



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ  
ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ  
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΠΡΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗ &  
ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΔΙΑΠΡΑΓΜΑΤΕΥΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΧΑΤΖΗΔΑΚΗ ΑΝΔΡΕΑ

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου

Αθήνα, Δεκέμβριος 2015





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ  
ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ  
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΠΡΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗ &  
ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΔΙΑΠΡΑΓΜΑΤΕΥΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΧΑΤΖΗΔΑΚΗ ΑΝΔΡΕΑ

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την

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

**Μιχαήλ Θεολόγου**  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Ιωάννα Ρουσσάκη**  
Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2015



Χατζηδάκης Ανδρέας

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

Copyright © Χατζηδάκης Ανδρέας , 2015.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Βασικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ανάλυση διαφορετικών αλγορίθμων βέλτιστης κατανομής υποφερουσών και ισχύος στην ζεύξη ανόδου OFDMA ασυρμάτων δικτύων με επαναχρησιμοποίηση φάσματος και με την παρουσία επικοινωνίας συσκευής προς συσκευή (Device-to-Device Communications-D2D).

Για την υλοποίηση αυτού του στόχου γίνεται χρήση της θεωρίας διαπραγμάτευσης, που επιτρέπει στους χρήστες του δικτύου να προτείνουν διαδοχικά κατανομές των πόρων, μέχρι να συμφωνήσουν όλοι στη βέλτιστη κατανομή. Κριτήριο ικανοποίησης των χρηστών είναι η μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητάς τους (utility function), μιας έννοιας που χρησιμοποιήθηκε από την Οικονομική Επιστήμη και εκφράζει την ικανοποίηση των χρηστών ανάλογα με την ποιότητα των υπηρεσιών που τους παρέχεται.

Τέλος, γίνεται μελέτη των αλγορίθμων που προτάθηκαν μέσω προσομοιώσεων και παρουσιάζονται αποτελέσματα και συμπεράσματα για τους αλγόριθμους αυτούς.

**ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ:** OFDMA, D2D Communications, κατανομή πόρων, Θεωρία διαπραγμάτευσης, επαναχρησιμοποίηση φάσματος.

## **ABSTRACT**

The main purpose of this thesis is the study and analysis of different optimal subcarrier and power allocation algorithms in OFDMA wireless networks in the uplink by reusing the system spectrum and by using device to device communications (D2D).

Users' perceived satisfaction was formulated via well-designed utility functions and each user adopts a representative utility function, which reflects his perceived satisfaction based on the fulfillment of his Quality of Service (QoS) prerequisites. Moreover, the bargaining theory was adopted, allowing the users - either macro-users or the D2D devices - to participate in a non-cooperative bargaining game which targets at allocating the resources. The outcome of the bargaining game is an efficient resource allocation of system's resource blocks (RBs), as well as of users' uplink transmission power.

Finally, we present the steps and analysis of the proposed algorithms through different simulation scenarios in order to verify the proposed approach. Detailed numerical results demonstrate the operational characteristic of the proposed algorithms, as well as the efficiency of the resource allocation process.

**KEYWORDS:** OFDMA, D2D, spectrum reusability, bargaining theory, subcarrier and power allocation.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Συμεών Παπαβασιλείου, ο οποίος εμπιστεύτηκε στο πρόσωπο μου την ανάθεση ενός απαιτητικού έργου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την μεταδιδάκτορα κα Ειρήνη-Ελένη Τσιροπούλου, η οποία υπήρξε πολύτιμος συνεργάτης και καθοδηγητής μου σε όλη την διάρκεια της προσπάθειας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους για την πολύτιμη βοήθεια και συμπαράσταση που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.







# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.1.	Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας.....	16
1.2.	Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας .....	17
2.1.	Εισαγωγή στην Θεωρία Διαπραγμάτευσης.....	20
2.1.1.	Βασικές Έννοιες της Θεωρίας Παιγνίων .....	20
2.1.2.	Τεχνικές επίλυσης παιγνίων .....	21
2.2.	Μοντέλο Διαπραγμάτευσης Rubinstein.....	24
2.3.	Επέκταση Μοντέλου Rubinstein για $N$ -παίκτες.....	27
3.1.	Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνίας.....	31
3.2.	Γενιές Δικτύων Κινητών Επικοινωνιών .....	32
3.2.1.	Κυψελωτά Συστήματα 1ης Γενιάς.....	32
3.2.2.	Κυψελωτά Συστήματα 2ης Γενιάς.....	32
3.2.3.	Κυψελωτά συστήματα 3ης γενιάς.....	33
3.2.4.	Κυψελωτά συστήματα 4ης γενιάς.....	34
4.1.	Η Δομή του OFDMA.....	37
4.2.	Τα Πλεονεκτήματα και τα Μειονεκτήματα του OFDMA .....	40
4.3.	Εισαγωγή στην Device-to-Device (D2D) Επικοινωνία .....	41
4.4.	Δομή των Κυψελωτών Δικτύων με την Παρουσία D2D Συνδέσεων .....	42
4.5.	Εισαγωγή στις Τεχνικές Ανάθεσης Πόρων .....	43
4.6.	Κατηγορίες Τεχνικών Ανάθεσης Πόρων .....	44
5.1.	Υπάρχουσα Βιβλιογραφία.....	47
6.1.	Εισαγωγή .....	59
6.2.	Μοντελοποίηση του Προβλήματος.....	59
6.3.	Αλγόριθμοι Κατανομής Πόρων.....	62
6.3.1.	Κατανομή του Πλήθους των Υποφερουσών στους Χρήστες του Συστήματος....	62
6.3.2.	Ταξινόμηση των Υποφερουσών στους Χρήστες του Συστήματος .....	64
6.3.2.1.	Μέθοδος Κατανομής των Υποφερουσών στους Χρήστες Διαδοχικά (Sequentially Mapping Policy).....	64
6.3.2.2.	Μέθοδος Κατανομής των Υποφερουσών στους Χρήστες με Βάση το Μέγιστο Κέρδος Καναλιού (Max Gain mapping policy).....	64

6.3.2.3.	<i>Μέθοδος Κατανομής των Υποφερουσών στους Χρήστες με Βάση το Μέγιστο Κέρδος Καναλιού και με Βάση τις Παρεμβολές Εισάγει Κάθε Χρήστης στο Σύστημα (Max Gain and Min Interference Mapping Policy).</i>	65
6.3.3.	<i>Εύρεση Βέλτιστης Ισχύος</i>	66
6.3.4.	<i>Ανανέωση της Ισχύος</i>	68
6.3.5.	<i>Επανάληψη της Διαδικασίας</i>	68
6.4.1.	<i>Ταίριασμα των D2D Χρηστών</i>	68
6.4.2.	<i>Υπολογισμός των Παρεμβολών του Συστήματος</i>	69
7.1.	<i>Εισαγωγή</i>	71
7.2.	<i>Παράμετροι του Συστήματος</i>	71
7.3.	<i>Τοπολογία συστήματος</i>	72
7.4.	<i>Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και σχολιασμός</i>	74
8.1.	<i>Επίλογος</i>	84
8.2.	<i>Μελλοντική Έρευνα</i>	85
9.1.	<i>Βιβλιογραφία</i>	87

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1	<i>Παράδειγμα παίγνιου 2 παικτών.</i>	22
Πίνακας 2	<i>Παράδειγμα παίγνιου 2 παικτών.</i>	23
Πίνακας 3	<i>Σημείο ισορροπίας στο μοντέλο διαπραγμάτευσης Rubinstein 2-παικτών για διάφορες τιμές του <math>\delta</math>.</i>	26
Πίνακας 4	<i>Σημείο ισορροπίας στο μοντέλο διαπραγμάτευσης του Rubinstein 3-παικτών για διάφορες τιμές του <math>\delta</math>.</i>	29
Πίνακας 5	<i>Παράμετροι του συστήματος.</i>	72

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1	<i>Μοντέλο διαπραγμάτευσης του Rubinstein για 2 παίκτες.</i>	24
Σχήμα 2	<i>Πολλαπλή πρόσβαση OFDMA.</i>	38
Σχήμα 3	<i>Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης.</i>	38
Σχήμα 4	<i>Μπλοκ διάγραμμα OFDMA.</i>	39
Σχήμα 5	<i>Device-to-device επικοινωνία μεταξύ UE1 και UE2 σαν τμήμα του κυψελωτού δικτύου.</i>	42
Σχήμα 6	<i>Διάταξη των κυψελωτών χρηστών στην τοπολογία του συστήματος.</i>	73

Σχήμα 7 Διάταξη των D2D χρηστών στην τοπολογία του συστήματος.....	74
Σχήμα 8 Πλήθος υποφερουσών που κατανέμονται σε κάθε χρήστη για $\delta=0,89$ .....	75
Σχήμα 9 Πλήθος υποφερουσών που κατανέμονται σε κάθε χρήστη για $\delta=0,94$ . .....	75
Σχήμα 10 Πλήθος υποφερουσών που κατανέμονται σε κάθε χρήστη για $\delta=0,99$ . .....	76
Σχήμα 11 Πλήθος υποφερουσών που κατανέμονται σε κυψελωτούς χρήστες και σε D2D χρήστες για διαφορετικές τιμές του $\delta$ .....	77
Σχήμα 12 Συνολική ισχύς του συστήματος στις 3 μεθόδους κατανομής υποφερουσών για το σενάριο 1. ....	78
Σχήμα 13 Συνολικός ρυθμός μετάδοσης του συστήματος στις 3 μεθόδους κατανομής των υποφερουσών για το σενάριο 1. ....	78
Σχήμα 14 Συνολική απόδοση ενέργειας του συστήματος στις 3 μεθόδους κατανομής των υποφερουσών για το σενάριο 1. ....	79
Σχήμα 15 Συνολική ισχύς εκπομπής του συστήματος στις 3 μεθόδους κατανομής των υποφερουσών για το σενάριο 2. ....	80
Σχήμα 16 Συνολικός ρυθμός μετάδοσης του συστήματος στις 3 μεθόδους κατανομής των υποφερουσών για το σενάριο 2. ....	81
Σχήμα 17 Συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος στις 3 μεθόδους κατανομής των υποφερουσών για το σενάριο 2.....	81



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

### 1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

### 1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

---

## ***1.1. Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας***

Στις μέρες μας, η επανάσταση στον τομέα των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών είναι ραγδαία και ιδιαίτερα στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες η εντυπωσιακή ανάπτυξη των νέων εφαρμογών, καθιστούν επιτακτική την ανάγκη τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα να ανταποκριθούν ικανοποιητικά στις απαιτήσεις των χρηστών σε υψηλό επίπεδο υπηρεσίας για τις ποικίλες υπηρεσίες που έχουν ως τώρα διαμορφωθεί. Η εξέλιξη των ασύρματων κινητών τηλεπικοινωνιών επιτρέπει πλέον στους ανθρώπους να έχουν πρόσβαση σε άλλους χρήστες και σε υπηρεσίες, οποιαδήποτε ώρα και από οποιοδήποτε μέρος. Τα κινητά τηλέφωνα μετατράπηκαν πλέον από απλές τηλεφωνικές συσκευές σε ενσωματωμένα συστήματα που καλύπτουν πλήθος αναγκών και απαιτήσεων, όπως διαδικτυακές υπηρεσίες, φωτογραφικές μηχανές και παιχνίδια. Στο νέο αυτό πλαίσιο, η επικοινωνία των χρηστών, η μετάδοση και η ανταλλαγή των δεδομένων προϋποθέτουν την ύπαρξη αξιόπιστων, γρήγορων και ευρείας κάλυψης ασυρμάτων επικοινωνιών. Για όλους αυτούς τους λόγους, τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μεγαλύτερη έρευνα για τον σχεδιασμό όσο το δυνατόν πιο αποδοτικών ασυρμάτων δικτύων, με στόχο την ομαλή λειτουργία των επικοινωνιών. [1]

Στην έως τώρα υπάρχουσα βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις για την αποδοτική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, την καταλληλότερη κατανομή υποφερουσών και της ισχύος εκπομπής στους χρήστες, παράμετροι που βοηθούν στην ομαλή λειτουργία των ασυρμάτων δικτύων. Στόχος αποτελεί η «ευχαρίστηση» των χρηστών του συστήματος, οι ανάγκες των οποίων είναι συνεχώς αυξανόμενες.

Η εισαγωγή της Θεωρίας Παιγνίων στο πρόβλημα της αποδοτικής χρήσης των διαθέσιμων πόρων ενός δικτύου αποτελεί μια μέθοδο αντιμετώπισής του. Ουσιαστικά, η συνολική δομή του προβλήματος μπορεί να μοντελοποιηθεί με ένα παίγνιο, συνεργατικό ή μη συνεργατικό, στο οποίο καθορίζονται οι παράμετροι που ο κάθε χρήστης επιθυμεί ξεχωριστά. Η τελική σύγκλιση του παίγνιου θα οδηγήσει σε ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash (Nash Equilibrium) για το οποίο θα γίνει εκτενής θεωρητική έρευνα και ανάλυση των ιδιοτήτων του.

Ακόμη, τα ασύρματα δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης με ορθογωνική διαίρεση συχνοτήτων (Orthogonal Frequency Division Multiple Access-OFDMA) έχουν αποτελέσει έως σήμερα αντικείμενο εκτενούς μελέτης και επιστημονικής έρευνας λόγω των πολλαπλών πλεονεκτημάτων που εισάγουν στο σύστημα. Επιπλέον, μια



καινοτομία που εισάγεται τα τελευταία χρόνια στα ασύρματα δίκτυα τηλεπικοινωνιών είναι η παρουσία συσκευών που επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους (Device-to-Device Communications), αναλυτική μελέτη των οποίων θα γίνει στην συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί λοιπόν η κατανομή των διαθέσιμων πόρων σε ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας με επαναχρησιμοποίηση του φάσματος. Προτείνονται και μελετώνται αλγόριθμοι κατανομής πόρων σε ένα σύστημα που συνδυάζει την παρουσία επικοινωνίας συσκευής προς συσκευή (Device-to-Device Communication) με την παρουσία απλών χρηστών, στην άνω ζεύξη ενός ασύρματου δικτύου πολλαπλής πρόσβασης με ορθογωνική διαίρεση συχνοτήτων (OFDMA). Ακόμη, χρησιμοποιείται η Θεωρία Παιγνίων για την κατανομή του πλήθους των υποφερουσών που θα καταλάβει κάθε χρήστης.

## ***1.2. Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας***

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται συνοπτικά η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στην Θεωρία Παιγνίων, καθώς και λεπτομερής περιγραφή του μοντέλου διαπραγμάτευσης του Rubinstein το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα διπλωματική. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στην εξέλιξη των ασυρμάτων δικτύων επικοινωνιών, από τα δίκτυα 1ης γενιάς μέχρι τα δίκτυα 4ης γενιάς. Στην συνέχεια, στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στην τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με ορθογωνιότητα συχνοτήτων (OFDMA) και στα οφέλη της στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα. Ακόμη, εισάγουμε την έννοια της επικοινωνίας συσκευής προς συσκευή (D2D Communications) και περιγράφονται ορισμένες τεχνικές ανάθεσης πόρων. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στην προϋπάρχουσα έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί σχετικά με το αντικείμενο που μελετάμε και τα αποτελέσματα στα οποία έχουν καταλήξει. Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του συστήματος που μοντελοποιήσαμε, ορίζονται οι κατάλληλες έννοιες του προβλήματος και αναλύουμε εκτενώς τους αλγόριθμους που εφαρμόσαμε για την επίλυση του προβλήματος. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων και αναλυτική αξιολόγηση τους πραγματοποιείται στο έβδομο κεφάλαιο. Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο ακολουθεί ο επίλογος στον οποίο συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε από την προσπάθεια επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης

κατανομής πόρων, ενώ γίνεται και μια εκτίμηση για την μελλοντική εφαρμογή αλλά και τις πιθανές επεκτάσεις της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

## ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΑΠΡΑΓΜΑΤΕΥΣΗΣ

---

- 2.1 Εισαγωγή στην Θεωρία Διαπραγμάτευσης
  - 2.2 Μοντέλο Διαπραγμάτευσης κατά Rubinstein
  - 2.3 Επέκταση Μοντέλου Διαπραγμάτευσης κατά Rubinstein για  $N$ -παίκτες
-

## 2.1. Εισαγωγή στην Θεωρία Διαπραγμάτευσης

### 2.1.1. Βασικές Έννοιες της Θεωρίας Παιγνίων

Η θεωρία διαπραγμάτευσης (bargaining theory) είναι ένα κομμάτι ενός γενικότερου μαθηματικού συνόλου, γνωστού ως Θεωρία Παιγνίων. Η θεωρία παιγνίων προσπαθεί να περιγράψει περίπλοκες στρατηγικές καταστάσεις σε ένα απλοποιημένο πλαίσιο. Αν και αρχικά δημιουργήθηκε ως κλάδος της οικονομικής επιστήμης, στη συνέχεια υιοθετήθηκε από τα μαθηματικά και πλέον αποτελεί πολύτιμο εργαλείο στη μελέτη πολλών επιστημών. Θεμελιωτές της θεωρίας θεωρούνται οι John Von Neumann, Oskar Morgenstern, John Forbes Nash και Reinhard Selten. Τα παίγνια είναι μία μαθηματική μέθοδος ανάλυσης προβλημάτων που αφορούν τον τρόπο λήψης αποφάσεων σε καταστάσεις σύγκρουσης και συνεργασίας. Διάφορα προβλήματα της πολιτικής επιστήμης, της ψυχολογίας, των κοινωνικών και οικονομικών επιστημών μπορούν να μοντελοποιηθούν ως παίγνια. Υπάρχουν πολλές επιμέρους κατηγορίες παιγνίων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έμφαση θα δοθεί στα μη συνεργατικά παίγνια (non-cooperative games) στα οποία ανήκουν και τα μοντέλα διαπραγμάτευσης. Μη συνεργατικά παίγνια είναι αυτά στα οποία κάθε παίκτης κάνει τις κινήσεις του ανεξάρτητα από των υπολοίπων, χωρίς να δεσμεύεται με τυχόν συμφωνίες που πρέπει να τηρήσει. Ένα άλλο κριτήριο με βάση το οποίο κατηγοριοποιούνται τα παίγνια είναι η σειρά με την οποία οι παίκτες παίρνουν τις αποφάσεις τους. Το παίγνιο ονομάζεται ακολουθιακό όταν οι παίκτες παίρνουν τις αποφάσεις και τις ενέργειες τους σειριακά, γνωρίζοντας τις προηγούμενες ενέργειες των υπολοίπων. Αντίθετα, ένα παίγνιο ονομάζεται ταυτόχρονο όταν οι παίκτες δεν γνωρίζουν τις ενέργειες των υπολοίπων και ενεργούν ταυτόχρονα με αυτούς. Το αποτέλεσμα ενός παιγνίου ουσιαστικά εξαρτάται από τις αποφάσεις των παικτών, δηλαδή από τις στρατηγικές που ακολουθούν κατά τη διάρκεια του.

Ένα παίγνιο λοιπόν αποτελείται από τους παίκτες, τις στρατηγικές τους, και το αποτέλεσμα του παιγνίου. Ένας παίκτης μπορεί να είναι ένα πρόσωπο, μία οργάνωση, ένα κράτος ή ένας συνασπισμός. Είναι δεδομένο όμως, ότι σε ένα παίγνιο ο αριθμός των παικτών διατηρείται σταθερός από την αρχή και είναι αυτός που το χαρακτηρίζει. Στρατηγικές είναι οι σειρές ενεργειών που μπορεί κάθε παίκτης να εφαρμόσει, και βασίζονται στους τρόπους με τους οποίους θεωρεί κάθε παίκτης πως θα επιτύχει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα για αυτόν. Το τελικό αποτέλεσμα του παιγνίου είναι

ουσιαστικά το τι κερδίζει ο κάθε παίκτης μετά το τέλος του παιγνίου. Η διαπραγμάτευση αφορά ουσιαστικά την κατάσταση στην οποία  $N$ -παίκτες προσπαθούν να συνάψουν μια αμοιβαία συμφωνία σε ένα κοινό τους πρόβλημα. Κατά τη διαδικασία της διαπραγμάτευσης κάθε παίκτης προτείνει μια συμφωνία και οι υπόλοιποι αποδέχονται ή απορρίπτουν αυτήν την πρόταση. Για να επιτευχθεί συμφωνία και να ολοκληρωθεί η διαπραγμάτευση, πρέπει μια πρόταση ενός παίκτη (έστω  $k$  παίκτης) να γίνει αποδεκτή από όλους τους  $N-1$  παίκτες  $(1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots, N)$ . Μία θεωρία διαπραγμάτευσης εξετάζει τη σχέση μεταξύ του αποτελέσματος της διαπραγμάτευσης και των χαρακτηριστικών της κατάστασης. [2]

### 2.1.2. Τεχνικές επίλυσης παιγνίων

Στη θεωρία παιγνίων η επίλυση παιγνίων είναι η έννοια του συστηματικού προσδιορισμού των στρατηγικών που θα χρησιμοποιηθούν από τους παίκτες και κατά αυτόν τον τρόπο της περιγραφής του αποτελέσματος του παιγνίου. Η πιο συχνή μορφή λύσης είναι οι ισορροπίες, δηλαδή οι καταστάσεις στις οποίες όλοι οι παίκτες είναι ικανοποιημένοι με το αποτέλεσμα και κανένας δεν έχει την τάση να μεταβάλει τις αποφάσεις του δεδομένων των αποφάσεων των υπολοίπων παικτών. Η πιο γνωστή ισορροπία είναι η ισορροπία κατά Nash. Τα παίγνια κατηγοριοποιούνται με βάση κάποια χαρακτηριστικά τους και ανάλογα με την κατηγορία στην οποία τοποθετούνται υπάρχουν διάφορες τεχνικές επίλυσης. Η ισορροπία κατά Nash είναι η πιο γνωστή ισορροπία και είναι μια γενική επίλυση που μπορεί να εφαρμοσθεί στα περισσότερα παίγνια. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα παίγνιο 2 παικτών. Μπορούμε να ορίσουμε την ισορροπία κατά Nash ως ένα διάνυσμα στρατηγικών  $(\sigma_1, \sigma_2)$  για το σενάριο των δύο παικτών, τέτοιο ώστε :

- i) Ο παίκτης 1, δεδομένου ότι ο παίκτης 2 ακολούθησε την στρατηγική  $\sigma_2$ , βλέπει ότι η στρατηγική  $\sigma_1$  είναι αυτή που του δίνει τη βέλτιστη ικανοποίηση και δεν έχει κανένα κίνητρο να την αλλάξει.
- ii) Ο παίκτης 2, δεδομένου ότι ο παίκτης 1 ακολούθησε την στρατηγική  $\sigma_1$ , βλέπει ότι η στρατηγική  $\sigma_2$  είναι αυτή που του δίνει την βέλτιστη δυνατή ικανοποίηση και δεν έχει κανένα κίνητρο να την αλλάξει.

Ο ορισμός μπορεί να επεκταθεί για παίγνια με περισσότερους από δύο παίκτες και διανύσματα στρατηγικών μεγαλύτερα του δύο. Η έννοια της ισορροπίας κατά Nash έχει ορισμένα προβλήματα. Αρχικά μπορεί σε ένα παίγνιο να υπάρχουν περισσότερα

από ένα σημεία ισορροπίας κατά Nash. Επίσης, κάποιες φορές μπορεί να μην υπάρχει κανένα τέτοιο σημείο. Τέλος, η ισορροπία κατά Nash δεν οδηγεί πάντα στη μέγιστη λαμβανόμενη ευχαρίστηση κάθε μεμονωμένου παίκτη.

Το παρακάτω παράδειγμα δείχνει ξεκάθαρα την επίλυση παιγνίων με την ισορροπία κατά Nash.

Ας θεωρήσουμε το παίγνιο του παρακάτω πίνακα όπου κάθε ένας από τους 2 παίκτες έχει 2 επιλογές και στα αντίστοιχα κελιά του πίνακα φαίνεται η ικανοποίηση κάθε παίκτη για κάθε δυνατό αποτέλεσμα του παιγνίου (4 δυνατά αποτελέσματα).

