conference on Wireless and Mobile Co-
mputing, Networking and Communications (WiMob)*, 2022, σσ. 375–
380.

- [49] H. Li, X. Liu και Q. Mei, “Predicting Smartphone Battery Life based on Comprehensive and Real-time Usage Data,” 2018.
- [50] W. Sherchan, S. Nepal και C. Paris, “A survey of trust in social networks,” *ACM Computing Surveys (CSUR)*, τόμ. 45, αρθμ. 4, σσ. 1–33, 2013.
- [51] W. Jiang, G. Wang, M. Z. A. Bhuiyan και J. Wu, “Understanding Graph-Based Trust Evaluation in Online Social Networks: Methodologies and Challenges,” *ACM Comput. Surv.*, τόμ. 49, αρθμ. 1, 2016.
- [52] T. Ojha, T. P. Raptis, M. Conti και A. Passarella, “Balanced wireless crowd charging with mobility prediction and social awareness,” *Computer Networks*, τόμ. 211, σ. 108989, 2022.
- [53] *Convex combination*, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Convex_combination&oldid=1130241764 (2023/10/02).