		ΠΑΙΚΤΗΣ 2	
		Γ	Δ
ΠΑΙΚΤΗΣ 1	A	(5,2)	(1,4)
	B	(4,3)	(0,0)

*Πίνακας 1 Παράδειγμα παίγνιου 2 παικτών.*

Στο παράδειγμα αυτό φαίνεται ότι δεν υπάρχει εμφανής λύση που να ικανοποιεί και τους δύο παίκτες αφού ο παίκτης 2 προτιμάει την στρατηγική Γ για στρατηγική Β του παίκτη 1 (3 έναντι 0), ενώ για στρατηγική Α του παίκτη 1 προτιμάει την στρατηγική Δ (4 έναντι 2). Παρατηρούμε ότι το σημείο (Α, Δ) αποτελεί σημείο ισορροπίας κατά Nash. Πράγματι, όταν ο παίκτης 1 επιλέγει την στρατηγική Α τότε ο παίκτης 2 έχει σαν καλύτερη επιλογή την στρατηγική Δ (4 έναντι 2). Ομοίως, όταν ο παίκτης 2 επιλέγει την στρατηγική Δ τότε ο παίκτης 1 ικανοποιείται καλύτερα με την στρατηγική Α (1 έναντι 0). Επομένως, είναι προφανές ότι και οι δύο παίκτες έχουν την καλύτερη επιλογή δεδομένης της επιλογής του άλλου. Άρα το σημείο (Α,Δ) αποτελεί σημείο ισορροπίας κατά Nash.

Ας δούμε ωστόσο ένα πρόβλημα που προκύπτει με την ισορροπία κατά Nash και το αναφέραμε προηγουμένως μέσω ενός παρόμοιου απλού παραδείγματος.

		ΠΑΙΚΤΗΣ 2	
		Γ	Δ
ΠΑΙΚΤΗΣ 1	A	(4,2)	(0,0)
	B	(0,0)	(1,2)

**Πίνακας 2 Παράδειγμα παίγνιου 2 παικτών.**

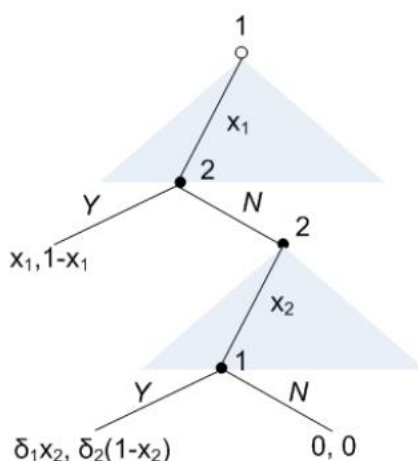
Στο παραπάνω παράδειγμα, με βάση όσα αναφέρθηκαν και προηγουμένως παρατηρούμε εύκολα ότι το σημείο (A,Γ) αποτελεί σημείο ισορροπίας κατά Nash. Πράγματι, δεδομένου ότι ο παίκτης 1 επιλέγει την στρατηγική A, τότε η επιλογή Γ είναι η καλύτερη για τον παίκτη 2 (2 έναντι 0) και αντίστοιχα, δεδομένου ότι ο παίκτης 2 επιλέγει την στρατηγική Γ, τότε και ο παίκτης 1 επιλέγει την στρατηγική A (4 έναντι 0). Ωστόσο, παρατηρούμε ότι στο συγκεκριμένο παίγνιο υπάρχει και δεύτερο σημείο ισορροπίας κατά Nash, το (B,Δ). Επομένως, φαίνεται ότι η ισορροπία κατά Nash αντιμετωπίζει ορισμένα προβλήματα και δεν αποτελεί λύση για όλα τα παίγνια.

Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε την τέλεια ισορροπία υποπαιγνίων (Subgame Perfect Equilibrium-SPE), η οποία είναι η οποία είναι μια εξειδίκευση της θεωρίας κατά Nash που χρησιμοποιείται για ακολουθιακά παιχνίδια. Υποπαίγνιο ονομάζεται ένα μέρος του αρχικού παιγνίου σε μορφή δένδρου που ξεκινάει από έναν κόμβο αυτού έτσι ώστε σε κάθε σημείο κάθε παίκτης να γνωρίζει κάθε κίνηση όλων των παιχτών που προηγήθηκαν. Επομένως, η μέθοδος εντοπισμού των τέλειων σημείων ισορροπίας υποπαιγνίων βασίζεται στην επαγωγή προς τα πίσω (backward induction). Αρχικά, καθορίζουμε τη βέλτιστη στρατηγική του παίκτη που θα κάνει την τελευταία κίνηση στο παίγνιο ( $k=N$ ), καθώς αυτός γνωρίζει τις κινήσεις των υπολοίπων. Έπειτα, καθορίζεται η βέλτιστη στρατηγική του προηγούμενου παίκτη ( $k=N-1$ ) δεδομένου της βέλτιστης επιλογής του τελευταίου. Η διαδικασία συνεχίζεται με τον ίδιο τρόπο προς τα πίσω μέχρι να καθοριστεί η στρατηγική όλων των παικτών που συμμετέχουν στο παίγνιο και, έτσι, εντοπίζονται όλα τα σημεία ισορροπίας κατά Nash των υποπαιγνίων.[3]

## 2.2. Μοντέλο Διαπραγμάτευσης Rubinstein

Το μοντέλο διαπραγμάτευσης του Rubinstein αναφέρεται σε μια κατηγορία παιγνίων όπου δύο παίκτες θέλουν να μοιράσουν μια πίτα μεγέθους  $I$ , κάνοντας διαδοχικές προτάσεις ο ένας στον άλλον και ξεκινώντας από τον παίκτη  $1$ . Στην χρονική περίοδο  $0$ , ο παίκτης  $1$  προτείνει έναν διαμοιρασμό  $(x, I-x)$ . Αν ο παίκτης  $2$  αποδεχθεί την πρόταση τότε η διαπραγμάτευση τελειώνει και οι παίκτες λαμβάνουν  $x$  και  $I-x$  από την πίτα αντίστοιχα. Ωστόσο, αν ο παίκτης  $2$  αρνηθεί την πρόταση τότε συνεχίζεται η διαπραγμάτευση με την πρόταση του παίκτη  $2$  να ακολουθεί. Μόλις ο παίκτης  $2$  προτείνει, ο παίκτης  $1$  μπορεί να δεχθεί ή να απορρίψει την προσφορά και η διαδικασία συνεχίζεται ανάλογα. Οι υποθέσεις που κάνουμε είναι πως και οι δύο παίκτες επιθυμούν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο κομμάτι της πίτας, και, δεύτερον, σε κανέναν από τους δύο δεν αρέσουν οι καθυστερήσεις. Επομένως, σε περίπτωση που επιτευχθεί συμφωνία για διαμοιρασμό της πίτας  $(x, I-x)$  στην χρονική περίοδο  $t$ , τότε η εξόφληση για τον παίκτη  $1$  θα είναι  $x \cdot \delta_1^t$  και για τον παίκτη  $2$  η εξόφληση θα είναι  $(I-x) \cdot \delta_2^t$  όπου  $0 < \delta_1, \delta_2 < 1$  είναι ο συντελεστής διαπραγμάτευσης.

Ας εξετάσουμε αρχικά το ενδεχόμενο κατά το οποίο η χρονική περίοδος  $T$  μέσα στην οποία πρέπει να επιτευχθεί συμφωνία μεταξύ των 2 παικτών είναι πεπερασμένη. Αυτό σημαίνει ότι αν τη χρονική περίοδο  $T$  δεν έχει επιτευχθεί συμφωνία τότε και οι 2 παίκτες θα λάβουν από  $0$ . Ας θεωρήσουμε αρχικά  $T=2$ . Το μοντέλο διαπραγμάτευσης του Rubinstein μπορεί να παρασταθεί από το ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 1 Μοντέλο διαπραγμάτευσης του Rubinstein για 2 παίκτες.



Δεδομένου ότι ο παίκτης 2 απορρίπτει την πρόταση στην περίοδο 0 του παίκτη 1, τότε στην περίοδο 1 ο παίκτης 2 θα μπορεί να κάνει μια τελική πρόταση την οποία ο παίκτης 1 θα είναι υποχρεωμένος να δεχτεί. Έτσι, μπορεί να του προσφέρει  $x_2=0$ . Ας χρησιμοποιήσουμε τώρα την επαγωγή προς τα πίσω που περιγράψαμε προηγουμένως. Αν συμβεί αυτό που αναφέραμε στην περίοδο 1, τότε ο παίκτης 2 θα πάρει σαν αποζημίωση  $\delta_2$ . Επομένως, ο παίκτης 1 πρέπει να του προσφέρει κάτι μεγαλύτερο από  $\delta_2$  στην περίοδο 0, έτσι ώστε ο παίκτης 2 να αποδεχτεί την πρόταση. Άρα προφανώς θα προτείνει τον διαμοιρασμό  $(1-\delta_2, \delta_2)$  τον οποίο ο παίκτης 2 θα αποδεχθεί.

Ας θεωρήσουμε τώρα ένα γενικό  $T$ , τέτοιο ώστε  $T < \infty$ . Αν υποθέσουμε ότι ο παίκτης 2 κάνει την πρόταση στην περίοδο  $T$ , τότε η πρόταση αυτή θα είναι  $(0,1)$ . Ως εκ τούτου, στην περίοδο  $T-1$  η πρόταση του παίκτη 1 θα είναι  $(1-\delta_2, \delta_2)$ . Αντίστοιχα, στην περίοδο  $T-2$  η πρόταση του παίκτη 2 θα είναι  $(\delta_1^*(1-\delta_2), 1-\delta_1^*(1-\delta_2))$ . Αναδρομικά λοιπόν προκύπτει ότι στην περίοδο 0 η πρόταση του πρώτου παίκτη θα είναι  $1-\delta_2^*(1-\delta_1^*(1-\delta_2^*(\dots)))$  και το υπόλοιπο στον παίκτη 2. Αν αναλύσουμε αυτόν τον όρο προκύπτει:

$$\begin{aligned}
 x_1^* &= 1 - \delta_2(1 - \delta_1(1 - \delta_2(\dots))) \\
 &= 1 - \delta_2 + \delta_1\delta_2 - \delta_1\delta_2^2 + \dots + \delta_1^{T/2-1}\delta_2^{T/2-1} - \delta_1^{T/2-1}\delta_2^{T/2} \\
 &= \sum_{t=0}^{T/2-1} (1 - \delta_2)(\delta_1\delta_2)^t \\
 &= \frac{(1 - \delta_2)[1 - (\delta_1\delta_2)^{T/2}]}{1 - \delta_1\delta_2}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

και αντίστοιχα,

$$1 - x_1^* = \frac{\delta_2(1 - \delta_1) - (1 - \delta_2)(\delta_1\delta_2)^{T/2}}{1 - \delta_1\delta_2}. \tag{2}$$

Ας εξετάσουμε τώρα το ενδεχόμενο όπου η χρονική περίοδος  $T$  είναι άπειρη. Εδώ τα πράγματα δεν είναι τόσο εύκολα καθώς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η επαγωγή προς τα πίσω. Ο Rubinstein όμως το 1982 έδειξε ότι η λύση έχει μια απλή μορφή. Η λύση του Rubinstein ήταν η ακόλουθη:

- Ο παίκτης 1, στην σειρά του, προτείνει έναν διαμοιρασμό  $(x, 1-x)$  με 
$$x = \frac{1-\delta_2}{1-\delta_1\delta_2}.$$
- Ο παίκτης 2, στην σειρά του, προτείνει έναν διαμοιρασμό με  $(y, 1-y)$  με 
$$y = \delta_1 \frac{1-\delta_2}{1-\delta_1\delta_2}.$$
- Ο παίκτης 2 αποδέχεται οποιαδήποτε προσφορά του δίνει τουλάχιστον  $1-x$ . Επομένως, το παίγνιο τελειώνει αμέσως με τον διαμοιρασμό  $(x, 1-x)$ .

Τα αποτελέσματα αυτά προκύπτουν για  $\Gamma = \infty$  στις προηγούμενες σχέσεις. Επομένως, αποδείχτηκε από τον Rubinstein ότι ο διαμοιρασμός

$$\left( \frac{1-\delta_2}{1-\delta_1\delta_2}, \frac{\delta_2(1-\delta_1)}{1-\delta_1\delta_2} \right) \quad (3)$$

είναι το μοναδικό σημείο τέλειας ισορροπίας των μοντέλων διαπραγμάτευσης.

Μια σημαντική παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι για κοινό συντελεστή  $\delta$  τότε ο πρώτος παίκτης που κάνει πρόταση έχει σαφές πλεονέκτημα έναντι του δεύτερου. Για  $\delta=1$ , έχουμε ισότιμη διαίρεση της πίτας στα 2. Παρατηρούμε, τέλος, ότι με το μοντέλο διαπραγμάτευσης του Rubinstein απουσιάζει η εξάρτηση από τον χρόνο αφού επέρχεται συμφωνία στην περίοδο 0 με την πρώτη πρόταση του παίκτη 1.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το σημείο ισορροπίας για διάφορες τιμές του συντελεστή διαπραγμάτευσης  $\delta$ .

$\delta$	Σημείο Ισορροπίας
0.5	(0.67,0.33)
0.6	(0.625,0.375)
0.7	(0.59,0.41)
0.9	(0.53,0.47)
1	(0.5,0.5)

**Πίνακας 3 Σημείο ισορροπίας στο μοντέλο διαπραγμάτευσης Rubinstein 2-παικτών για διάφορες τιμές του  $\delta$ .**

## 2.3. Επέκταση Μοντέλου Rubinstein για $N$ -παίκτες

Ο Rubinstein λοιπόν απέδειξε πως το μη συνεργατικό παίγνιο 2 παικτών που αναφέρθηκε προηγουμένως θα συγκλίνει στο μοναδικό κατά Nash σημείο ισορροπίας. Όταν όλοι οι παίκτες θα έχουν τον ίδιο συντελεστή διαπραγμάτευσης  $\delta$  το σημείο αυτό θα είναι το:

$$(x_1^*, x_2^*) = \left[ \frac{1}{1+\delta}, \frac{\delta}{1+\delta} \right] \quad (4)$$

Οι πρώτες προσπάθειες επέκτασης του μοντέλου για να συμπεριλαμβάνει διαπραγματεύσεις με περισσότερους από δύο παίκτες ήταν απογοητευτικές. Το 1986 οι Shaked και Sutton [4] με τη μελέτη τους ήρθαν να αποδείξουν κάτι που ήταν ήδη γνωστό βέβαια στους κύκλους της θεωρίας παιγνίων. Το μοντέλο του Rubinstein δεν ίσχυε για παίγνια διαπραγματεύσεων με 3 ή περισσότερους παίκτες. Δηλαδή, η μοναδικότητα ενός σημείου ισορροπίας δεν υφίσταται αν στο παίγνιο συμμετέχουν περισσότεροι από δύο παίκτες. Υπάρχουν διάφορες εκδοχές του παιγνίου για  $N$ -παίκτες, εμείς όμως θα ασχοληθούμε με την πιο γνωστή λύση που ήρθε στην επιφάνεια από την Herrero [5]. Η Herrero λοιπόν κατέληξε στο παρακάτω συμπέρασμα:

a) Για  $\delta \geq \frac{1}{N-1}$ , κάθε διάνυσμα διαμοιρασμού της πίτας  $X$  μπορεί να θεωρηθεί ως Subgame Perfect Equilibrium (SPE).

b) Για  $\delta < \frac{1}{N-1}$ , το διάνυσμα διαμοιρασμού που δίνει το μοναδικό Subgame Perfect Equilibrium κατά Nash είναι :

$$X^* = \left( \frac{1-\delta}{1-\delta^N}, \delta \cdot \frac{1-\delta}{1-\delta^N}, \dots, \delta^{N-1} \cdot \frac{1-\delta}{1-\delta^N} \right) \quad (5)$$

Η λύση της Herrero είναι ένα γενικευμένο μοντέλο Rubinstein. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό έχουμε ένα παίγνιο με  $N$  ισότιμους παίκτες, όπου  $N > 2$ , που διεκδικούν μια πίτα μεγέθους 1 ξεκινώντας από την περίοδο  $t=1$  έως  $\infty$ . Ο πρώτος παίκτης κάνει την αρχική προσφορά την περίοδο  $t=1$  προτείνοντας  $x=(x_1, \dots, x_n)$ . Στην συνέχεια οι

υπόλοιποι παίκτες απαντούν στην πρόταση του πρώτου παίκτη είτε θετικά είτε αρνητικά. Αν όλοι οι παίκτες αποδεχθούν την προσφορά τότε το παίγνιο τερματίζεται και ο διαμοιρασμός είναι ο  $x$  που πρότεινε ο πρώτος παίκτης. Αν έστω και ένας παίκτης αρνηθεί την προσφορά τότε πηγαίνουμε στην επόμενη περίοδο διαπραγμάτευσης που προσφέρει ο επόμενος παίκτης τη δική του πρόταση. Αυτό συνεχίζεται μέχρι να υπάρξει οριστική συμφωνία, δηλαδή μέχρις ότου μια πρόταση από τον παίκτη  $k$  να γίνει αποδεκτή από όλους τους υπόλοιπους παίκτες  $(1, \dots, k-1, k+1, \dots, N)$ . Όταν η πρόταση  $x$  που γίνει στην περίοδο  $t$  γίνει αποδεκτή από όλους, η εξόφληση του παίκτη  $i$  θα είναι  $\delta^{t-1} \cdot x_i$  όπου  $\delta < 1$  είναι ο κοινός συντελεστής διαπραγμάτευσης.

Η λύση αυτή όμως είχε το μειονέκτημα ότι για τιμές του  $\delta$  κοντά στη μονάδα το μοντέλο αδυνατεί να δώσει μοναδικό σημείο ισορροπίας. Τελικά, τη λύση ήρθε να δώσει ο Asheim [5], ο οποίος απέδειξε ότι το μοναδικό σημείο ισορροπίας SPE κατά Nash που κατέληξε η Herrero για  $\delta < \frac{1}{N-1}$ , είναι η μοναδική στατική λύση του ακολουθιακού παιγνίου διαπραγμάτευσης  $N$ -παικτών. Συνδυάζοντας λοιπόν το μοντέλο της Herrero και την παραδοχή του Asheim αποδεικνύεται ότι για κάθε συντελεστή διαπραγμάτευσης  $\delta$  το μοναδικό Subgame Perfect Equilibrium κατά Nash είναι :

$$X^* = \left( \frac{1-\delta}{1-\delta^N}, \delta \cdot \frac{1-\delta}{1-\delta^N}, \dots, \delta^{N-1} \cdot \frac{1-\delta}{1-\delta^N} \right) \quad (6)$$

Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας ο οποίος συνοψίζει μερικά σημεία ισορροπίας κατά Nash για διάφορες τιμές του  $\delta$  για 3 παίκτες.

$N=3$ :

$\Delta$	Σημείο Ισορροπίας Nash
0.5	(0.57,0.29,0.14)
0.7	(0.46,0.32,0.22)
0.8	(0.41,0.33,0.26)
0.9	(0.37,0.33,0.30)

**Πίνακας 4** Σημείο ισορροπίας στο μοντέλο διαπραγμάτευσης του Rubinstein 3-παικτών για διάφορες τιμές του  $\delta$ .

Μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε ότι όσο η τιμή του  $\delta$  πλησιάζει τη μονάδα τότε το μοντέλο γίνεται πιο «δίκαιο» και η κατανομή της πίτας είναι πιο ισομοιρασμένη σε σχέση με μικρότερο  $\delta$ . Ωστόσο, γίνεται αντιληπτό ότι πάντοτε οι πρώτοι παίκτες θα έχουν πλεονέκτημα έναντι των υπολοίπων εξαιτίας του γεγονότος ότι εισέρχονται πρώτοι στη διαπραγμάτευση.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΚΙΝΗΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

---

**3.1 Εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα  
επικοινωνίας**

**3.2 Γενιές δικτύων κινητών επικοινωνιών**

**3.2.1 Κυψελωτά συστήματα 1ης γενιάς**

**3.2.2 Κυψελωτά συστήματα 2ης γενιάς**

**3.2.3 Κυψελωτά συστήματα 3ης γενιάς**

**3.2.4 Κυψελωτά συστήματα 4ης γενιάς**

---

### **3.1. Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνίας**

Τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας αποτελούνται από ένα δίκτυο σταθμών βάσης και κινητών τερματικών των οποίων η επικοινωνία διεξάγεται με τη βοήθεια του ασυρμάτου διαύλου. Από την πρώτη τους κιάλας εμφάνιση γνώρισαν ραγδαία εξέλιξη και πλέον αποτελούν τον καθρέφτη του σύγχρονου μοντέλου ζωής. Η ανάπτυξη τους, ωστόσο, δεν έχει σταματήσει, καθώς οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις για ποιοτικές ζεύξεις κατέστησαν τη βελτιστοποίηση τους έναν σημαντικό τομέα έρευνας. Τις τελευταίες δεκαετίες, τα ασύρματα δίκτυα έχουν κατηγοριοποιηθεί σε τεχνολογικές γενιές βάσει των υπηρεσιών και του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων που προσφέρουν. Στην συνέχεια θα αναλυθούν οι βασικές τεχνολογίες στον τομέα των ασυρμάτων δικτύων, εστιάζοντας στην αρχιτεκτονική των δικτύων 4ης γενιάς (LTE και WiMAX), αφού αποτελούν το κύριο αντικείμενο επεξεργασίας του παρόντος έργου.

Τα σημαντικότερα προβλήματα στην ασύρματη διάδοση των επίγειων επικοινωνιών είναι ο θόρυβος, οι παρεμβολές, η σκίαση και η πολυδιαδρομική διάδοση. Τα παραπάνω φαινόμενα μεταβάλλονται χρονικά, κυρίως λόγω της κινητικότητας των τερματικών σταθμών, κάτι το οποίο επιδεινώνει την κατάσταση. Το εκπεμπόμενο σήμα ακολουθεί διαφορετικά μονοπάτια μέχρι να φτάσει στο δέκτη, με αποτέλεσμα στον δέκτη να φτάνουν πολλαπλές εκδοχές του ίδιου σήματος (multipath propagation). Οι μηχανισμοί διάδοσης των ραδιοκυμάτων, εκτός της απευθείας συνιστώσας (Line-Of-Sight), είναι η ανάκλαση (reflection), η περίθλαση (diffraction) και η σκέδαση (scattering). Η επίδραση του ραδιοδιαύλου στο εκπεμπόμενο σήμα γίνεται αισθητή όσον αφορά το πλάτος ή την ισχύ κυρίως με τις απώλειες διάδοσης (path loss) και τα φαινόμενα των διαλείψεων μικρής και μεγάλης κλίμακας (small and large scale fading). Οι απώλειες διάδοσης, στις οποίες έχει αποδοθεί ο όρος εξασθένιση, καθορίζουν την εξάρτηση της μείωσης της μέσης ισχύος του σήματος από την απόσταση πομπού-δέκτη. Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας οφείλονται στην σκίαση (shadowing), δηλαδή την τυχαία μεταβολή της εξασθένισης γύρω από την μέση τιμή για δεδομένη απόσταση. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας περιγράφουν την μεταβολή των χαρακτηριστικών του σήματος (πλάτους και φάσης) για μετατοπίσεις του κινητού σταθμού της τάξης του  $\lambda/2$ , όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος που εξαρτάται από το μέσο διάδοσης. [1] [6]

## **3.2. Γενιές Δικτύων Κινητών Επικοινωνιών**

### **3.2.1. Κυψελωτά Συστήματα 1ης Γενιάς**

Η πρώτη γενιά (1G) κυψελωτών συστημάτων κινητής επικοινωνίας χρησιμοποιούσε αναλογική μετάδοση για υπηρεσίες φωνής, τεχνολογία FM για διαμόρφωση συχνότητας, Frequency Division Duplex (FDD) για αμφίδρομη επικοινωνία και προσπέλαση με διαίρεση συχνότητας (FDMA). Το πρώτο κυψελωτό σύστημα πρώτης γενιάς κατασκευάστηκε από την Nippon Telephon and Telegraph το 1979 στην Ιαπωνία, ενώ αργότερα κατασκευάστηκε στις ΗΠΑ το Advanced Mobile Phone System (AMPS) , το 1982, στα 800-900 MHz. Λόγω της χρήσης της αναλογικής τεχνολογίας τα αναλογικά σήματα ομιλίας παρέχονται από τα ασύρματα συστήματα πρώτης γενιάς. Τα συστήματα αυτά παρείχαν, κατά κύριο λόγο, υπηρεσίες φωνής εξωτερικού χώρου. Υποστήριζαν πολύ χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης (έως 2.4 Kbps) και διέθεταν δύο ζώνες συχνοτήτων των 25MHz για την αμφίδρομη μετάδοση μέσω της μεταγωγής κυκλώματος. Ωστόσο, τα συστήματα πρώτης γενιάς είναι βασισμένα σε αναλογικά συστήματα, ως εκ τούτου, η μετάδοση δεν είναι ασφαλής. Η χρήση αναλογικών τεχνικών μετάδοσης και λήψης είχε ως συνέπεια αυξημένες παρεμβολές και μειωμένη δυνατότητα επιτυχούς ανάκτησης αλλοιωμένου σήματος, καθώς και έλλειψη κρυπτογράφησης, κάτι το οποίο δημιουργούσε προβλήματα ασφάλειας στην επικοινωνία. Οι τεχνολογίες 1G μέχρι και τα τέλη του προηγούμενου αιώνα είχαν αντικατασταθεί με μεταγενέστερες γενιές δικτύων.

### **3.2.2. Κυψελωτά Συστήματα 2ης Γενιάς**

Το σημαντικό πρόβλημα της ασφάλειας με τα συστήματα πρώτης γενιάς ήρθε να αντιμετωπίσει η δεύτερη γενιά (2G) δικτύων στις αρχές του 1990. Τα 2G δίκτυα χρησιμοποίησαν τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης, ήταν βασισμένα κυρίως στην μεταγωγή κυκλώματος και προσέφεραν υπηρεσίες χαμηλού ρυθμού δεδομένων (έως 9.6 kbps). Χρησιμοποίησαν πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDMA) και πολυπλεξία διαίρεσης κώδικα (CDMA) και είχαν μεγαλύτερη χωρητικότητα από τα 1G ασύρματα δίκτυα. Βασικός εκπρόσωπος της γενιάς αυτής είναι το γνωστό GSM (Global System for Mobile communications), αλλά ταυτόχρονα αναπτύχθηκαν ανά τον κόσμο και άλλα παρεμφερή συστήματα. Το GSM σχεδιάστηκε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Προτυποποίησης (ETSI) που ιδρύθηκε το 1988 γι' αυτόν τον σκοπό. Στηρίζεται σε



FDMA τεχνική, με 200 KHz απόσταση φερόντων, αλλά συνδυάζει και την TDMA λογική με Frequency Division Duplex(FDD). Κάθε φέρον έχει 8 διαύλους-χρονοσχισμές με διάρκεια 0.577 msec, ενώ χρησιμοποιεί την τεχνική ψηφιακής διαμόρφωσης Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) με τελικό ρυθμό μετάδοσης τα 270.8 Kbps. Λόγω της αύξησης στο φάσμα, η αποδοτικότητα αυτής της γενιάς είναι έως και 3 φορές μεγαλύτερη από τα αναλογικά συστήματα πρώτης γενιάς. Η ψηφιακή τεχνολογία επέτρεψε τη σημαντική διείσδυση της κινητής τηλεφωνίας στην αγορά παγκοσμίως, καθώς η ασφάλεια και η ποιότητα των κλήσεων αυξήθηκε σημαντικά. Επίσης, το 1992 έγινε για πρώτη φορά εφικτή η ανταλλαγή μηνυμάτων κειμένου που αποτέλεσε σπουδαία καινοτομία. Η μειωμένη πολυπλοκότητα των σταθμών βάσης, σε συνδυασμό με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας στα 900 και 1800 MHz, οδήγησε σε μικρότερες κυψέλες και κατά συνέπεια σε αυξημένη δυνατότητα εξυπηρέτησης χρηστών.

### **3.2.3. Κυβελωτά συστήματα 3ης γενιάς**

Τα δίκτυα τρίτης γενιάς (3G) αποτελούν και αυτά με τη σειρά τους μια σημαντική καινοτομία της τεχνολογίας των κινητών επικοινωνιών. Οι κύριοι λόγοι ανάπτυξης των 3G ήταν οι εφαρμογές πολυμέσων, η έλλειψη χωρητικότητας και η ανάγκη για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης ώστε να μεταδίδονται εικόνες υψηλής ποιότητας και video πραγματικού χρόνου, καθώς και η παγκόσμια παρουσία του 3G με την έννοια ότι υπήρχε ανάγκη για πρόσβαση των χρηστών από οπουδήποτε στον κόσμο και από οποιοδήποτε δίκτυο. Οι βασικές απαιτήσεις που τέθηκαν για τα δίκτυα τρίτης γενιάς είναι :

- Ρυθμοί μετάδοσης μέχρι και 2 Mbps
- Πολυπλεξία διαφορετικών υπηρεσιών (video, εικόνα, δεδομένα, φωνή) πάνω στην ίδια σύνδεση.
- Μεταβαλλόμενος ρυθμός μετάδοσης, ώστε να παραχωρείται κατάλληλο εύρος ζώνης σε κάθε υπηρεσία (μεταγωγή πακέτου).
- Υψηλή φασματική απόδοση
- Συνύπαρξη Frequency Division Duplex (FDD) και Time Division Duplex(TDD) συστημάτων

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) καθιέρωσε ένα σύνολο προδιαγραφών για την επίτευξη αυτών των στόχων, το IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000). Οι ραδιοεπαφές που έχουν αναπτυχθεί για τα συστήματα 3ης γενιάς είναι το WCDMA (Wideband CDMA) και το Multicarrier-CDMA. Στην Ευρώπη το ETSI ονόμασε τα δίκτυα 3ης γενιάς ως UMTS (Universal Mobile Telecommunications Systems). Διαθέτουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης πράγμα το οποίο καθιστά το δίκτυο κατάλληλο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Επιπλέον, αξιοποιούνται τα πλεονεκτήματα της μεταγωγής πακέτου, όπως η δυνατότητα συνεχούς σύνδεσης και εξαλείφονται τα μειονεκτήματα της μεταγωγής κυκλώματος, όπως η εγκατάσταση σύνδεσης πριν την μετάδοση.

Με την πάροδο του χρόνου, η αύξηση του αριθμού των χρηστών και η ανάπτυξη πολλών διαφορετικών συστημάτων, έκανε την ανάγκη για χωρητικότητα συνεχώς μεγαλύτερη. Επομένως, η λύση ήταν οι έρευνες για την κατασκευή μιας 4ης γενιάς συστημάτων.

#### **3.2.4. Κυψελωτά συστήματα 4ης γενιάς**

Τα 4G δίκτυα λύνουν το πρόβλημα της χωρητικότητας και της σωστής αξιοποίησης του φάσματος με την ενσωμάτωση και ενοποίηση όλων των κινητών τεχνολογιών που υπάρχουν. Οι βασικοί στόχοι της νέας τεχνολογίας είναι η αδιάλειπτη δυνατότητα επικοινωνίας, οπουδήποτε και οποτεδήποτε, η παροχή πολλών και διαφορετικών υπηρεσιών και το χαμηλό κόστος ανά bit. Βασικό χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών είναι ότι βασίζονται εξ ολοκλήρου στο πρωτόκολλο IP πετυχαίνοντας υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, της τάξεως των 50-100 Mbps για χρήστες με υψηλή κινητικότητα και 1Gbps για χρήστες με χαμηλή κινητικότητα, προσφέροντας έτσι γρήγορες μεταβάσεις, πολύ καλή ποιότητα υπηρεσιών και ασφάλεια. Η 4η γενιά κινητών επικοινωνιών περιλαμβάνει δυο εμπορικά εφαρμοσμένα συστήματα: το Worldwide interoperability for Microwave Access – WiMAX (N. Κορέα 2007) και το Long Term Evolution – LTE (Σκανδιναβία 2009).

Το LTE σχεδιάστηκε ώστε να γίνεται πλήρης επαναχρησιμοποίηση των πόρων σε γειτονικές κυψέλες. Στη ζεύξη καθόδου χρησιμοποιεί την OFDMA τεχνική, ενώ στη ζεύξη ανόδου την Single Carrier FDMA τεχνική προκειμένου να μειωθεί το κόστος των κινητών τερματικών. Το WiMAX έχει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά: το φυσικό

στρώμα χρησιμοποιεί την τεχνική OFDM που προσφέρει ισχυρή προστασία έναντι της πολυδιαδρομικής διάδοσης και βέβαια την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης OFDMA. Υποστηρίζονται και οι δύο τεχνικές αμφιδρόμησης TDD και FDD, ενώ η αρχιτεκτονική του συστήματος είναι πλήρως βασισμένη στο Internet Protocol(IP). Επίσης, υποστηρίζει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης θεωρητικά μέχρι 350 Mbps στο DL και 200 Mbps στο UL, μεταβλητό εύρος ζώνης (5,10,20 και 40 MHz), μεταβλητό ρυθμό μετάδοσης και προσαρμοστικές τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (AMC: Adaptive Modulation and Coding).

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

## ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΜΕ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΙΡΕΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (OFDMA) ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ DEVICE-TO-DEVICE ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ

---

### 4.1 Η Δομή του OFDMA

### 4.2 Τα Πλεονεκτήματα και τα Μειονεκτήματα του OFDMA

### 4.3 Εισαγωγή στην Device-to-Device Επικοινωνία

### 4.4 Δομή των Κυψελωτών Δικτύων με την Παρουσία D2D Συνδέσεων

### 4.5 Εισαγωγή στις Τεχνικές Ανάθεσης Πόρων

### 4.6 Κατηγορίες Τεχνικών Ανάθεσης Πόρων

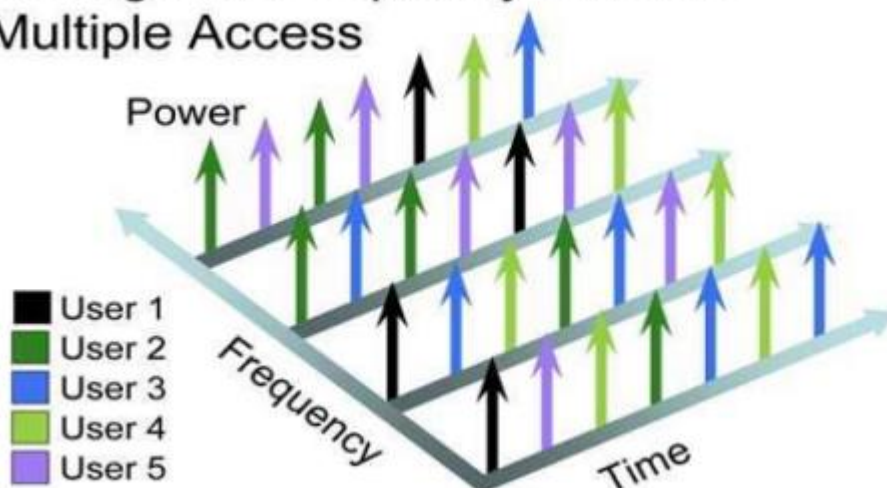
---

Με την πάροδο του χρόνου, η ανάγκη για ανάπτυξη δικτύων που να υποστηρίζουν μεγάλους ρυθμούς δεδομένων, υψηλή ποιότητα υπηρεσιών και μεγαλύτερο πλήθος χρηστών με διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την ποιότητα της υπηρεσίας, έγινε πολύ μεγάλη. Τα ευρυζωνικά δίκτυα όμως ήρθαν αντιμέτωπα με τις δυσμενείς επιπτώσεις του ασύρματου καναλιού, οι οποίες επηρέαζαν την επικοινωνία σε μεγάλο βαθμό. Αυτό συμβαίνει διότι το μεγάλο εύρος ζώνης που χρησιμοποιούν υπερβαίνει το εύρος ζώνης συνοχής του διαύλου, κάτι το οποίο προκαλεί την εμφάνιση συχνοεπιλεκτικών διαλείψεων καθώς και το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής λόγω του μεγάλου όγκου πληροφορίας. Είναι ακόμη απαραίτητη η βελτίωση της φασματικής απόδοσης του δικτύου λόγω του ολοένα και περισσότερο αυξημένου αριθμού των χρηστών και των απαιτήσεών τους. Οι προηγούμενες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης και διαμόρφωσης προσπάθησαν να αντιμετωπίσουν αυτά τα προβλήματα χωρίς ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η πολλαπλή πρόσβαση Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) προσφέρει αποτελεσματικές τεχνικές για την κάλυψη των αναγκών των συστημάτων 4ης γενιάς και αποτελεί την καλύτερη στρατηγική πολλαπλής πρόσβασης για τα σύγχρονα δίκτυα ασυρμάτων επικοινωνιών. [7]

### ***4.1. Η Δομή του OFDMA***

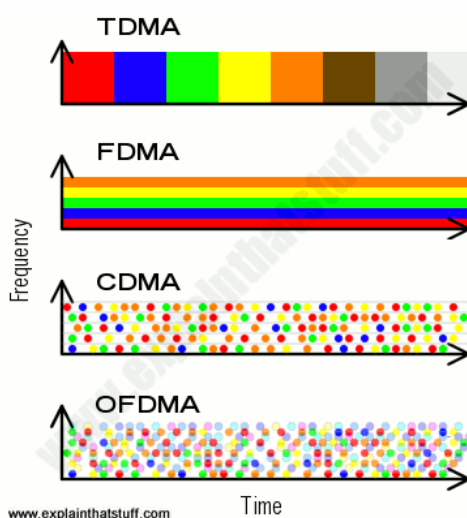
Η τεχνική OFDMA ουσιαστικά επεκτείνει την διαμόρφωση OFDM ως προς το ότι κάθε υποσύνολο του διατιθέμενου φάσματος εκχωρείται σε συγκεκριμένο χρήστη. Η βασική ιδέα της τεχνικής OFDM είναι η διαίρεση του προς μετάδοση ευρυζωνικού τμήματος σε μεγάλο αριθμό παράλληλων σημάτων στενής ζώνης. Το OFDM αναλαμβάνει τον καθορισμό του συνόλου των διαθέσιμων υπό-φερόντων, ενώ το OFDMA την ακριβή αντιστοιχία μεταξύ υπό-φερόντων και χρηστών του συστήματος. Η OFDMA τεχνική, αποτελεί λοιπόν μια υβριδική τεχνική που συνδυάζει τις FDMA και TDMA τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, με την OFDM τεχνική διαμόρφωσης. Με τον τρόπο αυτό, η διαφοροποίηση των χρηστών μπορεί να γίνεται είτε στο χρόνο είτε στην συχνότητα είτε και στα δύο, παρέχοντας έτσι περισσότερες δυνατότητες και περισσότερους βαθμούς ελευθερίας στον αλγόριθμο διαχείρισης ραδιοπόρων του δικτύου. Για την καλύτερη κατανόηση της OFDMA τεχνικής μπορούμε να παρατηρήσουμε τον τρόπο που διαφοροποιούνται οι χρήστες κατά την τεχνική αυτή στο σχήμα 2.

## Orthogonal Frequency-Division Multiple Access



Σχήμα 2 Πολλαπλή πρόσβαση OFDMA.

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η βασική ιδέα του OFDMA που είναι ο διαχωρισμός του χρόνου σε OFDM σύμβολα και των συχνοτήτων σε OFDM υποφέρουσες. Οι χρήστες, λοιπόν, μεταδίδουν πληροφορία σε διαφορετικά υποκανάλια μεταξύ τους και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ο καθένας. Ακόμη, υπάρχει η δυνατότητα διαφορετικών διαμορφώσεων και ρυθμών κωδικοποίησης για κάθε ένα από τα υποφέρουσες, κάτι το οποίο παρέχει την δυνατότητα εξυπηρέτησης των χρηστών ανάλογα με τις ανάγκες τους, σε διαφορετικά επίπεδα ποιότητας της υπηρεσίας. Για την καλύτερη κατανόηση των διαφορών των τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης μπορούμε να παρατηρήσουμε τον τρόπο που πραγματοποιούνται στο σχήμα 3.

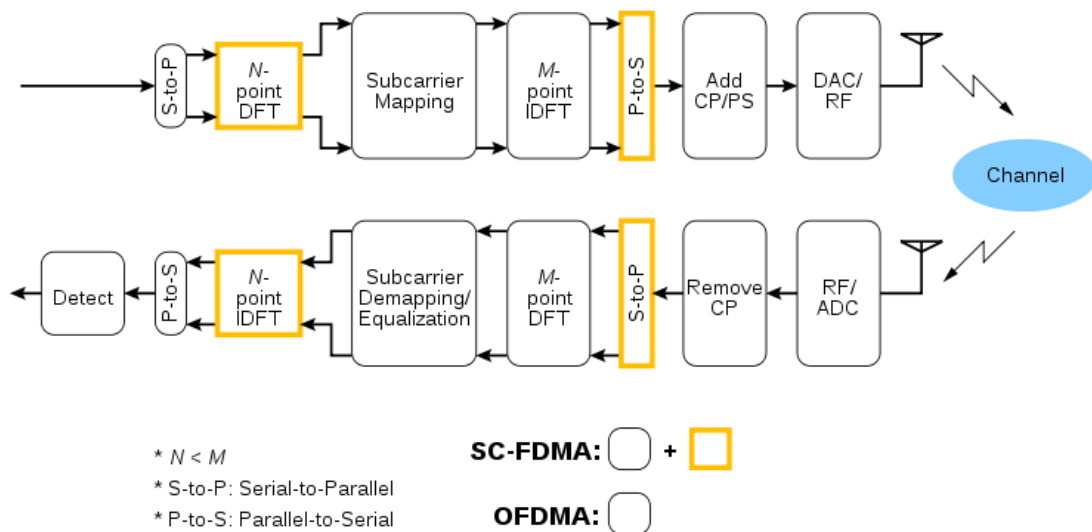


Σχήμα 3 Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης.

Στο σχήμα αυτό φαίνεται ότι η OFDMA τεχνική συνδυάζει τις τεχνικές FDMA και TDMA επιτυγχάνοντας ευελιξία στο πεδίο του χρόνου αλλά και της συχνότητας.

Στο Σχήμα 4 βλέπουμε σε μορφή μπλοκ διαγράμματος από τι αποτελείται ένα σύστημα OFDMA. Παρατηρούμε ότι πριν παραχθεί το σύμβολο που τελικά θα μεταδοθεί γίνεται ανάθεση των υποφερουσών στους χρήστες (Subcarrier Mapping), στην πλευρά του πομπού, ενώ στην πλευρά του δέκτη έχουμε την αντίστροφη διαδικασία (Subcarrier De-mapping).

Το OFDMA χρησιμοποιεί δύο μεθόδους ταξινόμησης των υποφερουσών στους χρήστες: την εντοπισμένη (localized - LFDMA) και την κατανεμημένη (distributed-DFDMA). Στην εντοπισμένη μέθοδο, τα δεδομένα κάθε χρήστη μεταδίδονται σε συνεχόμενες υποφέρουσες, ενώ στην κατανεμημένη μοιράζονται σε όλο το εύρος ζώνης του συστήματος δημιουργώντας ένα ασυνεχές φάσμα. Μια ειδική περίπτωση κατανεμημένης χαρτογράφησης είναι η διεμπλεκόμενη (interleaved – IFDMA) στην οποία οι υποφέρουσες του κάθε χρήστη ισαπέχουν μεταξύ τους.



Σχήμα 4 Μπλοκ διάγραμμα OFDMA.

## ***4.2. Τα Πλεονεκτήματα και τα Μειονεκτήματα του OFDMA***

Όπως είδαμε αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα, η OFDMA είναι μια καινοτομική τεχνική που παρέχει βελτιωμένη πρόσβαση πόρων στον χρήστη και δίνει λύσεις σε πολλά από τα προβλήματα που δημιουργεί το περιβάλλον διάδοσης. Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του OFDMA είναι τα εξής :

- Λόγω της ορθογωνιότητας των υποφερουσών, δεν υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ τους παρά το γεγονός ότι επικαλύπτονται.
- Εξαλείφεται τελείως η διασυμβολική παρεμβολή (ICI) μέσω της χρήσης του κυκλικού προθέματος (CP).
- Οι πομποδέκτες είναι φθηνότεροι λόγω της απλότητας στη σχεδίαση τους η οποία βασίζεται στη χρήση FFT και IFFT ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.
- Ο διαχωρισμός του εύρους ζώνης σε υποφέρουσες προσφέρει νέες δυνατότητες για το επίπεδο υπηρεσιών και τη διαχείριση ραδιοπόρων μιας και είναι εφικτή η ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό πόρων.
- Μειώνει τον λόγο της μέγιστης προς τη μέση ισχύ (PAPR), κάτι το οποίο αποτελεί κύριο πρόβλημα στην OFDM. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για την εκπομπή του σήματος απαιτείται ένας αριθμός υποκαναλιών, και όχι ολόκληρο το εύρος ζώνης της ζεύξης.
- Τέλος, το OFDMA είναι ανθεκτικό στην πολυδιαδρομική διάδοση λόγω της αυξημένης διάρκειας των OFDM συμβόλων κάθε υποφέροντος.

Παρ'όλα αυτά, η τεχνική OFDMA έχει και ορισμένες αδυναμίες. Οι βασικότερες εξ' αυτών είναι:

- Προκειμένου να διατηρείται η ορθογωνιότητα των υποφερουσών ώστε να μην προκαλείται ACI παρεμβολή μεταξύ τους στον δέκτη, απαιτείται η χρήση σχεδόν ιδανικών ζωνοπερατών φίλτρων κάτι το οποίο αυξάνει πολύ το κόστος σχεδίασης.
- Η τεχνική OFDMA είναι περισσότερο ευαίσθητη σε προβλήματα συγχρονισμού του δέκτη σε σχέση με τις διαμορφώσεις μοναδικού φέροντος. Έτσι, ένα λάθος στο συγχρονισμό θα μπορούσε να οδηγήσει σε απώλεια της



ορθογωνιότητας και θα προκαλούσε την εμφάνιση παρεμβολών των γειτονικών διαύλων και κατά συνέπεια την αποτυχία στην σωστή υλοποίηση της βασικής ιδέας του OFDMA.

- Άλλος ένας παράγοντας που ανεβάζει το κόστος στην OFDMA τεχνική είναι η χρησιμοποίηση  $N$  ανεξάρτητων διαμορφωτών και αποδιαμορφωτών, όπου όταν ο αριθμός των καναλιών είναι πολύ μεγάλος, μιλάμε για πολύ υψηλό κόστος υλοποίησης.
- Το κύριο πρόβλημα είναι οι διακαναλικές παρεμβολές, οι οποίες είναι αναπόφευκτες σε περιβάλλον με πολλούς χρήστες.

Παρά τις αδυναμίες της OFDMA τεχνικής που παρουσιάστηκαν εκτενώς παραπάνω, η μεγάλη της προσαρμοστικότητα και ευελιξία στη διαχείριση των ασύρματων πόρων, καθιστούν την OFDMA τεχνική ιδανική λύση για το σύνολο των σύγχρονων δικτύων 4<sup>ης</sup> γενιάς (IEEE 802.16 και LTE). [8]

### ***4.3. Εισαγωγή στην Device-to-Device (D2D) Επικοινωνία***

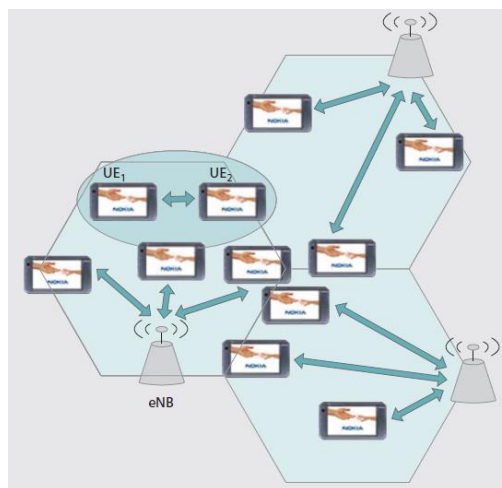
Τα τελευταία χρόνια οι εφαρμογές υψηλού ρυθμού δεδομένων, όπως κλήσεις video, διαδραστικά παιχνίδια, υπηρεσίες κοινωνικής δικτύωσης, έχουν γίνει όλο και περισσότερο δημοφιλείς στα κυψελωτά δίκτυα. Για την ύπαρξη περισσότερων υπηρεσιών υψηλού ρυθμού δεδομένων, η επικοινωνία συσκευής προς συσκευή (device-to-device – D2D - communication) έχει προταθεί και έχει προσελκύσει την προσοχή τόσο των πανεπιστημίων όσο και της βιομηχανίας αφού προσφέρει μια μεγάλη ποικιλία από πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών κυψελωτών δικτύων. Ορισμένα από τα οφέλη που προσφέρει η D2D επικοινωνία είναι τα εξής:

- Υψηλότερη απόδοση
- Αποδοτική χρήση και καλύτερη επαναχρησιμοποίηση του φάσματος
- Εκτεταμένη κάλυψη του δικτύου
- Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του δικτύου
- Χαμηλή καθυστέρηση

## 4.4. Δομή των Κυψελωτών Δικτύων με την Παρουσία D2D Συνδέσεων

Η ιδέα της D2D επικοινωνίας ως ένα τμήμα του κυψελωτού δικτύου φαίνεται στο σχήμα 5. Εκτός από την κλασσική παραδοσιακή λειτουργία των κυψελωτών δικτύων, όπου ένας χρήστης (User Equipment - UE) εξυπηρετείται από το δίκτυο μέσω των σταθμών βάσης (Base Stations-BS), που ονομάζονται evolved NodeBs (eNBs) στην κλασσική LTE αρχιτεκτονική, υπάρχει και η δυνατότητα ένας χρήστης να επικοινωνεί απευθείας με κάποιον άλλο μέσω των D2D συνδέσεων [9].

Οι σταθμοί βάσης μπορούν να ελέγξουν τους πόρους που χρησιμοποιούνται στην κυψέλη ακόμα και στις D2D συνδέσεις. Οι σταθμοί βάσης μπορούν, επίσης, να θέσουν περιορισμούς στην ισχύ εκπομπής των D2D πομπών με σκοπό την μείωση των παρεμβολών στους δέκτες.



**Σχήμα 5** Device-to-device επικοινωνία μεταξύ UE1 και UE2 σαν τμήμα του κυψελωτού δικτύου.

Δεδομένου ότι υπάρχει ένας κεντρικός controller (eNB) που έχει καταγεγραμμένα τα χαρακτηριστικά του δικτύου (συντεταγμένες κάθε χρήστη, κέρδος κάθε χρήστη ως προς κάθε κανάλι), οι D2D επικοινωνίες έχουν γίνει αναπόσπαστο μέρος των κυψελωτών δικτύων. Ωστόσο, οι D2D επικοινωνίες συνοδεύονται από μια πληθώρα απαιτήσεων και περιορισμών οι οποίοι θα πρέπει να αντιμετωπισθούν και να ληφθούν σοβαρά υπόψη σε οποιαδήποτε απόπειρα υλοποίησης, και είναι οι εξής:

- *κατανάλωση ενέργειας.* Οι περισσότερες D2D συσκευές αναμένεται να λειτουργούν με μπαταρίες ή υπό το καθεστώς αυτόματης συγκομιδής ενέργειας

(energy harvesting), για παράδειγμα μέσω ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης ή μέσω ηλιακής ακτινοβολίας. Πρέπει λοιπόν να ληφθεί ειδική μέριμνα στις χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις των συσκευών.

- *εγκατάσταση και συντήρηση.* Οι συσκευές θα πρέπει ιδανικά να χρειάζονται ελάχιστη παραμετροποίηση κατά την εγκατάσταση και να είναι εύκολη η συντήρηση τους.
- *ανθεκτικότητα στο περιβάλλον λειτουργίας.* Τα συστήματα D2D ίσως κληθούν να αναπτυχθούν σε αντίξοο περιβάλλον, οπότε επιβάλλεται η σχεδίαση ανθεκτικών συσκευών.
- *αποφυγή και διαχείριση αστοχίας.* Ανάλογα με την κρισιμότητα της εφαρμογής θα πρέπει να εξεταστούν λύσεις που να διαθέτουν χαρακτηριστικά εφεδρείας προκειμένου το σύστημα να συνεχίσει να λειτουργεί και σε περιπτώσεις μερικής αστοχίας.
- *ασφάλεια ιδιωτικότητας.* Πρέπει κατά την σχεδίαση να λαμβάνονται υπόψη ζητήματα ασφάλειας και προστασίας των προσωπικών δεδομένων που διατηρεί κάθε συσκευή.

## ***4.5. Εισαγωγή στις Τεχνικές Ανάθεσης Πόρων***

Αφού γίνει η επιλογή της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης των χρηστών, αμέσως επόμενο βήμα είναι να εξετάσουμε τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η διαχείριση των πόρων του δικτύου. Οι πόροι του δικτύου, υποφέρουσες συχνοτήτων και ισχύς εκπομπής, όπως είναι φυσικό είναι περιορισμένοι στον αριθμό τους. Ωστόσο, έχουν την πολύ χρήσιμη ιδιότητα της επαναχρησιμοποίησης, δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες από μια φορές χωρίς να εξαντλούνται μεμονωμένα. Επομένως, κάθε σύστημα ασυρμάτων επικοινωνιών οφείλει να διαχειρίζεται αποδοτικά τους πόρους του έτσι ώστε να μην γίνεται κατάχρηση και παράλληλα να εκμεταλλεύεται την δυνατότητα επαναχρησιμοποίησής τους. Επιπλέον, με την κατάλληλη επιλογή μιας τεχνικής ανάθεσης υποφερουσών μπορούμε να μειώσουμε την αλγοριθμική πολυπλοκότητα και την εκπεμπόμενη ισχύ του συστήματος. Η επιλογή, λοιπόν, της τεχνικής ανάθεσης των πόρων του δικτύου παίζει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία του. Για τον σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί πολλές κατηγορίες τεχνικών διαχείρισης ραδιοπόρων βασισμένες σε διαφορετικά κριτήρια. Στην ενότητα που ακολουθεί γίνεται αναφορά στις βασικότερες κατηγορίες καθώς και στις τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα και αφορούν τα OFDMA συστήματα. [10]

## 4.6. Κατηγορίες Τεχνικών Ανάθεσης Πόρων

Με τον όρο διαχείριση ασυρμάτων πόρων (Resource Radio Management-RRM) στα OFDMA συστήματα αναφερόμαστε ουσιαστικά στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η κατανομή των υποφερουσών (subcarriers) του φάσματος στους χρήστες. Μια βασική κατηγοριοποίηση των τεχνικών κατανομής διαύλων είναι η εξής: *στατική κατανομή καναλιών* (Fixed Channel Assignment-FCA), *δυναμική κατανομή καναλιών* (Dynamic Channel Assignment-DCA) και η *υβριδική κατανομή καναλιών* (Hybrid Channel Assignment-HCA).

Σύμφωνα με την στατική κατανομή καναλιών, τα κανάλια αποδίδονται μόνιμα σε συγκεκριμένες κυψέλες χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα ανακατανομής τους στους χρήστες. Έτσι, εάν όλοι οι διαύλοι είναι κατειλημμένοι, μια νέα κλήση ή προσπάθεια για διαπομπή θα απορριφθεί. Το μεγάλο μειονέκτημα της στατικής κατανομής είναι η μη αποτελεσματική διαχείριση του φάσματος σε δίκτυα με ανομοιόμορφη κίνηση. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος αυτή είναι απλή και δεν απαιτεί γνώση των περιβαλλοντικών συνθηκών με αποτέλεσμα να είναι πολύ χαμηλή σε πολυπλοκότητα.

Στην δυναμική κατανομή διαύλων τα υποφέρουσες δεν αποδίδονται μόνιμα σε κυψέλες, αλλά κάθε κυψέλη χρησιμοποιεί οποιοδήποτε υποφέρον αρκεί να μην παραβιάζει τον κανόνα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των τεχνικών αυτών είναι ότι κατανέμουν τους πόρους ανάλογα με την κατάσταση του συστήματος και έτσι έχουν μεγαλύτερη ευελιξία σε συστήματα με ανομοιόμορφη κίνηση. Από την άλλη πλευρά, η διαχείριση και αποθήκευση των πληροφοριών σχετικά με το περιβάλλον διάδοσης εισάγει στο σύστημα υψηλή πολυπλοκότητα. Μια μέση λύση στην κατανομή των ραδιοδιαύλων δίνουν οι υβριδικές μέθοδοι.

Οι υβριδικές μέθοδοι συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των DCA και FCA μεθόδων ώστε να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματά τους. Στην πιο κλασική περίπτωση, τα κανάλια χωρίζονται σε αυτά που χρησιμοποιούνται στατικά και σε αυτά που χρησιμοποιούνται δυναμικά. Τα στατικά κανάλια χρησιμοποιούνται υπό κανονικές συνθήκες κίνησης και τα δυναμικά υπό συνθήκες διακυμάνσεων της κίνησης. Σημαντικό πλεονέκτημα των υβριδικών μεθόδων είναι ότι πετυχαίνουν καλύτερη διαχείριση των πόρων με το δυναμικό κομμάτι και παράλληλα κρατώντας το

μεγαλύτερο κομμάτι τους ως στατικό διατηρούν την πολυπλοκότητα του συστήματος σε χαμηλά επίπεδα.

Ένα άλλο σημαντικό είδος διαχωρισμού των τεχνικών ανάθεσης πόρων γίνεται ως προς τις πληροφορίες που αντλούν και επεξεργάζονται από το κανάλι διάδοσης. Έχουμε λοιπόν τις τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιούν την γνώση του καναλιού (Channel State Information-CSI) για να αποδώσουν τους πόρους στους χρήστες και τις τεχνικές χωρίς γνώση του καναλιού. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούν τη γνώση καναλιού προσπαθούν κατά κύριο λόγο να λύσουν σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης, όπως η μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης ή η ελαχιστοποίηση της ισχύος εκπομπής. Επειδή για την επίλυση τους απαιτούνται μεγάλοι υπολογισμοί και υψηλή πολυπλοκότητα, συνήθως γίνεται εστίαση στο ένα από τα δύο προβλήματα. Οι τεχνικές αυτές μπορούν να παρέχουν αποδοτική κατανομή των φερόντων και εξασφάλιση της ποιότητας της υπηρεσίας των χρηστών αξιοποιώντας τις συνθήκες του καναλιού, όμως από την άλλη, αυξάνουν την πολυπλοκότητα του συστήματος. Αντιθέτως, οι τεχνικές που δεν απαιτούν CSI χαρακτηρίζονται από χαμηλή πολυπλοκότητα και έτσι μπορούν να λάβουν υπόψη τους περισσότερους παράγοντες τους οποίους οι τεχνικές με CSI περιόριζαν. Βέβαια, δεν εστιάζουν στην διαχείριση των ρυθμών μετάδοσης και της ποιότητας υπηρεσίας καθώς δεν έχουν γνώση των συνθηκών του καναλιού.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>0</sup>

## Προϋπάρχουσα έρευνα

---

## 5.1. Υπάρχουσα Βιβλιογραφία

Για να μπορέσει ένα κυψελωτό δίκτυο να υποστηρίξει την σύνδεση μεταξύ πολλών συσκευών, η αποτελεσματική κατανομή των πόρων στα υπάρχοντα δίκτυα είναι μια βασική και ιδιαίτερα περίπλοκη απαίτηση. Στο τρέχον κεφάλαιο θα παρουσιαστούν κάποιες υπάρχουσες μέθοδοι για κατανομή πόρων (Resource Allocation - RA) σε κυψελωτά δίκτυα όπου υπάρχει επικοινωνία συσκευής προς συσκευή.

### 1) **Resource Allocation for Uplink M2M Communication: A Game Theory Approach - Κατανομή Πόρων για Ανερχόμενες Ζεύξεις σε Επικοινωνία Μηχανής-Προς-Μηχανή: Μια προσέγγιση της Θεωρίας Παιγνίων.** [11]

Στην εργασία αυτή προτείνονται τρόποι ανάθεσης των πόρων σε ένα πρόβλημα επικοινωνίας μηχανής προς μηχανή (Machine-to-Machine Communication-M2M), σε ένα δίκτυο αποτελούμενο από 2 σταθμούς βάσης και με τη χρήση της Θεωρίας Παιγνίων. Χρησιμοποιήθηκαν 2 εκδοχές της Θεωρίας Παιγνίων, αρχικά η μη συνεργατική και έπειτα η συνεργατική Θεωρία Παιγνίων. Στο μη συνεργατικό παίγνιο (non-cooperative game), η διανομή των πόρων καταλήγει στην ισορροπία του Nash (Nash Equilibrium) μεταξύ όλων των μηχανών που συμμετέχουν στο παίγνιο, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο σαν μέση λύση, όπως περιεγράφηκε στο δεύτερο κεφάλαιο. Ωστόσο, η ισορροπία κατά Nash δεν αποτελεί μια δίκαιη λύση αφού οι απαιτήσεις για ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων διαφέρουν από μηχανή σε μηχανή, ενώ η ισορροπία κατά Nash δίνει τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε όλους τους παίκτες του παιχνιδιού (σε όλες τις μηχανές).

Για την επίλυση αυτού του προβλήματος που προκύπτει στα μη-συνεργατικά Παίγνια, προτάθηκε η εφαρμογή συνεταιριστικών παιγνίων (coalition game theory) στα οποία υπάρχει μια τιμή Shapley που παρέχει δίκαιη κατανομή των πόρων για τους παίκτες που συμμετέχουν στον συνασπισμό (coalition). Ο αλγόριθμος λοιπόν που εφαρμόστηκε αφορά τα συνεταιριστικά παίγνια και αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

- Υπολογισμός της συνάρτησης χρησιμότητας (self-value  $v$ ) για κάθε coalition, η οποία βασίζεται στο κέρδος του καναλιού και στην διαθέσιμη ισχύς, χρησιμοποιώντας μη συνεργατικά παίγνια.

- Χρησιμοποίηση του bankruptcy game [b] για τον υπολογισμό της εξόφλησης της συνάρτησης χρησιμότητας.
- Μέσω της τιμής Sharpley υπολογίζεται το μερίδιο των πόρων που θα διαμοιραστεί σε κάθε coalition, με ένα δίκαιο τρόπο.
- Τα προηγούμενα 3 βήματα επαναλαμβάνονται όταν μια μηχανή εισέλθει ή αποχωρήσει από κάποιο coalition, καθώς τότε αλλάζει η συνάρτηση χρησιμότητας (self-value) και η εξόφληση της (payoff).

Στην εργασία αυτή ουσιαστικά καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι σε ένα δίκτυο στο οποίο οι χρήστες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις για ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, κάτι το οποίο αποτελεί την πιο συχνή μορφή δικτύων σήμερα, τα μη-συνεργατικά παίγνια δεν αποτελούν δίκαιη λύση καθώς συγκλίνουν στην ισορροπία κατά Nash. Αντιθέτως, το coalitional game που εξετάστηκε κατέληξε σε δίκαιη κατανομή των πόρων, με την βοήθεια της τιμής Sharpley. Η μετρική που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων, που έδειξε την ανωτερότητα της δεύτερης μεθόδου σε ένα δίκτυο στο οποίο οι χρήστες έχουν διαφορετικές ανάγκες και απαιτήσεις.

## **2) Power optimization of device-to-device communication underlying cellular communication- Βελτιστοποίηση της ισχύος στην επικοινωνία συσκευής προς συσκευή στην οποία βασίζεται η επικοινωνία των κυψελωτών δικτύων. [12]**

Στην εργασία αυτή έγινε ανάλυση ενός περιβάλλοντος με μια μοναδική κυψέλη και έναν σταθμό βάσης με στόχο τον κατάλληλο διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος, με ύπαρξη απλών κυψελωτών επικοινωνιών (επικοινωνία χρήστη με σταθμό βάσης) και D2D επικοινωνιών (απευθείας σύνδεση και επικοινωνία των χρηστών μεταξύ τους). Προτάθηκαν δύο περιπτώσεις ελέγχου ισχύος εκπομπής. Αρχικά, η επικοινωνία συσκευής προς συσκευή και η κλασσική κυψελωτή επικοινωνία αντιμετωπίστηκαν σαν ανταγωνιστικές υπηρεσίες χωρίς την ύπαρξη προτεραιοτήτων. Στη δεύτερη περίπτωση, παραχωρείται προτεραιότητα στους χρήστες της κυψέλης έναντι των D2D χρηστών, περιορίζοντας το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης υπό τους ίδιους περιορισμούς σε εκπεμπόμενη ισχύς.



Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση μιας απομακρυσμένης κυψέλης όπου ο χρήστης 1 μοιράζεται τους ίδιους πόρους με τους D2D χρήστες 2 και 3 οι οποίοι επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους. Το κέρδος κάθε καναλιού περιλαμβάνει τις απώλειες διαδρομής (pathloss), τις απώλειες σκίασης (shadow fading), και τις επιδράσεις των γρήγορων διαλείψεων (fast fading effects). Η εργασία βασίζεται στην υπόθεση ότι ο σταθμός βάσης έχει καταγεγραμμένες όλες τις πληροφορίες για την κατάσταση των καναλιών σε όλες τις συνδέσεις του δικτύου, έτσι ώστε να μπορεί να πάρει την κατάλληλη απόφαση για τον διαμοιρασμό των πόρων.

Χρησιμοποιώντας κυρίως τον συνολικό ρυθμό μετάδοσης του συστήματος ως μετρική αξιολόγησης των μεθόδων που αναπτύχθηκαν, παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση στο πρώτο σενάριο σε σχέση με ένα σενάριο σταθερής ισχύς εκπομπής, ειδικότερα για D2D συνδέσεις που βρίσκονται κοντά στον σταθμό βάσης. Το δεύτερο σενάριο, στο οποίο οι χρήστες της κυψέλης έχουν προτεραιότητα έναντι των D2D χρηστών, έχει μειωμένο ρυθμό μετάδοσης σαν τίμημα της προτεραιότητας που δίνει. Ωστόσο, τα οφέλη του δεύτερου σεναρίου έναντι του πρώτου φαίνονται από την σχεδόν μηδενική πιθανότητα διακοπής των συνδέσεων του. Τέλος, συγκρίσεις με απλά παραδοσιακά κυψελωτά δίκτυα επιβεβαιώνουν τη σημαντική βελτίωση σε ρυθμό μετάδοσης και των δύο προαναφερθέντων σεναρίων.

### **3) Resource Allocation for Device-to-Device Communications Underlying LTE-Advanced Networks- Κατανομή πόρων για επικοινωνία συσκευής προς συσκευή που βασίζεται στα προηγμένα LTE δίκτυα. [9]**

Στην εργασία αυτή εξετάστηκε το πρόβλημα της κατανομής πόρων (κατανομή καναλιών και έλεγχος ισχύος) σε προηγμένα LTE δίκτυα που βασίζονται σε επικοινωνία συσκευής προς συσκευή (D2D Communication). Το αντικείμενο της μελέτης είναι η μεγιστοποίηση της χρησιμοποίησης του φάσματος και η ελαχιστοποίηση του μήκους μεταφοράς των χρονοθυρίδων (time slots), δεδομένου των περιορισμών σε παρεμβολές για τους χρήστες της κυψέλης και των απαιτήσεων σε ποιότητα υπηρεσίας (QoS) των D2D συνδέσεων.

Προσομοιώθηκε ένα δίκτυο αποτελούμενο από ένα σύνολο D2D συνδέσεων και ένα σύνολο συνδέσεων χρηστών με το σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης πρώτα κατανέμει ένα σύνολο από τα διαθέσιμα κανάλια (Resource Blocks - RBs) στους χρήστες της

κυψέλης και στη συνέχεια με βάση τον προτεινόμενο αλγόριθμο κατανομής πόρων αποδίδονται στις D2D συνδέσεις τα ίδια κανάλια για επαναχρησιμοποίηση. Η κύρια ιδέα του αλγόριθμου κατανομής πόρων που εφαρμόστηκε είναι να βρεθεί ο μέγιστος αριθμός ενεργών D2D συνδέσεων που να μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα δεδομένα σε κάθε χρονοθυρίδα, ενώ ικανοποιούνται οι περιορισμοί για εφικτό σχέδιο πρόσβασης.

Αρχικά, όλες οι D2D συνδέσεις είναι ανενεργές. Επιλέγουμε την D2D σύνδεση η οποία έχει το καταλληλότερο βάρος (weight), όπου αυτή η τιμή υπολογίζεται από τα επίπεδα της παρεμβολής που θα προσθέσει η D2D σύνδεση στο δίκτυο, και αυτή η σύνδεση θα ενεργοποιηθεί. Έπειτα, αυτή η D2D σύνδεση θα πάρει το κανάλι στο οποίο έχει τη χαμηλότερη παρεμβολή από αυτά που είναι διαθέσιμα, εκτός αν αυτός ο διαμοιρασμός δεν ικανοποιεί τους περιορισμούς που έχουν αρχικά τεθεί. Οι περιορισμοί αυτοί είναι:

- Ανώτατο όριο παρεμβολών για τους χρήστες της κυψέλης που δεν πρέπει να ξεπεραστεί
- Κατώτατο όριο Signal-To-Interference Ratio (SIR) για τις D2D συνδέσεις που πρέπει να ξεπεραστεί.
- Ανώτατο όριο μέγιστης ισχύος για τις D2D συνδέσεις που δεν πρέπει να ξεπεραστεί.

Σε περίπτωση που έστω ένας από τους περιορισμούς δεν ικανοποιείται, τότε η D2D σύνδεση που έχει επιλεγεί θα προσπαθήσει να γίνει ενεργή σε άλλα κανάλια. Η διαδικασία ανάθεσης των καναλιών στις D2D συνδέσεις θα ολοκληρωθεί όταν ληφθούν όλες υπόψη.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία αυτή είναι η σημαντική βελτίωση της φασματικής χρησιμοποίησης του αλγόριθμου που προτάθηκε με μικρή αύξηση αντίστοιχα στην καταναλισκόμενη ισχύ, σε ένα σενάριο με μεγάλη παρουσία D2D επικοινωνιών.

#### **4) The Investigation of Power Control Schemes for a Device-to-Device Communication integrated into OFDMA Cellular System – Η έρευνα για σχέδια ελέγχου ισχύος για την επικοινωνία συσκευής προς συσκευή που είναι ενσωματωμένη σε ένα OFDMA κυψελωτό σύστημα [13]**

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν αρκετά διαφορετικά σενάρια ελέγχου ισχύος για D2D χρήστες σε ένα δίκτυο LTE κατά τη ζεύξη ανόδου με ενσωμάτωση της D2D επικοινωνίας. Τα σενάρια ελέγχου ισχύος που αναπτύχθηκαν είναι τα εξής:

- a) Το πρώτο είναι ένα απλό σενάριο όπου όλοι οι D2D χρήστες χρησιμοποιούν την ίδια ισχύ εκπομπής. Παρά την απλότητα του σεναρίου, με την τυχαία κατανομή των πόρων υπάρχει ο κίνδυνος ύπαρξης μεγάλης παρεμβολής ανάμεσα στους χρήστες της κυψέλης και τους D2D χρήστες κάτι το οποίο προκαλεί σημαντικές αυξομειώσεις του Signal-to-Interference plus Noise Ratio (SINR).
- b) Το δεύτερο σενάριο που προτάθηκε είναι η ύπαρξη ενός σταθερού Signal-to-Noise Ratio (SNR) κατωφλίου για όλους τους D2D χρήστες κάτι το οποίο θα επηρεάσει την εκπεμπόμενη ισχύ και την τιμή του SINR άμεσα.
- c) Το τρίτο σενάριο που προτάθηκε είναι η κατανομή της ισχύος στους D2D χρήστες με έναν ανοιχτού βρόγχου κλασματικό έλεγχο ισχύος. Ουσιαστικά, η ισχύς κατανέμεται στους D2D χρήστες με έναν κλειστό τύπο που εξαρτάται από παράγοντες εξασθένισης και την απώλεια μονοπατιού (pathloss).
- d) Το τέταρτο σενάριο που προτάθηκε είναι η κατανομή ισχύος στους D2D χρήστες όπως προηγουμένως, με την διαφορά της ύπαρξης κλειστού βρόγχου. Ουσιαστικά στον υπολογισμό της ισχύος προστίθεται ένα βήμα συντονισμού που εξαρτάται από το SINR ανατροφοδότησης του κλειστού βρόχου. Αποτελεί περίπλοκο αλγόριθμο αλλά κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων μπορεί να κατορθώσει καλή σύγκλιση, ταχύτητα και μεγάλη ακρίβεια.

Προσομοιώθηκε ένα κλασσικό OFDMA σύστημα με ενσωματωμένη D2D επικοινωνία και προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα: Αρχικά, το πρώτο σενάριο με την χρησιμοποίηση σταθερής ισχύος καταλήγει στην μεγαλύτερη διακύμανση του SINR. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι δεν αποτελεί κατάλληλο σενάριο για D2D χρήστες, αφού παρέχει πολύ καλή απόδοση για ορισμένους εξ' αυτών και κακή απόδοση για άλλους. Τα σενάρια *b* και *c* παρέχουν σχετικά χαμηλή διακύμανση του SINR, αλλά ακόμα βρίσκονται χρήστες με πολύ χαμηλό SINR οι οποίοι χρειάζονται ενίσχυση της ισχύος εκπομπής τους. Τέλος, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το τέταρτο σενάριο μπορεί να αποτελέσει ένα κατάλληλο σενάριο ελέγχου ισχύος για τους D2D χρήστες, με την ύπαρξη ενός δυναμικού βήματος συντονισμού.

**5) On the performance of Device-to-Device underlay communication with simple power control - Η απόδοση της επικοινωνίας συσκευής προς συσκευή που βασίζεται σε απλό έλεγχο ισχύος.[14]**

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε μια απλή μέθοδος ελέγχου ισχύος για D2D επικοινωνία η οποία περιορίζει την υποβάθμιση του SINR των απλών κυψελωτών συνδέσεων, σε ένα σταθερό επίπεδο. Προτάθηκε ένα σενάριο στο οποίο ο πλήρης συντονισμός των παρεμβολών ανάμεσα στις απλές επικοινωνίες και στις D2D επικοινωνίες δεν είναι εφικτός εξαιτίας της έλλειψης πληροφορίας της κατάστασης των καναλιών από τον σταθμό βάσης (Channel State Information-CSI) που σχετίζεται με τις D2D και τις απλές συνδέσεις. Αντίθετα, ο σχεδιασμός του συστήματος βασίζεται σε στατιστικά της κυψέλης.

Με βάση λοιπόν τα στατιστικά της κυψέλης, πραγματοποιήθηκε η κατανομή των SINR για απλές συνδέσεις και για D2D συνδέσεις σε ένα απλό περιβάλλον μιας κυψέλης. Για τους D2D χρήστες, υπάρχει ένας περιορισμός αποστάσεων μεταξύ τους έτσι ώστε να υπάρχει ένα ελάχιστο όριο της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) στις D2D επικοινωνίες. Με βάση λοιπόν αυτή την κατανομή, στην συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός της ισχύς εκπομπής στους D2D χρήστες με έναν απλό τρόπο έτσι ώστε το αντίκτυπο των D2D συνδέσεων στις απλές συνδέσεις να διατηρείται υπό πλήρη έλεγχο.

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η επικοινωνία D2D πετυχαίνει υψηλότερο SINR από την απλή κυψελωτή επικοινωνία στις περισσότερες περιοχές της κυψέλης. Μελετήθηκαν ακόμη ξεχωριστά ανερχόμενες ζεύξεις (uplink) και κατερχόμενες ζεύξεις (downlink) και παρατηρήθηκε ότι όταν ένα D2D ζεύγος είναι αρκετά κοντά στον σταθμό βάσης, τότε ο διαμοιρασμός των πόρων στο downlink αποδίδει καλύτερα. Αντίστοιχα, παρατηρήθηκε ότι όσο πιο μακριά βρίσκεται ένα D2D ζεύγος από τον σταθμό βάσης, τόσο καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται στο διαμοιρασμό των πόρων στη ζεύξη ανόδου.

**6) Energy-Saving Massive Access Control and Resource Allocation Schemes for M2M Communications in OFDMA Cellular Networks- Μαζική Πρόσβαση στον Έλεγχο της Εξοικονόμησης Ενέργειας και Αλγόριθμοι Κατανομής Πόρων για Επικοινωνία Μηχανής προς Μηχανή σε OFDMA Κυψελωτά Δίκτυα [15]**

Στην εργασία αυτή προτείνονται τρόποι διαχείρισης βασικής πρόσβασης (Massive Access Management-MAM) και αλγόριθμοι κατανομής πόρων (Resource Allocation-RA) σε OFDMA κυψελωτά συστήματα που βασίζονται σε επικοινωνία μηχανής προς μηχανή (Machine-to-Machine M2M Communication). Στόχος της εργασίας και βασική κατεύθυνση της είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας για το M2M σύστημα. Μελετήθηκαν 2 σενάρια σχετικά με την κατάσταση του καναλιού, αρχικά ένα επίπεδα εξασθενούμενο κανάλι (flat fading channel) και ένα επιλεκτικό ως προς την συχνότητα εξασθενούμενο κανάλι (frequency selective fading channel). Επιπλέον, η εργασία βασίζεται σε ομαδοποίηση των μηχανών και επιλογή ενός συντονιστή σε κάθε επιμέρους ομάδα. Η βασική ιδέα είναι ότι για να επικοινωνήσει κάποια μηχανή με το σταθμό βάσης, απευθύνεται πρώτα στο συντονιστή της ομάδας της ο οποίος πραγματοποιεί τον ενδιάμεσο για την μεταφορά των πακέτων.

Στο επίπεδα εξασθενούμενο κανάλι το σενάριο κατανομής πόρων είναι το εξής: Αρχικά, επιλέγονται τυχαία οι χρήστες-μηχανές που θα αποτελέσουν τους συντονιστές των ομάδων. Στη συνέχεια, και δεδομένου ότι ο αριθμός των ομάδων που θα δημιουργηθούν είναι συγκεκριμένος, κάθε μηχανή ανατίθεται στην ομάδα που αναμένεται να καταναλώσει την λιγότερη ενέργεια. Έπειτα, αφού έχει γίνει ο χωρισμός των μηχανών στις ομάδες, επιλέγονται νέοι συντονιστές σε κάθε ομάδα αυτοί οι οποίοι οδηγούν σε χαμηλότερη καταναλισκόμενη ενέργεια. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται επαναληπτικά μέχρι το αποτέλεσμα να παραμείνει ανεπηρέαστο. Στην συνέχεια, εφαρμόζεται η ίδια διαδικασία με διαφορετικό αριθμό ομάδων που θα δημιουργηθούν μέχρις ότου να καταλήξουμε στην κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων και στον κατάλληλο διαχωρισμό των ομάδων που θα οδηγήσει σε χαμηλότερη καταναλισκόμενη ενέργεια. Τέλος, γίνεται ο καταμερισμός της ισχύος του συστήματος στους χρήστες-μηχανές.

Στην δεύτερη περίπτωση, επιλέγεται επιλεκτικό ως προς την συχνότητα κανάλι από τους συντονιστές στον σταθμό βάσης, με διαφορετικό κέρδος διαδρομής ανά κανάλι. Το σενάριο κατανομής πόρων σε αυτήν την περίπτωση είναι το εξής: Αρχικά, γίνεται η ομαδοποίηση των μηχανών και η επιλογή των συντονιστών κάθε ομάδας με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στο πρώτο σενάριο. Στην συνέχεια, για κάθε υποφέρουσα,

υπολογίζεται η βέλτιστη εκπεμπόμενη ισχύς και ο βέλτιστος ρυθμός μετάδοσης για κάθε συντονιστή. Έπειτα, η συγκεκριμένη υποφέρουσα ανατίθεται στον κατάλληλο συντονιστή ο οποίος βρέθηκε στο προηγούμενο βήμα. Τέλος, ο συγκεκριμένος συντονιστής ενημερώνει την συνολική ποσότητα των δεδομένων που έχει αποσταλεί και ενημερώνει και την συνολική ενέργεια που έχει καταναλωθεί από αυτόν. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν οι συντονιστές ολοκληρώσουν την μετάδοση των δεδομένων τους.

Η εργασία αυτή ασχολήθηκε κυρίως με την ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας του συστήματος και αυτή η μετρική χρησιμοποιήθηκε μόνο για τον σχολιασμό των σεναρίων που προτάθηκαν. Σε γενικές γραμμές, και τα δύο σενάρια παρουσιάζουν σχεδόν βέλτητα αποτελέσματα, με την έννοια ότι η καταναλισκόμενη ισχύς και στα δύο σενάρια είναι αρκετά μικρή. Παρατηρήθηκε, τέλος, ότι το δεύτερο σενάριο απαιτεί περισσότερους συντονιστές για να φτάσει την ίδια τιμή σε ενέργεια σε σχέση με το πρώτο, αποδίδει καλύτερα δηλαδή για τον ίδιο αριθμό συντονιστών. Αυτό συμβαίνει γιατί η ενέργεια που αποθηκεύεται από την εκμετάλλευση της ποικιλότητας του καναλιού είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που χάνεται από την αύξηση του αριθμού των συντονιστών.

#### **7) Energy-efficient Subcarrier Allocation In SC-FDMA Wireless Networks based on Multilateral Model of Bargaining - Ενεργειακά Αποδοτική Κατανομή Υποφερουσών σε SC-FDMA Ασύρματα Δίκτυα που Βασίζονται στο Πολυμέρες Μοντέλο της Διαπραγμάτευσης [16]**

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται το πρόβλημα της κατανομής υποφερουσών και ισχύος σε πολυχρηστικά ασύρματα δίκτυα που βασίζονται σε απλού φέροντος διαίρεση συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης (Single-carrier Frequency Division Multiple Access-SC FDMA).

Η προσέγγιση που παρουσιάζεται για την επίλυση του προβλήματος περιλαμβάνει τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο, αρχικά, καθορίζεται ο αριθμός των υποφερουσών που θα πάρει κάθε χρήστης με βάση το μοντέλο διαπραγμάτευσης του Rubinstein για N-παίκτες. Στη συνέχεια, στο δεύτερο στάδιο, προτείνονται 3 διαφορετικά σενάρια ανάθεσης συγκεκριμένων υποφερουσών στους χρήστες, γνωρίζοντας τον ακριβή αριθμό αυτών από το βήμα 1 τα οποία αναλύονται και συγκρίνονται στην συνέχεια.

Στο τελευταίο στάδιο αυτής της προσέγγισης, με δεδομένη την ακριβή κατανομή καναλιών σε όλους τους χρήστες, γίνεται η κατανομή ισχύος με την βοήθεια μια συνάρτησης χρησιμότητας κάθε χρήστη σε κάθε κανάλι. Η συνάρτηση χρησιμότητας εκφράζει την ικανοποίηση του χρήστη σε ένα συγκεκριμένο κανάλι και πρέπει να μεγιστοποιείται. Έπειτα, γίνεται η κατανομή της ισχύος στους χρήστες ούτως ώστε να μεγιστοποιείται αυτή η συνάρτηση χρησιμότητας.

Οι 3 τεχνικές ανάθεσης των υποφερουσών στους χρήστες που παρουσιάστηκαν είναι οι εξής: Αρχικά, προτείνεται η ανάθεση των υποφερουσών στους χρήστες ακολουθιακά. Δηλαδή, ο χρήστης με τον αριθμό 1 θα πάρει στην σειρά τα υποφέρουσες που του αναλογούν, ο επόμενος χρήστης θα πάρει όσα του αναλογούν από τα υποφέρουσες που ακολουθούν, και η διαδικασία θα συνεχιστεί μέχρι να ικανοποιηθούν όλοι οι χρήστες. Το δεύτερο σενάριο είναι λίγο πιο πολύπλοκο γιατί χρησιμοποιεί γνώση της κατάστασης των καναλιών. Σε αυτό το σενάριο, δίνεται προτεραιότητα στους χρήστες οι οποίοι βρίσκονται πιο μακριά από τον σταθμό βάσης, επειδή οι χρήστες αυτοί έχουν κατά γενική ομολογία μικρότερο κέρδος καναλιού (channel gain). Αρχίζοντας λοιπόν από τους μακρινότερους χρήστες, κάθε χρήστης επιλέγει τα υποφέρουσες στα οποία μεταδίδει με μεγαλύτερο κέρδος. Ο ακριβής αριθμός αυτών των υποφερουσών είναι γνωστός από το πρώτο στάδιο και το μοντέλο του Rubinstein. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν επιλέξουν όλοι οι χρήστες τα υποφέρουσες που τους αναλογούν, με ανάλογο τρόπο. Το τρίτο σενάριο έχει ομοιότητες με το δεύτερο, με την μόνη διαφορά ότι οι χρήστες που έχουν προτεραιότητα στην επιλογή υποφερουσών είναι πλέον αυτοί με την μικρότερη απόσταση από τον σταθμό βάσης.

Οι μετρικές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των αποτελεσμάτων είναι κυρίως η συνολική μεταδιδόμενη ισχύς του συστήματος και ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων που επιτυγχάνεται. Το δεύτερο σενάριο επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα από τα προηγούμενα 2 αφού επιτυγχάνει μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας στους μακρινούς χρήστες, τους οποίους αδικεί ιδιαίτερα το τρίτο σενάριο. Το πρώτο σενάριο είναι φυσιολογικό να παρουσιάζει τα χειρότερα αποτελέσματα αφού η τεχνική ανάθεσης των υποφερουσών στους χρήστες περιλαμβάνει μεγάλη τυχαιότητα. Η εργασία αυτή βρίσκεται αρκετά κοντά και στην δική μας προσέγγιση.

## **8) On Resource Allocation for Machine-to-Machine (M2M) Communications in Cellular Networks – Κατανομή Πόρων για Επικοινωνία Μηχανής προς Μηχανή σε Κυψελωτά Δίκτυα. [17]**

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε το πρόβλημα κατανομής ισχύος στη ζεύξη ανόδου (uplink) για τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης TDMA και FDMA σε ένα κυψελωτό δίκτυο που βασίζεται σε επικοινωνία μηχανής προς μηχανή (Machine-to-Machine Communication). Η ιδέα γενικά είναι ότι στα δίκτυα που χρησιμοποιούν TDMA η χρονοσχισημή μοιράζεται σε μικρότερα κομμάτια για κάθε χρήστη, ενώ σε δίκτυα που χρησιμοποιούν FDMA το εύρος ζώνης κατακερματίζεται σε μέρη, αλλά και στις 2 περιπτώσεις ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικής ισχύς εκπομπής.

Στην εργασία αυτή αποδείχθηκε αναλυτικά ότι α) τα FDMA δίκτυα υποστηρίζουν μεγαλύτερη κίνηση σε σχέση με τα TDMA δίκτυα και β) δεν είναι απαραίτητη η ακριβής κατανομή πόρων στα M2M δίκτυα, καθώς απλές τεχνικές ισοκαταμερισμού των πόρων οδηγούν σε ικανοποιητική απόδοση του συστήματος.

## **9) Power Control Based On Interference Pricing in Hybrid D2D and Cellular Networks - Έλεγχος ισχύος που βασίζεται στο Τίμημα των Παρεμβολών σε Κυψελωτά Δίκτυα με την παρουσία D2D Επικοινωνίας. [18]**

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε ένας αλγόριθμος ελέγχου ισχύος δύο στρωμάτων για ζεύξεις ανόδου (uplink) για ένα κυψελωτό δίκτυο με την παρουσία και επικοινωνίας συσκευής προς συσκευή (D2D Communications), όπου οι D2D επικοινωνίες χρησιμοποιούν τους πόρους του δικτύου. Στόχος του συστήματος είναι η μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης, που βασίζεται στην μεγιστοποίηση μιας συνάρτησης χρησιμότητας για κάθε κυψέλη.

Η προσέγγιση που αναλύεται στην εργασία αυτή είναι να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα σαν πρόβλημα δύο στρωμάτων, που αποτελείται από ενδοκυψελικές αναβαθμίσεις (intra-cell updates) και αναβαθμίσεις μεταξύ των κυψελών (inter-cell updates). Το πρώτο στρώμα αφορά την κατάσταση σε κάθε κυψέλη ξεχωριστά, όπου κάθε κυψέλη στοχεύει να μεγιστοποιήσει την δική της συνάρτηση χρησιμότητας με την κατάλληλη κατανομή ισχύος στους χρήστες της και στις D2D συσκευές της. Το δεύτερο στρώμα αφορά την επικοινωνία των κυψελών, όπου κάθε κυψέλη αποφασίζει για το πότε θα ενημερώσει τους γείτονες της σχετικά με τα επίπεδα των παρεμβολών που



πραγματοποιεί σε αυτούς. Αν συμβεί κάτι τέτοιο τότε αυτοί αναπροσαρμόζουν την κατανομή της ισχύος τους, με βάση τα σήματα που έχουν λάβει από τους γείτονες. Επομένως, σε κάθε κυψέλη οι D2D συσκευές και οι υπηρεσίες της κυψέλης συνεργάζονται για την μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας της κυψέλης, ενώ διαφορετικές κυψέλες συνεργάζονται επίσης μεταξύ τους για τον ίδιο σκοπό.

Γενικά πρόκειται για έναν πολύ περίπλοκο αλγόριθμο που βασίζεται σε γνώση της κατάστασης των καναλιών σε κάθε κυψέλη αλλά και σε μηχανισμό ανάπτυξης και εντοπισμού σημάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ των κυψελών. Ωστόσο, τα αποτελέσματα απέδειξαν ότι πρόκειται για έναν αλγόριθμο που πετυχαίνει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, κυρίως όταν το επίπεδο των παρεμβολών δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό.

Συμπερασματικά, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η προϋπάρχουσα έρευνα της βιβλιογραφία σχετικά με το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν διάφοροι αλγόριθμοι κατανομής των υποφερουσών και της ισχύος στους χρήστες με σκοπό την μεγιστοποίηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Είναι φανερό η ενσωμάτωση της D2D επικοινωνίας στα κυψελωτά δίκτυα, τα πλεονεκτήματα της οποίας είναι ποικίλα και πολύ σημαντικά. Τέλος, πολλές εργασίες συμπεριλαμβάνουν τη Θεωρία Διαπραγμάτευσης στη μελέτη τους, βλέποντας τους χρήστες ως παίκτες που διεκδικούν μερίδιο από το παιχνίδι, το οποίο είναι τα υποφέρουσες που τους ικανοποιούν. Κρίναμε σκόπιμο να συμπληρώσουμε την υπάρχουσα βιβλιογραφία, παρουσιάζοντας μια ενιαία προσέγγιση του προβλήματος κατανομής πόρων με την παρουσία D2D επικοινωνίας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>0</sup>

## ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

---

**6.1 Εισαγωγή**

**6.2 Μοντελοποίηση του Προβλήματος**

**6.3 Αλγόριθμοι Κατανομής Πόρων**

**6.4 Ταίριασμα D2D Χρηστών (D2D Pairing) και  
Υπολογισμός Παρεμβολών του Συστήματος**

---

## 6.1. Εισαγωγή

Σε ένα OFDMA σύστημα το συνολικό φάσμα διασπάται σε υποφέρουσες οι οποίες μοιράζονται στους χρήστες του συστήματος κάτι το οποίο εισάγει έναν ακόμα βαθμό ελευθερίας στη διαδικασία κατανομής πόρων, εκτός από την κατανομή της ισχύος. Έτσι σε κάθε χρήστη πρέπει πρώτα να ανατεθεί συγκεκριμένος αριθμός υποφερουσών και έπειτα να βρεθεί η ισχύς με την οποία θα εκπέμπει σε κάθε μια από αυτές. Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να βρεθεί ένας αλγόριθμος βέλτιστης κατανομής υποφερουσών και ισχύος στη ζεύξη ανόδου (uplink) του συστήματος OFDMA το οποίο βασίζεται στην D2D επικοινωνία. Θα αναπαραστήσουμε τη διαδικασία κατανομής των υποφερουσών με ένα παίγνιο της Θεωρίας Παιγνίων. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα ορίσουμε το πρόβλημα προς επίλυση και βελτιστοποίηση και θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τα βήματα των αλγορίθμων που χρησιμοποιήσαμε.

## 6.2. Μοντελοποίηση του Προβλήματος

Αρχικά, θα περιγράψουμε το σύστημα που θα μοντελοποιηθεί και θα ορίσουμε τα κατάλληλα μεγέθη που θα χρησιμοποιηθούν. Στην κυψέλη υπάρχουν  $N$  χρήστες και  $K$  D2D συσκευές, που επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους. Το συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος είναι  $B$  Hz και διασπάται σε ένα σύνολο υποφερουσών

$\mathcal{S}_{sub} = \{s_i^j / i \in N \cup K = \{1, 2, \dots, i, \dots, N, \dots, N + K\}, j = 1, 2, \dots, K_i\}$  όπου  $K_i$  ο συνολικός αριθμός των υποφερουσών που αντιστοιχούν στον χρήστη  $i$  και  $|N|+|K|$  το σύνολο όλων των χρηστών του συστήματος (χρήστες των κυψελών και D2D συσκευές). Το σύνολο των υποφερουσών του χρήστη  $i$  είναι  $\mathbf{S}_i = \{s_i^j / j = 1, 2, \dots, K_i\}$ . Επομένως, ο συνολικός αριθμός υποφερουσών στο σύστημα θα είναι  $S = \sum_{i=1}^{|N|+|K|} K_i$ .

Κάθε χρήστης  $i \in N \cup K$  έχει σε κάθε υποφέρουσα  $s^j \in \mathbf{S}_i$  κέρδος καναλιού  $G_{i,j}$  και ισχύ εκπομπής  $P_{i,j}$ .

Το κέρδος καναλιού κάθε χρήστη σε κάθε υποφέρουσα δίνεται από τον τύπο [16]:

$$G_{i,j} = \frac{\Lambda_{i,j}}{d_i^{\alpha}} \quad (7)$$

όπου  $d_i$  είναι η απόσταση του χρήστη  $i$  από τον σταθμό βάσης, αν πρόκειται για κανονικό χρήστη, ή από τον χρήστη D2D που επικοινωνεί, αν πρόκειται για D2D χρήστη. Η μεταβλητή  $a$  είναι ο εκθέτης διάδοσης, και  $A_{i,j}$  η τυχαία μεταβλητή της λογαριθμοκανονικής κατανομής με μέση τιμή  $\mu$  και τυπική απόκλιση  $\sigma$  που αναπαριστά την επίδραση των πολυδιαδρομικών διαλείψεων.

Για την ισχύ εκπομπής ενός χρήστη  $i$  σε κάθε υποφέρουσα  $S^j \in \mathbf{S}_i$  υπάρχει ο περιορισμός να μην ξεπερνάει την τιμή  $\frac{P_t}{K_i}$ , όπου  $K_i$  ο αριθμός των υποφερουσών που ανατίθενται στον χρήστη  $i$ , και  $P_t$  είναι η μέγιστη ισχύς στην οποία μπορεί να εκπέμπει ένας χρήστης. Ο σηματοθορυβικός λόγος του χρήστη  $i$  στην υποφέρουσα  $S^j$  δίνεται από τον τύπο:

$$\gamma_{i,j} = \frac{P_{i,j} * G_{i,j}}{\sigma^2 + I_{i,j}} \quad (8)$$

όπου  $\sigma^2$  είναι η ισχύς θορύβου, και  $I_{i,j}$  είναι οι παρεμβολές που δέχεται ο χρήστης  $i$  στην υποφέρουσα  $S^j$  από άλλους χρήστες.

Έχουμε θεωρήσει την συνάρτηση χρησιμότητας  $U$  (Utility function) που εκφράζει πόσο ευχαριστημένος είναι ο χρήστης από την εξυπηρέτηση που δέχεται στο σύστημα [16]. Η έννοια αυτή χρησιμοποιήθηκε πρώτα από την οικονομική επιστήμη, στην πορεία όμως βρήκε εφαρμογή και σε διάφορους άλλους κλάδους λόγω της χρησιμότητάς της. Η συνάρτηση χρησιμότητας εκφράζει τον βαθμό ικανοποίησης ενός χρήστη ως αποτέλεσμα των ενεργειών που κάνει και της ποιότητας των υπηρεσιών που του παρέχονται. Έτσι, η συνάρτηση χρησιμότητάς του χρήστη  $i$  για μια υποφέρουσα  $S^j$  που του αντιστοιχεί δίνεται από τον τύπο:

$$U_{i,j}(P_{i,j}) = \frac{R_{opt} * f(\gamma_{i,j})}{P_{i,j}} \quad (9)$$

όπου  $R_{opt}$  είναι ο σταθερός ρυθμός μετάδοσης που χαρακτηρίζει κάθε χρήστη ανάλογα με την ζητούμενη υπηρεσία και  $f(\gamma_{i,j})$  η συνάρτηση αποδοτικότητας του. Η συνάρτηση αυτή εκφράζει την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης ενός πακέτου που μεταδίδει ο χρήστης  $i$  στην υποφέρουσα  $S^j$  και έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

- Ο τύπος ορισμού της είναι

$$f(\gamma_{i,j}) = (1 - e^{-A*\gamma})^M \quad (10)$$

όπου οι παράμετροι  $A, M$  εξαρτώνται από το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται για την μεταφορά δεδομένων.

- Είναι μια σιγμοειδής, αύξουσα, συνεχής και δύο φορές παραγωγίσιμη συνάρτηση ως προς το σηματοθορυβικό λόγο.
- Επειδή πρέπει η συνάρτηση χρησιμότητας να έχει μηδενική τιμή όταν η ισχύς είναι μηδέν, δηλαδή  $U_{i,j}(0) = 0$  για  $P_{i,j} = 0$  ισχύει  $f(0) = 0$ .
- Είναι  $f(\infty) = 1$ .

Η συνολική συνάρτηση χρησιμότητας ενός χρήστη θα είναι το άθροισμα των επιμέρους συναρτήσεων χρησιμότητάς του για όλες τις υποφέρουσες που του αντιστοιχούν. Επομένως,

$$U_i(P_{i,j}) = \sum_{j=1}^{K_i} U_{i,j}(P_{i,j}) \quad (11)$$

Η έννοια της συνολικής συνάρτησης χρησιμότητας του συστήματος θα είναι το άθροισμα των επιμέρους συναρτήσεων χρησιμότητας για όλους τους χρήστες του συστήματος. Δηλαδή,

$$U(P_{i,j}) = \sum_{i=1}^{|N|+|K|} U_i(P_{i,j}) \quad (12)$$

Με τους απαραίτητους συμβολισμούς και τις παραπάνω επεξηγήσεις είμαστε πλέον έτοιμοι να περιγράψουμε το ακριβές μοντέλο που θα πραγματοποιήσουμε και το πρόβλημα βελτιστοποίησης που θα αντιμετωπίσουμε. Αρχικά, με το μοντέλο διαπραγμάτευσης του Rubinstein για  $N$ -παίκτες, γίνεται η κατανομή του πλήθους των υποφερουσών που θα πάρει κάθε χρήστης, βλέποντας την κατανομή αυτή σαν ένα μη συνεργατικό παίγνιο των παικτών-χρηστών. Στην συνέχεια, θα εφαρμόσουμε διάφορες τεχνικές ανάθεσης των υποφερουσών και κατανομής της ισχύος στους χρήστες, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας του κάθε χρήστη  $U_i$ . Έτσι, προκύπτει το παρακάτω πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\max U_{i,j}(P_{i,j}) \text{ με } P_{i,j} \in \left[0, \frac{P_t}{K_i}\right] \quad (13)$$

Ψάχνουμε λοιπόν την τιμή  $P_{i,j}$  με τον περιορισμό που αναφέραμε η οποία θα μεγιστοποιεί την συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη σε κάθε υποφέρουσα που του έχει ανατεθεί [16] [19]. Επομένως ο περιορισμός για κάθε χρήστη  $i$  γενικεύεται ως εξής:

$$\sum_{j=1}^{K_i} P_{i,j} \leq P_t \quad \forall i \in N \cup K \quad (14)$$

### 6.3. Αλγόριθμοι Κατανομής Πόρων

Παρακάτω παραθέτουμε τον αναλυτικό αλγόριθμο που βασιστήκαμε για την κατανομή υποφερουσών και ισχύος στη ζεύξη ανόδου του συστήματος OFDMA. Όλα τα βήματα θα αναλυθούν λεπτομερώς στη συνέχεια του κεφαλαίου.

**BHMA 1:** Υπολογίζεται ο βέλτιστος αριθμός υποφερουσών για κάθε χρήστη με τη χρήση του μοντέλου διαπραγμάτευσης Rubinstein για  $N$ -παίκτες.

**BHMA 2:** Πραγματοποιείται η ταξινόμηση των υποφερουσών στους χρήστες, επιλέγεται δηλαδή ποιες υποφέρουσες θα ανατεθούν σε κάθε χρήστη. Θα παρουσιαστούν τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι ανάθεσης υποφερουσών.

**BHMA 3:** Υπολογίζεται η ισχύς εκπομπής του χρήστη  $i$  για την υποφέρουσα  $j$  που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητάς του.

**BHMA 4:** Ανανεώνεται η τιμή της ισχύος του χρήστη, με βάση την τιμή που υπολογίσαμε στο βήμα 3, ώστε ο αλγόριθμος τελικά να συγκλίνει στην μικρότερη δυνατή τιμή ισχύος εκπομπής που να μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητάς του χρήστη  $i$ .

**BHMA 5:** Επαναλαμβάνονται τα βήματα 3 και 4 μέχρις ότου να εξυπηρετηθούν όλοι οι χρήστες του συστήματος.

Στις επόμενες υποενότητες θα εξηγήσουμε αναλυτικότερα τις διαδικασίες που εφαρμόζονται στα επιμέρους βήματα του αλγορίθμου.

#### 6.3.1. Κατανομή του Πλήθους των Υποφερουσών στους Χρήστες του Συστήματος

Το πρώτο βήμα στη διαδικασία κατανομής πόρων είναι η κατανομή του πλήθους των υποφερουσών που αντιστοιχεί σε κάθε χρήστη. Για την κατανομή αυτή θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο διαπραγμάτευσης του Rubinstein, με την επέκταση για  $N$ -παίκτες όπως το περιγράψαμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 2. Το μοντέλο διαπραγμάτευσης του Rubinstein αναφέρεται σε μια κατηγορία παιγνίων όπου  $N$ -ισότιμοι παίκτες θέλουν να μοιράσουν μια πίτα μεγέθους 1 και στον καθένα αντιστοιχεί ένας συντελεστής έκπτωσης  $\delta_i$ . Το παίγνιο ξεκινάει από τον παίκτη που εισέρχεται πρώτος στο παίγνιο και στη συνέχεια οι παίκτες κάνουν διαδοχικές προτάσεις ο ένας στον άλλον μέχρι την πλήρη αποδοχή μιας πρότασης.

Στην περίπτωση της κατανομής του πλήθους των υποφερουσών στους χρήστες του συστήματος OFDMA, αντίστοιχα με την περίπτωση ενός παίγνιου, οι χρήστες της κυψέλης αποτελούν τους ισότιμους παίκτες του παίγνιου και το σύνολο  $S$  των υποφερουσών αποτελεί την πίτα μεγέθους 1 που καλούνται να μοιράσουν. Ασχοληθήκαμε με την περίπτωση που ο συντελεστής έκπτωσης είναι  $\delta$  και ίδιος για όλους τους χρήστες. Όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2, ο Rubinstein απέδειξε πως το μη συνεργατικό παίγνιο  $N$ -παικτών θα συγκλίνει σε μοναδικό κατά Nash σημείο ισορροπίας. Το σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίων κατά Nash είναι ο διαμοιρασμός  $\mathbf{X}^* = (X_1^*, \dots, X_N^*, \dots, X_N^*)$  όπου το μερίδιο κάθε χρήστη  $i$  είναι το εξής:

$$\mathbf{X}_i^* = \frac{(1-\delta) \cdot \delta^{i-1} \cdot S^*}{1-\delta^N}, \text{ με } 0 < \delta < 1 \text{ και } N \geq 2 \quad (15)$$

σε ένα σύστημα με  $N$  χρήστες, συνολικό αριθμό υποφερουσών  $S$  και συντελεστή έκπτωσης  $\delta$  [16]. Ο συνολικός αριθμός των υποφερουσών στο σύστημα όπως αναφέραμε προηγουμένως είναι  $S$ , αλλά στον τύπο του Rubinstein χρησιμοποιούμε την τιμή  $S^*$ , όπου

$$S^* = \lambda * S \quad (16)$$

και  $\lambda$  ένας συντελεστής επαναχρησιμοποίησης του φάσματος με τιμές μεγαλύτερες του 1. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του  $\lambda$ , τόσο μεγαλύτερη είναι η επαναχρησιμοποίηση των υποφερουσών και, επομένως, αυξάνεται η ύπαρξη παρεμβολών στο σύστημα.

$$\text{Ουσιαστικά η ποσότητα } (\lambda - 1) * S \quad (17)$$

είναι οι «εικονικές» υποφέρουσες που ανατίθενται στους χρήστες και στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν, αλλά είναι κάποιες από τις υποφέρουσες που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί. Οι υποφέρουσες αυτές πλέον θα επαναχρησιμοποιηθούν, χρησιμοποιώντας κατά αυτόν τον τρόπο τα πλεονεκτήματα της OFDMA τεχνικής. Στο σύστημα που έχουμε μοντελοποιήσει έχουμε  $|N|/|K|$  χρήστες, όπου  $|K|$  οι D2D συσκευές, απλώς το αναφέραμε σαν παίγνιο N-παικτών όπως στην διεθνή ορολογία.

### **6.3.2. Ταξινόμηση των Υποφερουσών στους Χρήστες του Συστήματος**

Αφού έχει γίνει ο ακριβής προσδιορισμός του πλήθους των υποφερουσών που θα ανατεθούν σε κάθε χρήστη, πρέπει να γίνει η ακριβής κατανομή αυτών. Παρακάτω θα αναλύσουμε τρεις μεθόδους κατανομής των υποφερουσών που πραγματοποιήσαμε και στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων από όλες τις μεθόδους αυτές.

#### **6.3.2.1. Μέθοδος Κατανομής των Υποφερουσών στους Χρήστες Διαδοχικά (Sequentially Mapping Policy)**

Σε αυτήν την μέθοδο, κάθε χρήστης καταλαμβάνει διαδοχικές υποφέρουσες του φάσματος. Συγκεκριμένα, ο χρήστης 1 καταλαμβάνει τις πρώτες  $K_1^*$  υποφέρουσες, ο χρήστης 2 καταλαμβάνει τις επόμενες  $K_2^*$  υποφέρουσες. Όταν ολοκληρωθούν οι διαθέσιμες υποφέρουσες  $S$ , η διαδικασία συνεχίζεται από την αρχή μέχρι να ικανοποιηθούν όλοι οι χρήστες του συστήματος. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά απλή και δεν απαιτεί οι χρήστες να γνωρίζουν τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε κανάλι. Πρόκειται για εντοπισμένη μέθοδο κατανομής πόρων.

#### **6.3.2.2. Μέθοδος Κατανομής των Υποφερουσών στους Χρήστες με Βάση το Μέγιστο Κέρδος Καναλιού (Max Gain mapping policy).**

Η μέθοδος αυτή αποτελεί την πρώτη παραλλαγή κατανεμημένης ταξινόμησης των πόρων στους χρήστες. Χρησιμοποιεί γνώσεις για τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε κανάλι, επομένως έχει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα από την προηγούμενη μέθοδο. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην επιλογή των υποφερουσών που δίνουν το μεγαλύτερο κέρδος καναλιού στους χρήστες χωρίς να δίνεται κάποια προτεραιότητα σε αυτούς, είτε με βάση την απόσταση τους από το σταθμό βάσης είτε με βάση τη σειρά εισαγωγής



τους στο σύστημα και το είδος τους (απλός χρήστης ή D2D συσκευή). Ουσιαστικά, με δεδομένο το κέρδος καναλιού που έχει κάθε χρήστης σε κάθε υποφέρουσα, επιλέγεται η μέγιστη τιμή όλου του συστήματος και ανατίθεται στο συγκεκριμένο χρήστη η συγκεκριμένη υποφέρουσα. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρις ότου να ικανοποιηθούν όλοι οι χρήστες και να αποκτήσουν τις υποφέρουσες που τους αναλογούν. Ο μοναδικός περιορισμός είναι να μην καταναμηθεί μια υποφέρουσα περισσότερες από μία φορές από ότι καταναμήθηκαν όλες οι υπόλοιπες ξεχωριστά.

### ***6.3.2.3. Μέθοδος Κατανομής των Υποφερουσών στους Χρήστες με Βάση το Μέγιστο Κέρδος Καναλιού και με Βάση τις Παρεμβολές Εισάγει Κάθε Χρήστης στο Σύστημα (Max Gain and Min Interference Mapping Policy).***

Η μέθοδος αυτή αποτελεί τη δεύτερη παραλλαγή κατανεμημένης ταξινόμησης των πόρων στους χρήστες. Χρησιμοποιεί γνώσεις για τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε κανάλι και γνώσεις για την ακριβή θέση κάθε χρήση στο σύστημα. Η μέθοδος αυτή είναι συνδυαστική και τα βήματα της είναι τα εξής:

- Αρχικά, γίνεται επιλογή των υποφερουσών που δίνουν το μεγαλύτερο κέρδος καναλιού στους χρήστες, με τον τρόπο που έγινε και στη δεύτερη μέθοδο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι κάθε μια από τις υποφέρουσες να καταναμηθεί μια φορά. Προφανώς, οι χρήστες που τους κατανέμονται όλες οι υποφέρουσες που τους αναλογούν, είναι ικανοποιημένοι και δεν αλλάζει η επιλογή τους.
- Έπειτα, θα υπάρξει επαναχρησιμοποίηση των υποφερουσών με βάση τον συντελεστή επαναχρησιμοποίησης  $\lambda$  που αναλύθηκε παραπάνω, κάτι το οποίο σημαίνει την ύπαρξη παρεμβολών. Στην μέθοδο αυτή προσπαθήσαμε να μειώσουμε τις παρεμβολές που θα εισαχθούν στο σύστημα. Υπολογίστηκε η ισχύς εκπομπής που εκπέμπεται σε όλες τις υποφέρουσες από το βήμα 1, και επιλέγεται η υποφέρουσα στην οποία μεταδίδονται, μέχρι τώρα, δεδομένα με τη χαμηλότερη ισχύ στο σύστημα.
- Αφού έχει επιλεγεί η υποφέρουσα την οποία θα αναθέσουμε σε κάποιον χρήστη, επόμενος στόχος της μεθόδου είναι η εύρεση του χρήστη στον οποίο θα την αναθέσουμε. Επιλέγεται ο χρήστης ο οποίος ελαχιστοποιεί μια ποσότητα η οποία ουσιαστικά αποτελεί την παρεμβολή που θα επιβάλει ο χρήστης στη

συγκεκριμένη υποφέρουσα. Παρακάτω θα παρουσιαστεί αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζονται οι παρεμβολές στο σύστημα.

- Τα βήματα 2 και 3 επαναλαμβάνονται μέχρι να ικανοποιηθούν όλοι οι χρήστες του συστήματος και να αποκτήσουν τον αριθμό των υποφερουσών που τους αναλογεί.

### 6.3.3. Εύρεση Βέλτιστης Ισχύος

Αφού έχουν κατανεμηθεί οι υποφέρουσες στους χρήστες του συστήματος, επόμενο βήμα είναι να υπολογίσουμε την ισχύ με την οποία θα εκπέμπει κάθε χρήστης σε κάθε υποφέρουσα που του αντιστοιχεί έτσι ώστε να μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητάς του. Στόχος λοιπόν είναι να λύσουμε το πρόβλημα βελτιστοποίησης που παρουσιάσαμε παραπάνω και είναι το εξής:

$$\max U_{i,j} (P_{i,j}) \text{ με } P_{i,j} \in \left[0, \frac{P_t}{K_i}\right] \quad (18)$$

Για να μεγιστοποιείται η συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη σε κάθε υποφέρουσα που του αντιστοιχεί πρέπει να μηδενίζεται η πρώτη παράγωγος της ως προς την ισχύ εκπομπής του χρήστη στη συγκεκριμένη υποφέρουσα, δηλαδή

$$\frac{dU_{i,j}(P_{i,j})}{dP_{i,j}} = 0 \quad (19)$$

Αντικαθιστώντας και εκτελώντας τις πράξεις έχουμε διαδοχικά:

$$\begin{aligned} \frac{d\left(\frac{R_{opt} * f(\gamma_{i,j})}{P_{i,j}}\right)}{dP_{i,j}} &= 0 \Leftrightarrow \\ \frac{R_{opt} * \frac{df(\gamma_{i,j})}{dP_{i,j}} * P_{i,j} - R_{opt} * f(\gamma_{i,j})}{P_{i,j}^2} &= 0 \Leftrightarrow \\ R_{opt} * \left(\frac{df(\gamma_{i,j})}{dP_{i,j}} * P_{i,j} - f(\gamma_{i,j})\right) &= 0 \Leftrightarrow \end{aligned}$$

$$\frac{df(\gamma_{i,j})}{dP_{i,j}} * P_{i,j} - f(\gamma_{i,j}) = 0 \quad (20)$$

Σύμφωνα με τον κανόνα της αλυσίδας έχουμε:

$$\frac{df(\gamma_{i,j})}{dP_{i,j}} = \frac{df(\gamma_{i,j})}{d\gamma_{i,j}} * \frac{d\gamma_{i,j}}{dP_{i,j}} \quad (21)$$

Ισχύει όμως:

$$\gamma_{i,j} = \frac{P_{i,j} * G_{i,j}}{\sigma^2 + I_{i,j}},$$

άρα

$$\frac{d\gamma_{i,j}}{dP_{i,j}} = \frac{d\left(\frac{P_{i,j} * G_{i,j}}{\sigma^2 + I_{i,j}}\right)}{dP_{i,j}} = \frac{G_{i,j}}{\sigma^2 + I_{i,j}} = \frac{\gamma_{i,j}}{P_{i,j}} \quad (22)$$

Επομένως, η (20) με χρήση των (21) και (22) γίνεται:

$$\gamma_{i,j} * \frac{df(\gamma_{i,j})}{d\gamma_{i,j}} - f(\gamma_{i,j}) = 0 \quad (23)$$

Αποδεικνύεται ότι λόγω της σιγμοειδούς φύσης της συνάρτησης  $f$  η παραπάνω εξίσωση έχει μοναδική λύση  $\gamma_{i,j}^*$ .

Επομένως, αφού βρήκαμε το  $\gamma_{i,j}^*$  που μεγιστοποιεί την συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη σε κάθε υποφέρουσα, καταλήγουμε ότι η βέλτιστη ισχύς εκπομπής προκύπτει από τον τύπο:

$$P_{i,j}^* = \frac{\gamma_{i,j}^*(\sigma^2 + I_{i,j})}{G_{i,j}} \quad (24)$$

Όπως αναφέραμε και στην παρουσίαση του προβλήματος, η ισχύς εκπομπής ενός χρήστη σε κάθε υποφέρουσα δεν πρέπει να ξεπερνάει κάποιο όριο. Οπότε, λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό αυτό, η τελική βέλτιστη ισχύς εκπομπής του χρήστη  $i$  για μια υποφέρουσα  $S^j$  δίνεται από τον τύπο:

$$P_{i,j}^* = \min\left(\frac{\gamma_{ij}^*(\sigma^2 + I_{ij})}{G_{i,j}}, \frac{P_t}{K_i}\right) \quad (25)$$

#### 6.3.4. *Ανανέωση της Ισχύος*

Για κάθε υποφέρουσα που ανατίθεται σε κάθε χρήστη πραγματοποιούμε την διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένως για εύρεση της βέλτιστης ισχύος εκπομπής για  $M$  επαναλήψεις (iterations), ανανεώνοντας κάθε φορά την τιμή της ισχύος στον τύπο των παρεμβολών. Με τον τρόπο αυτό, όσο αυξάνονται οι επαναλήψεις η τιμή της βέλτιστης ισχύος εκπομπής μειώνεται και εν τέλει συγκλίνει στη μικρότερη δυνατή τιμή της που μεγιστοποιεί την συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη.

#### 6.3.5. *Επανάληψη της Διαδικασίας*

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθούν όλοι οι χρήστες του συστήματος σε όλες τις υποφέρουσες που τους έχουν κατανεμηθεί.

## 6.4 *Ταίριασμα D2D Χρηστών (D2D Pairing) και Υπολογισμός Παρεμβολών του Συστήματος.*

Για τον υπολογισμό των παρεμβολών και στις τρεις μεθόδους που αναλύθηκαν χρησιμοποιήθηκε η ίδια διαδικασία που θα περιγράψουμε σε αυτήν την ενότητα. Βασική προϋπόθεση είναι να γνωρίζουμε σε ποιόν χρήστη  $j$  εκπέμπει κάθε χρήστης  $i$ , κάτι το οποίο γίνεται στην αρχή του αλγόριθμου, πριν τον υπολογισμό των παρεμβολών. Οι κανονικοί χρήστες του συστήματος εκπέμπουν προς τον σταθμό βάσης ενώ για τους D2D χρήστες, η διαδικασία είναι πιο περίπλοκη για την εύρεση του D2D χρήστη με τον οποίο επικοινωνούν (D2D pairing) και περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

#### 6.4.1. *Ταίριασμα των D2D Χρηστών*

Η ιδέα της ύπαρξης των D2D χρηστών είναι να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους κάτι το οποίο βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του συστήματος. Επομένως, για να

έχει νόημα η ύπαρξη τους, πρέπει οι D2D χρήστες που θα επικοινωνούν μεταξύ τους να βρίσκονται αρκετά κοντά για να εκμεταλλευτούμε όλα τα πλεονεκτήματα αυτών των συσκευών. Τα βήματα που ακολουθήσαμε είναι τα εξής:

- Υπολογισμός της απόστασης κάθε D2D χρήστη από τους υπόλοιπους.
- Εύρεση της ελάχιστης απόστασης από όλες αυτές και δημιουργία D2D ζεύγους (D2D Pairing) μεταξύ των δύο χρηστών που την πετυχαίνουν.
- Επανάληψη της διαδικασίας μέχρι κάθε χρήστη να «ταιριάζει» με κάποιον άλλον. Είμαστε σίγουροι ότι θα επιτευχθεί «ταίριασμα» για όλους τους D2D χρήστες αφού ο αριθμός τους είναι άρτιος.

#### 6.4.2. Υπολογισμός των Παρεμβολών του Συστήματος

Τα πλεονεκτήματα της επαναχρησιμοποίησης του φάσματος είναι πολλά και σημαντικά, ωστόσο εισάγουν παρεμβολές στο σύστημα. Σε κάθε υποφέρουσα που κατανέμεται σε δύο ή περισσότερους χρήστες, κάθε χρήστης εισάγει παρεμβολή σε όλους τους υπόλοιπους και δέχεται, αντίστοιχα, παρεμβολές από κάθε έναν από αυτούς ξεχωριστά. Στις υποφέρουσες που κατανέμονται σε έναν μόνο χρήστη δεν υπάρχουν παρεμβολές.

Έστω ότι ο χρήστης  $i$  θέλει να μεταδώσει δεδομένα σε μια υποφέρουσα  $j$  που του έχει κατανεμηθεί, η οποία έχει κατανεμηθεί συνολικά σε  $k$  χρήστες. Οι παρεμβολές που εισάγουν οι υπόλοιποι  $k-1$  χρήστες στον χρήστη  $i$  στην υποφέρουσα  $j$  δίνονται από τον τύπο:

$$I_{i,j} = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^k P_{r,j} * G_{r,j} \quad (26)$$

Υπάρχει όμως η ιδιαιτερότητα ότι το  $G_{r,j}$  δεν ορίζεται με τον κλασσικό τρόπο που ορίστηκε προηγουμένως. Ο τύπος παραμένει ο ίδιος

$$G_{r,j} = \frac{A_{r,j}}{d_r^a}, \quad (27)$$

αλλά το  $d_r$  αναφέρεται στην απόσταση του χρήστη  $r$  από τον χρήστη με τον οποίο επικοινωνεί ο χρήστης  $i$ . Όπως αναφέραμε προηγουμένως, οι κλασσικοί χρήστες της

κυψέλης επικοινωνούν με τον σταθμό βάσης, ενώ οι D2D χρήστες επικοινωνούν με τον αντίστοιχο D2D χρήστη που έχουν «ταιριάξει».

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>0</sup>

## Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

---

### 7.1 Εισαγωγή

### 7.2 Παράμετροι του Συστήματος

### 7.3 Τοπολογία του Συστήματος

### 7.4 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και Σχολιασμός

---

#### *7.1. Εισαγωγή*

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δώσουμε αποτελέσματα από την προσομοίωση των αλγορίθμων που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 6. Θα ορίσουμε τις αναλυτικές τιμές των παραμέτρων του συστήματος και θα παρουσιάσουμε διαφορετικά σενάρια για διαφορετικές παραμέτρους του συστήματος. Στόχος είναι να βγάλουμε συμπεράσματα για τη χρησιμότητα των αλγορίθμων και να συγκρίνουμε την απόδοσή τους.

#### *7.2. Παράμετροι του Συστήματος*

Στον παρακάτω πίνακα θα αναφέρουμε αναλυτικά τις παραμέτρους του συστήματος που προσομοιώσαμε και θα ορίσουμε τις τιμές τους:

Αριθμός κανονικών χρηστών του συστήματος $N$	8
Αριθμός D2D χρηστών του συστήματος $K$	20
Αριθμός συνολικών υποφερουσών του συστήματος $S$	100
Εύρος ζώνης κάθε υποφέρουσας $R_{opt}$	64Kbps
Θόρυβος κάθε υποφέρουσας $\sigma^2$	$5 \cdot 10^{-15}$ W
Διαστάσεις κυψέλης	$300 \cdot 300$ m <sup>2</sup>
Παράμετροι της συνάρτησης αποδοτικότητας $f$	A=0.8 M=80
Μέση τιμή της λογαριθμοκανονικής κατανομής $\mu$	0
Τυπική απόκλιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής $\sigma$	0.5dB
Εκθέτης διάδοσης $a$	4
Μέγιστη ισχύς εκπομπής για κάθε χρήστη $P_t$	2Watt
Στόχος SINR (SINR Target) $\gamma^*$	8,9dB
Συντελεστής εξόφλησης $\delta$ (αλλάζει στα διαφορετικά σενάρια)	[0.89-0.99]
Συντελεστής επαναχρησιμοποίησης φάσματος $\lambda$ (αλλάζει στα διαφορετικά σενάρια)	[1.50-2.50]

Πίνακας 5 Παράμετροι του συστήματος.

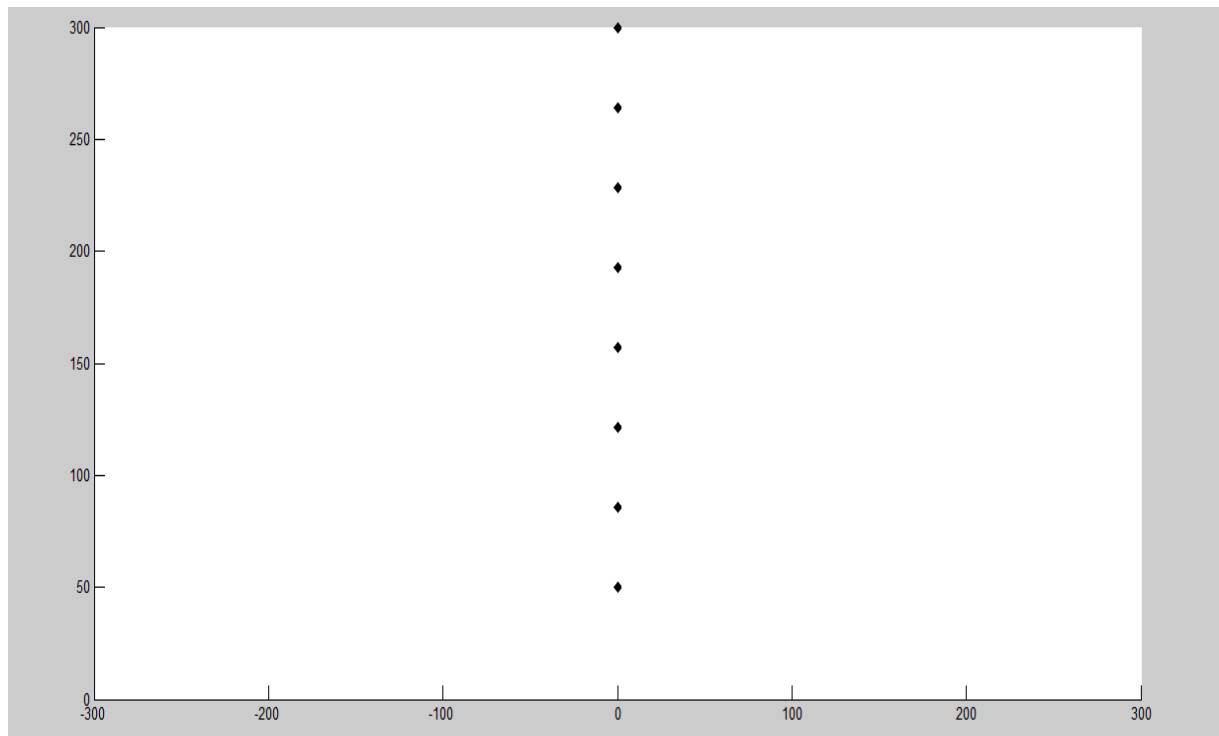
### 7.3. Τοπολογία συστήματος

Πρώτοι στο σύστημα τοποθετήθηκαν οι κυψελωτοί χρήστες και έπειτα ακολούθησαν οι D2D συσκευές. Οι κυψελωτοί χρήστες του συστήματος τοποθετήθηκαν σε σταθερές αποστάσεις μεταξύ τους από τον σταθμό βάσης με βάση την σειρά εισαγωγής του στο σύστημα. Δηλαδή,

$$d_{i+1} = d_i + 35,71 [m] \quad (28)$$

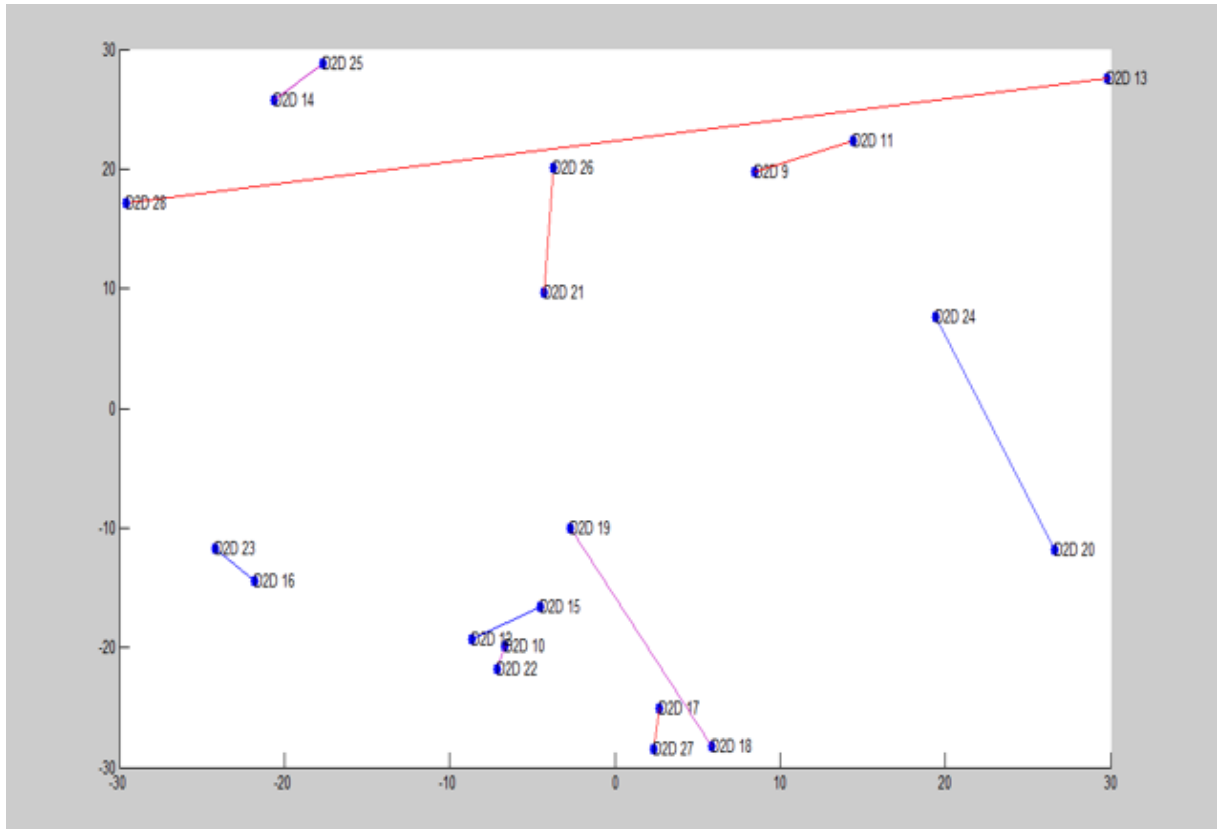
όπου  $d_{i+1}$  η απόσταση κάθε χρήστη από το σταθμό βάσης με  $i=1,2,\dots,7$  και  $d_1 = 50m$ . Παρακάτω φαίνεται η διάταξη των χρηστών αυτών στο σύστημα:





*Σχήμα 6 Διάταξη των κυψελωτών χρηστών στην τοπολογία του συστήματος.*

Οι D2D χρήστες του συστήματος τοποθετήθηκαν με τυχαίο τρόπο στην περιοχή της κυψέλης  $[(-30,30),(-30,30)]$  έτσι ώστε να εκμεταλλευόμαστε την κοντινή τους απόσταση. Πραγματοποιήθηκε το D2D «ταίριασμα» με τον τρόπο που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη τους στην τοπολογία του συστήματος όπου φαίνεται αναλυτικά ποιοι χρήστες επικοινωνούν μεταξύ τους.

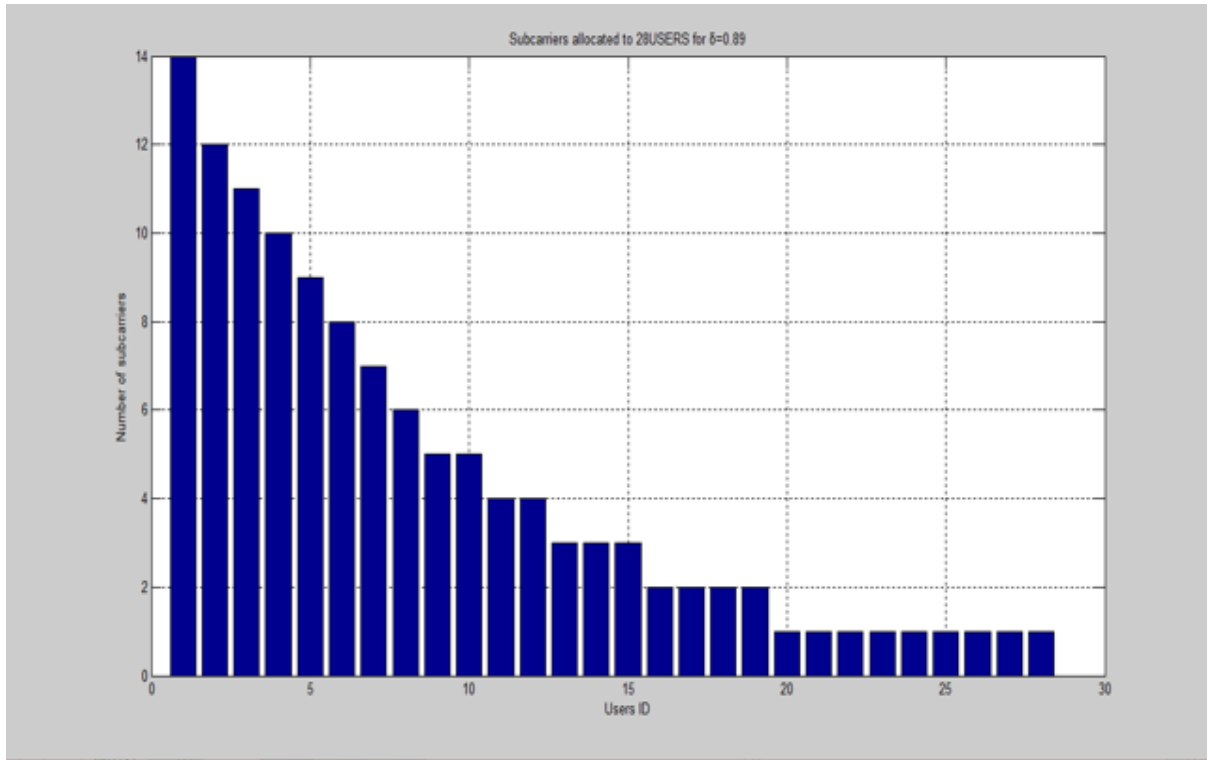


Σχήμα 7 Διάταξη των D2D χρηστών στην τοπολογία του συστήματος.

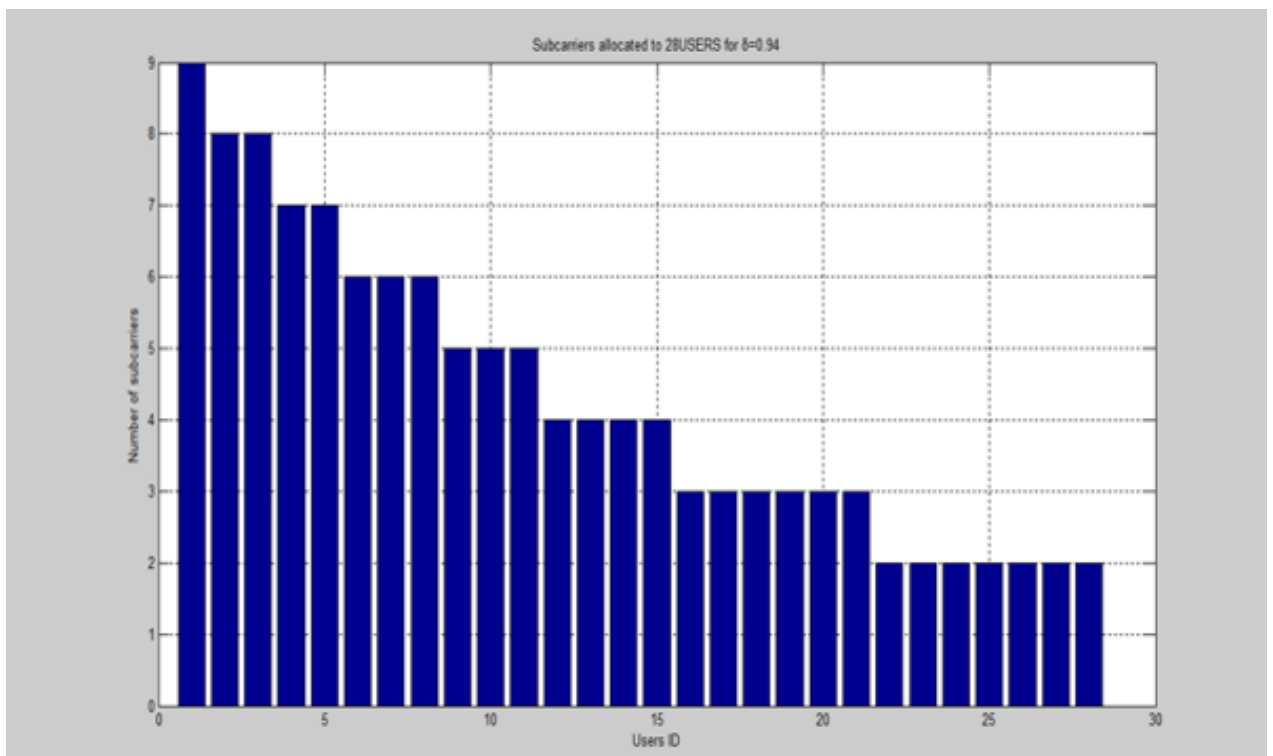
## 7.4. Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και σχολιασμός

Αρχικά, διατηρήσαμε σταθερό το συντελεστή επαναχρησιμοποίησης  $\lambda = 1,20$  και μεταβάλλαμε τις τιμές του συντελεστή εξόφλησης  $\delta$ , για να παρατηρήσουμε την επίδραση του στο σύστημα (ΣΕΝΑΡΙΟ 1). Με κάθε μία από αυτές τις τιμές συγκρίναμε και τις επιδόσεις των τριών μεθόδων κατανομής των υποφερουσών που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η ελάχιστη τιμή του  $\delta$  που χρησιμοποιήσαμε είναι το 0,89 γιατί αυτή είναι η ελάχιστη τιμή που κατανέμεται τουλάχιστον μια υποφέρουσα σε κάθε χρήστη του συστήματος.

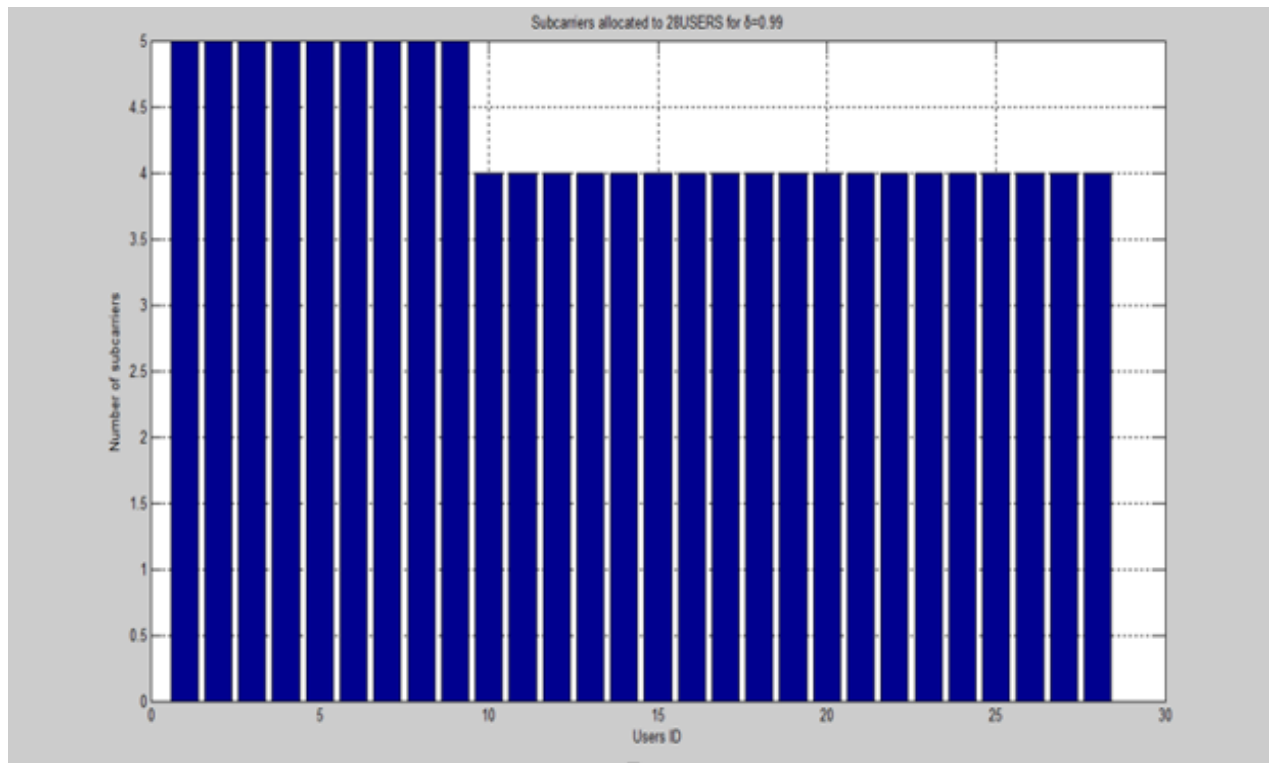
Παρακάτω παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα για το παραπάνω σενάριο:



Σχήμα 8 Πλήθος υποφερουσών που κατανέμονται σε κάθε χρήστη για  $\delta=0,89$

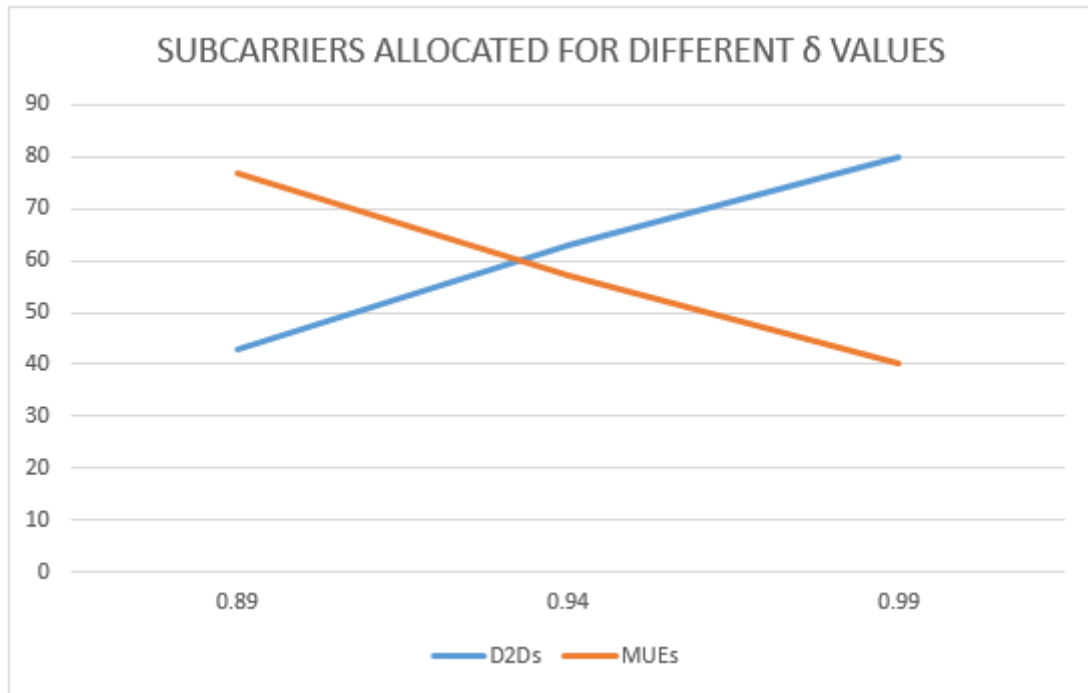


Σχήμα 9 Πλήθος υποφερουσών που κατανέμονται σε κάθε χρήστη για  $\delta=0,94$ .



**Σχήμα 10** Πλήθος υποφερουσών που κατανέμονται σε κάθε χρήστη για  $\delta=0,99$ .

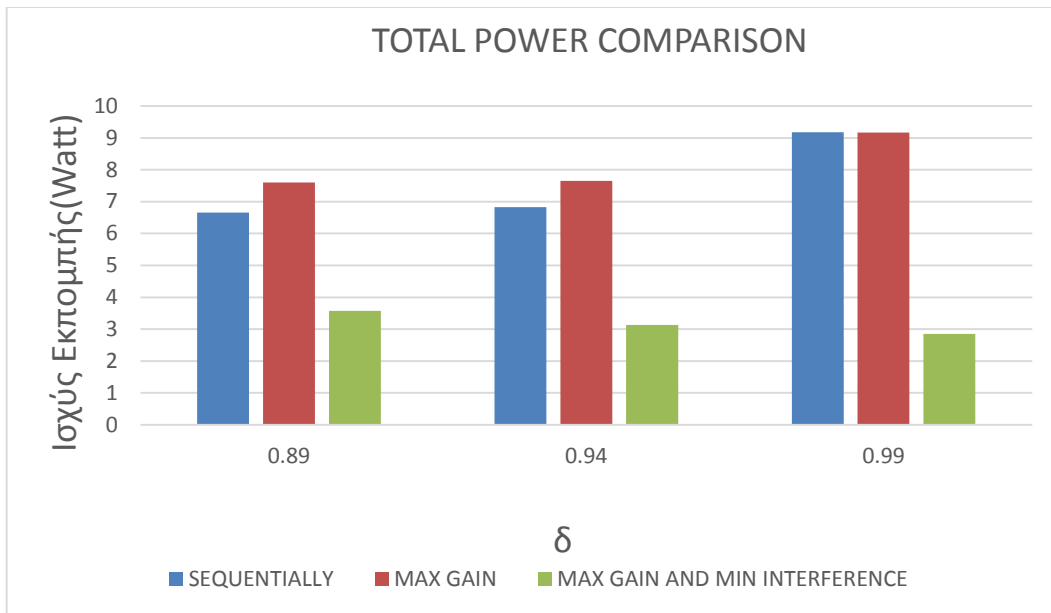
Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι ο αριθμός των υποφερουσών που κατανέμεται σε κάθε χρήστη εξαρτάται μόνο από την σειρά εισαγωγής του στο σύστημα και την τιμή της παραμέτρου  $\delta$ . Όσο πλησιάζει η τιμή της παραμέτρου  $\delta$  στο 1 τόσο πιο «δίκαιη» γίνεται η κατανομή υποφερουσών στους χρήστες με βάση το μοντέλο του Rubinstein που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, ενώ αντίστοιχα όσο μικρότερη είναι η τιμή αυτή τόσο πιο «άδικη» είναι η κατανομή των υποφερουσών στους χρήστες. Συγκεκριμένα, βλέπουμε ότι για  $\delta=0.99$  η κατανομή των υποφερουσών στους χρήστες είναι σχεδόν ομοιόμορφη, ενώ για  $\delta=0.89$  στους πρώτους χρήστες του συστήματος κατανέμονται πάρα πολλές υποφερουσες ενώ στους τελευταίους μόνο μία.



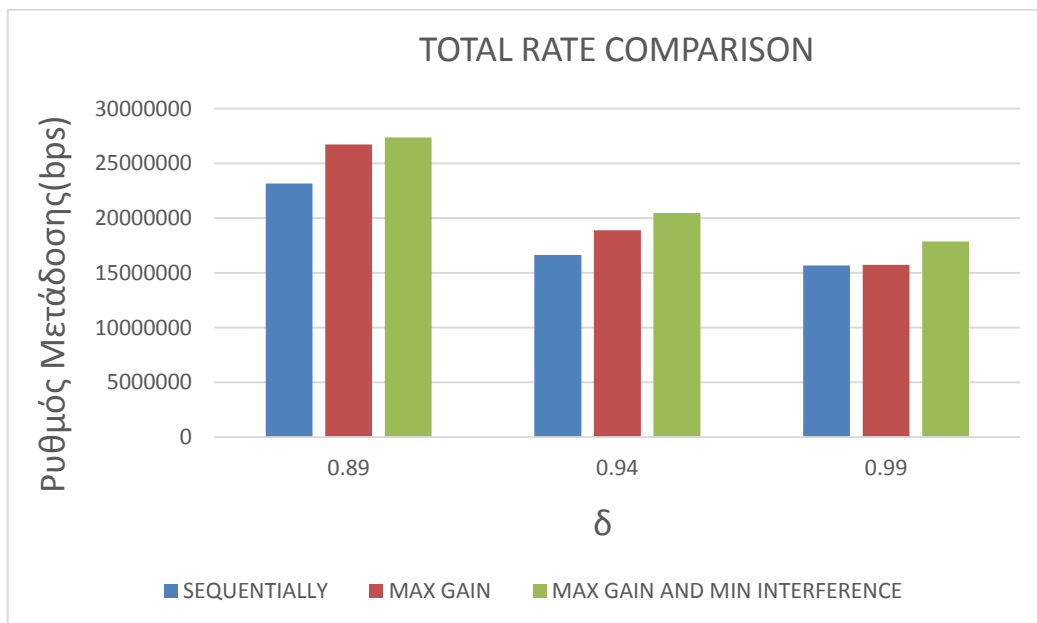
**Σχήμα 11** Πλήθος υποφερουσών που κατανέμονται σε κυψελωτούς χρήστες και σε D2D χρήστες για διαφορετικές τιμές του  $\delta$ .

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται αναλυτικά πόσες υποφερουσες κατανέμονται στους απλούς χρήστες και πόσες στους D2D χρήστες του συστήματος για διαφορετικές τιμές του συντελεστή εξόφλησης  $\delta$ . Όσο μεγαλύτερη γίνεται η τιμή του  $\delta$ , αυξάνεται το πλήθος των υποφερουσών για τους D2D χρήστες. Αυτό δεν οφείλεται σε κάποια ιδιαιτερότητά τους ή σε κάποια διαφορά τους από τους κυψελωτούς χρήστες, αλλά οφείλεται στη σειρά εισαγωγής τους στο σύστημα και στο γεγονός ότι είναι περισσότεροι.

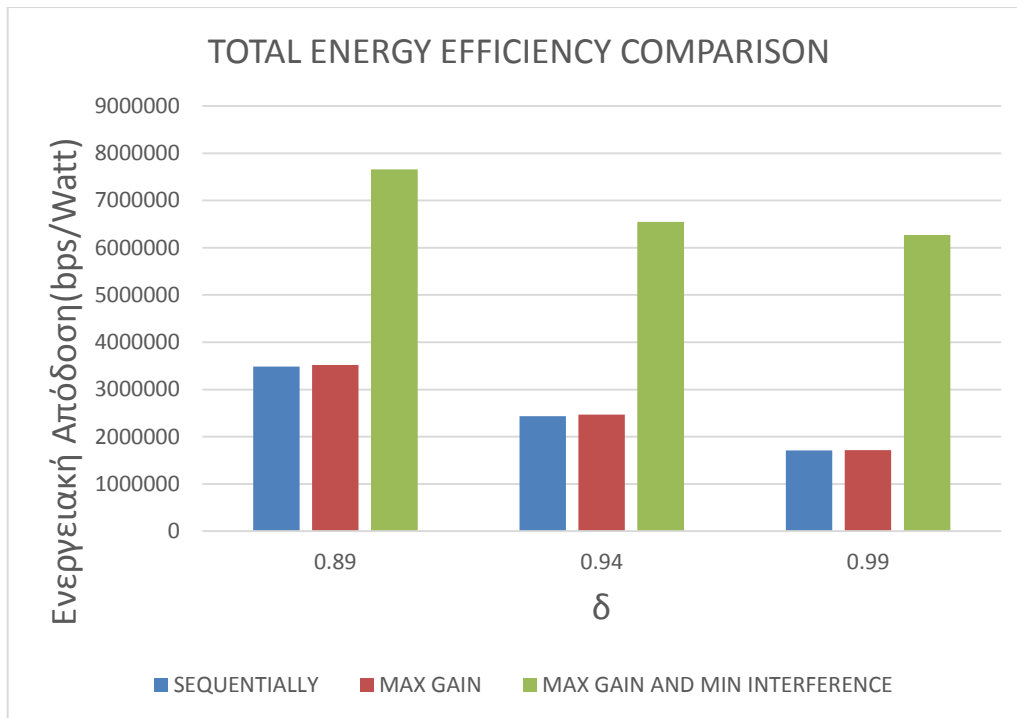
Υλοποιήθηκε η σύγκριση των 3 μεθόδων κατανομής των υποφερουσών στους χρήστες για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης και παρακάτω ακολουθεί η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων:



**Σχήμα 12** Συνολική ισχύς του συστήματος στις 3 μεθόδους κατανομής υποφερουσών για το σενάριο 1.



**Σχήμα 13** Συνολικός ρυθμός μετάδοσης του συστήματος στις 3 μεθόδους κατανομής των υποφερουσών για το σενάριο 1.



*Σχήμα 14 Συνολική απόδοση ενέργειας του συστήματος στις 3 μεθόδους κατανομής των υποφερουσών για το σενάριο 1.*

Στα παραπάνω διαγράμματα συγκρίνουμε τις 3 μεθόδους κατανομής πόρων που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μελετώντας διάφορα χαρακτηριστικά του συστήματος για διαφορετικές τιμές του συντελεστή εξόφλησης  $\delta$ .

Αρχικά, διαπιστώνουμε ότι η τρίτη μέθοδος παρουσιάζει σημαντική βελτίωση στη ισχύ εκπομπής των χρηστών σε σχέση με τις 2 προηγούμενες για όλες τις τιμές του  $\delta$ . Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο αφού αυτή η μέθοδος βασίζεται στην κατανομή των υποφερουσών η οποία θα εισάγει μειωμένες παρεμβολές στο σύστημα. Οι 2 πρώτοι αλγόριθμοι παρουσιάζουν παρόμοια συνολική κατανάλωση ισχύος εκπομπής των χρηστών, αφού η επιλογή με βάση το μέγιστο κέρδος καναλιού (Max Gain Selection) δεν συνεισφέρει στη μείωση των παρεμβολών του συστήματος. Ωστόσο, διαπιστώνουμε ότι η αύξηση της τιμής της παραμέτρου  $\delta$  χειροτερεύει τη συνολική ισχύ εκπομπής των χρηστών και στις 2 αυτές μεθόδους, αφού η «δικαιοσύνη» στην απονομή του πλήθους των υποφερουσών οδηγεί στην ύπαρξη παρεμβολών σε περισσότερους χρήστες.

Στα αποτελέσματα του συνολικού ρυθμού μετάδοσης διαπιστώνουμε ξανά την ανωτερότητα της τρίτης μεθόδου έναντι των υπολοίπων για τους λόγους που

αναφέρθηκαν και προηγουμένως. Η επιλογή των υποφερουσών με βάση το μέγιστο κέρδος (Max Gain Policy), όπως αναμενόταν, παρουσιάζει υψηλότερο συνολικό ρυθμό μετάδοσης σε σχέση με την πρώτη μέθοδο (sequentially mapping policy), αφού αυτή κατανέμει τις υποφέρουσες με πλήρη τυχαιότητα. Ακόμη, παρατηρούμε ότι η αύξηση της τιμής της παραμέτρου  $\delta$  μειώνει τον συνολικό ρυθμό μετάδοσης και στις 3 μεθόδους, αφού, όπως περιγράψαμε και προηγουμένως, οδηγεί στην ύπαρξη παρεμβολών σε περισσότερους χρήστες.

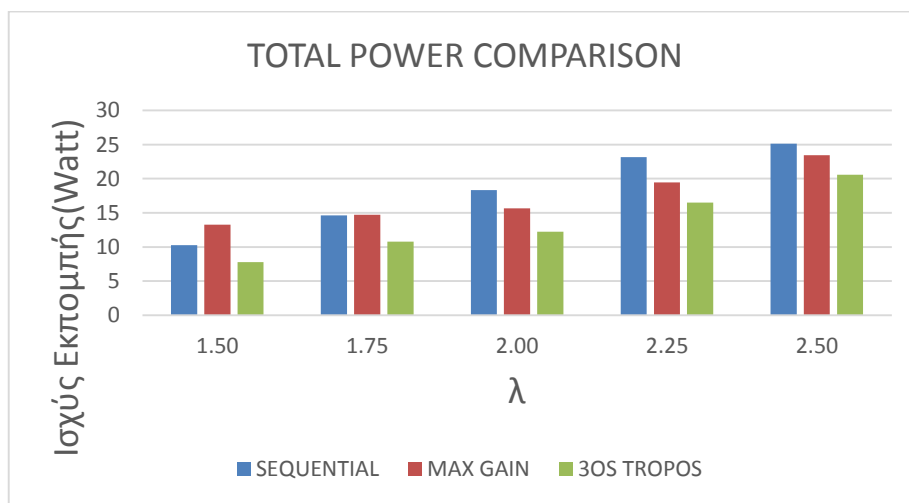
Τέλος, με την ενεργειακή απόδοση του συστήματος (energy efficiency), που ορίζεται

$$\text{από την σχέση } Total\ Energy\ efficiency = \frac{Total\ Rate}{Total\ Power} \quad (29)$$

επαληθεύουμε την ανωτερότητα της τρίτης μεθόδου έναντι των υπολοίπων.

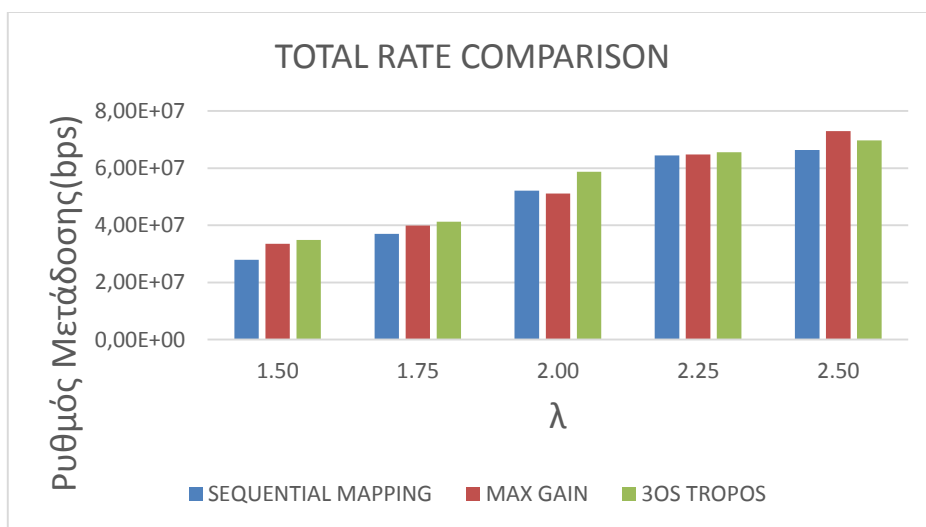
Στην συνέχεια, διατηρήσαμε σταθερό τον συντελεστή εξόφλησης  $\delta = 0,94$  και μεταβάλλαμε τις τιμές του συντελεστή επαναχρησιμοποίησης  $\lambda$ , για να μελετήσουμε την επίδραση του στο σύστημα (ΣΕΝΑΡΙΟ 2). Με κάθε μία από αυτές τις τιμές συγκρίναμε και τις επιδόσεις των 3 μεθόδων κατανομής των υποφερουσών που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι τιμές του  $\lambda$  που χρησιμοποιήσαμε κυμαίνονται από 1,50 έως 2,50.

Υλοποιήθηκε η σύγκριση των 3 μεθόδων κατανομής των υποφερουσών στους χρήστες για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης και παρακάτω ακολουθεί η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων:

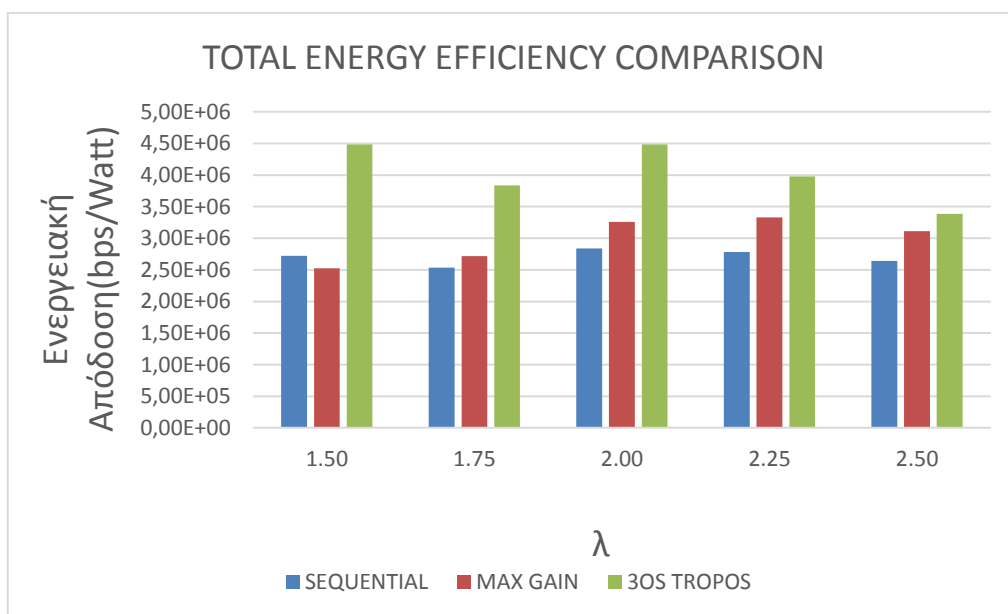


Σχήμα 15 Συνολική ισχύς εκπομπής του συστήματος στις 3 μεθόδους κατανομής των υποφερουσών για το σενάριο 2.





**Σχήμα 16** Συνολικός ρυθμός μετάδοσης του συστήματος στις 3 μεθόδους κατανομής των υποφερουσών για το σενάριο 2.



**Σχήμα 17** Συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος στις 3 μεθόδους κατανομής των υποφερουσών για το σενάριο 2.

Συμπεραίνουμε, αρχικά, ότι η τρίτη μέθοδος ελαχιστοποιεί την ισχύ εκπομπής των χρηστών του συστήματος για κάθε τιμή του  $\lambda$ . Όπως περιγράψαμε και προηγουμένως, αυτό είναι φυσιολογικό γιατί η κατανομή πόρων σε αυτήν τη μέθοδο βασίζεται στην επιλογή του χρήστη που θα ελαχιστοποιήσει τις παρεμβολές στην υπάρχουσα υποφέρουσα. Για τις 2 πρώτες μεθόδους παρατηρούμε την ανωτερότητα της Max Gain μεθόδου, η οποία φαίνεται κυρίως για μεγαλύτερες τιμές του  $\lambda$ , όπου αυξάνονται οι παρεμβολές του συστήματος και μπορεί να γίνει καλύτερη σύγκριση των αλγορίθμων.

Ακόμη, διαπιστώνουμε την άνοδο στα επίπεδα της ισχύος εκπομπής και στις 3 μεθόδους με την αύξηση της τιμής του  $\lambda$ , γιατί προφανώς εισάγονται αυξημένες παρεμβολές στο σύστημα.

Για τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων παρατηρούμε ξανά την αναμενόμενη τάση  $R_{Max\ Gain\ and\ Min\ Interference} > R_{Max\ Gain} > R_{Sequential}$  (30)

Ωστόσο, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής επαναχρησιμοποίησης  $\lambda$  υπάρχει η τάση εξισορρόπησης του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και στις 3 μεθόδους, κάτι το οποίο οφείλεται στην ύπαρξη ισχυρών παρεμβολών που δυσχεραίνουν την μετάδοση ορισμένων χρηστών σε κάθε μέθοδο. Ακόμη διαπιστώνουμε ότι ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι μεγαλύτερος σε όλες τις μεθόδους για μεγαλύτερες τιμές του  $\lambda$ , αφού οι υποφέρουσες που ανατίθενται στους χρήστες είναι περισσότερες και είναι αθροιστικό μέγεθος, παρόλο που πρόκειται για «ψεύτικες» υποφέρουσες.

Τέλος, η ενεργειακή απόδοση του συστήματος επαληθεύει την ανωτερότητα της τρίτης μεθόδου σε σχέση με τις υπόλοιπες, και της δεύτερης σε σχέση με την πρώτη.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>

## Επίλογος και Μελλοντική Έρευνα

---

## 8.1. Επίλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη ασυρμάτων μονοκυβελωτών δικτύων υψηλών ταχυτήτων, που υποστηρίζουν επικοινωνίες συσκευής προς συσκευή (D2D) και επικοινωνίες απλών χρηστών, με επαναχρησιμοποίηση φάσματος, ώστε να ικανοποιείται η ποιότητα υπηρεσιών των διαφόρων χρηστών του συστήματος.

Σημαντικοί παράγοντες για την υλοποίηση αυτής της έρευνας αποτέλεσαν η χρήση του κλάδου της Θεωρίας Παιγνίων και η εισαγωγή από τον τομέα των Οικονομικών Επιστημών της Έννοιας της Συνάρτησης Χρησιμότητας. Η Θεωρία διαπραγμάτευσης αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την κατανομή πόρων σε ασύρματα δίκτυα, με την χρήση της οποίας επιτεύχθηκε η εύρεση σημείου ισορροπίας ως προς την κατανομή των υποφερουσών στους χρήστες. Η συνάρτηση χρησιμότητας εξέφρασε τον βαθμό ικανοποίησης των χρηστών από την ποιότητα των λαμβανόμενων υπηρεσιών εντός του ασύρματου περιβάλλοντος, και στόχος του σχεδιασμού του συστήματος αποτέλεσε η μεγιστοποίησή της.

Προτάθηκαν 3 μέθοδοι κατανομής των υποφερουσών στους χρήστες και μελετήθηκε αναλυτικά η συνεισφορά τους στο σύστημα. Οι 3 μέθοδοι είναι α) Κατανομή στους χρήστες διαδοχικά (Sequentially Mapping Policy) β) Κατανομή με βάση το μέγιστο κέρδος καναλιού (Max Gain Mapping Policy) γ) Κατανομή με βάση το μέγιστο κέρδος καναλιού και την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών (Max Gain and Min Interference Mapping Policy). Παρουσιάσαμε αναλυτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και συμπεράναμε την ανωτερότητα της τρίτης μεθόδου στην απόδοση του συστήματος, η πολυπλοκότητα της οποίας, ωστόσο, είναι μεγάλη λόγω του μεγάλου όγκου πληροφοριών που χρησιμοποιεί.

## **8.2. Μελλοντική Έρευνα**

Η εργασία αυτή αποτελεί τμήμα ενός ευρύτερου πλαισίου ερευνών σχετικά με την βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων σε ασύρματα περιβάλλοντα μετάδοσης δεδομένων. Η προσπάθεια για την καλύτερη αντιμετώπιση του προβλήματος φυσικά δε σταματά εδώ, αφού η διαρκής εξέλιξη της τεχνολογίας σε συνδυασμό με τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών, καθιστά απαραίτητη την συνέχιση της έρευνας στον τομέα αυτό.

Στηριζόμενοι στην έρευνα αυτή, θα μπορούσε να επεκταθεί η έρευνα για κατανομή πόρων σε ένα περιβάλλον πολλαπλών κυψελών, όπου το πρόβλημα γίνεται πιο σύνθετο καθώς πρέπει να γίνει μελέτη και στον τρόπο επιλογής κυψέλης από κάθε χρήστη. Ακόμη, στην εργασία αυτή εισαγάγαμε την έννοια της συνάρτησης χρησιμότητας στην απλή της μορφή, με την έννοια ότι εκφράζει το πλήθος των επιτυχώς μεταδιδόμενων bits ανά μονάδα ισχύος. Η έρευνα αυτή θα μπορούσε να επεκταθεί σε δίκτυα όπου η συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη διαφέρει από τους άλλους ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας την οποία επιθυμεί και την προτεραιότητα που έχει ο χρήστης στο σύστημα. Τέλος, η έρευνα για την παρουσία επικοινωνίας συσκευής προς συσκευή (D2D Communication) μπορεί να επεκταθεί, γιατί αποτελεί μια πολλή υποσχόμενη προσέγγιση για τα νέα ασύρματα δίκτυα.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>0</sup>

## Βιβλιογραφία

---

## ***9.1. Βιβλιογραφία***

- [1] Παναγιώτης Γ. Κωττής , Παντελής-Δανιήλ Μ. Αράπογλου, “Ασύρματες Επικοινωνίες”
- [2] Ichiro Obara, UCLA March 7, 2012 “Bargaining”
- [3] <https://www.youtube.com/watch?v=0i7p9DNvtjk> “Game Theory 101: What is a Nash Equilibrium”
- [4] Ken Binmore, Avner Shaked, John Sutton, “An Outside Option Experiment”, Published by: The MIT Press
- [5]” Handbook of Game Theory “, Edited by H. Peyton Young, Shmuel Zamir
- [6] Junxian Huang, Feng Qian, Alexandre Gerber, Z. Morley Mao, Subhabrata Sen, Oliver Spatscheck “A Close Examination of Performance and Power Characteristics of 4G LTE Networks” University of Michigan, AT&T Labs – Research
- [7] T. Jiang,L. Song, and Y. Zhang, “Orthogonal Frequency Division Multiple Access Fundamentals and Applications”, Boston MA, USA: Auerbach Publications, 2010.
- [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal\\_frequency-division\\_multiple\\_access](https://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiple_access)
- [9] Klaus Doppler, Mika Rinne, Carl Wijting, Cassio B. Ribeiro, and Klaus Hugl, Nokia Research Center “Device-to-Device Communication as an Underlay to LTE-Advanced Networks
- [10] Tekinay, S., Jabbari, B., “Handover and Channel Assignment in Mobile Cellular Networks”, IEEE Trans. On Communications, Vol. 29, pp. 42-46, November 1991.
- [11] Hashim Safdar, Norsheila Fisal, Rahat Ullah, Wajahat Maqbool, Faiz Asraf, Zubair Khalid, A.S. Khan “Resource Allocation for Uplink M2M Communication: A Game Theory Approach”
- [12] Chia-Hao Yu and Olav Tirkkonen Klaus Doppler and Cassio Ribeiro “Power optimization of device-to-device communication underlying cellular communication”

[13] Hongnian Xing, and Sami Hakola “The Investigation of Power Control Schemes for a Device-to-Device Communication integrated into OFDMA Cellular System”

[14] Chia-Hao Yu and Olav Tirkkonen Klaus Doppler and C’assio Ribeiro “On the performance of Device-to-Device underlay communication with simple power control”

[15] Chieh Yuan Ho, *Student Member, IEEE*, and Ching-Yao Huang, *Member, IEEE* “Energy-Saving Massive Access Control and Resource Allocation Schemes for M2M Communications in OFDMA Cellular Networks”

[16] Eirini Eleni Tsiropoulou, Aggelos Kapoukakis and Symeon Papavassiliou “Energy-efficient Subcarrier Allocation in SC-FDMA Wireless Networks based on Multilateral Model of Bargaining”

[17] Harpreet S. Dhillon, Howard C. Huang, Harish Viswanathan and Reinaldo A. Valenzuela “On Resource Allocation for Machine-to-Machine (M2M) Communications in Cellular Networks”

[18] Fei Teng, Dongning Guo, Michael L. Honig Weimin Xiao, Jialing Liu “Power Control Based on Interference Pricing in Hybrid D2D and Cellular Networks”

[19] Eirini Eleni Tsiropoulou, Ioannis Ziras and Symeon Papavassiliou ‘Service Differentiation and Resource Allocation in SCFDMA Wireless Networks through User-Centric Distributed Non-Cooperative Multilateral Bargaining’.