

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακή Διατριβή Στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας



Μελέτη των εφαρμογών της Θεωρίας Παιγνίων στις Ασύρματες Επικοινωνίες

Σενετάκης Μάξιμος

**Επιβλέπων Καθηγητής
Νικόλαος Νομικός**

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μελέτη των εφαρμογών της Θεωρίας Παιγνίων στις Ασύρματες Επικοινωνίες

Σενετάκης Μάξιμος

**Επιβλέπων Καθηγητής
Νικόλαος Νομικός**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε
προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση

μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών
στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας

από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών
του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου

Νοέμβριος 2019

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή μελετά το θέμα των εφαρμογών της Θεωρίας Παιγνίων στις Ασύρματες Επικοινωνίες. Οι εφαρμογές της Θεωρίας Παιγνίων ερευνούν την αλληλεπίδραση των ατόμων σε περιβάλλοντα τα οποία, το κάθε άτομο επηρεάζει το άλλο με τις αποφάσεις του. Οι συνθήκες αυτές, υπό προϋποθέσεις, ισχύουν επίσης και σε ένα ασύρματο περιβάλλον επικοινωνιών, στο οποίο τα φυσικά πρόσωπα αντικαθιστούνται πλέον από ηλεκτρονικές δικτυακές συσκευές.

Η εφαρμογή της Θεωρίας Παιγνίων στις ασύρματες επικοινωνίες, αν και σε ερευνητικό στάδιο, αρχίζει και δίνει λύσεις σε όλο και περισσότερα προβλήματα. Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή θα μελετήσουμε, πως η Θεωρία Παιγνίων μπορεί να εφαρμοστεί στις ασύρματες επικοινωνίες, δίνοντας λύσεις όσον αφορά την όλο και αυξανόμενη ζήτηση προηγμένων υπηρεσιών από τους χρήστες, βασισμένη στην καλύτερη και αποδοτικότερη κατανομή του διαθέσιμου φάσματος των ασύρματων δικτύων. Επίσης θα ασχοληθούμε με τον τρόπο ρύθμισης της ισχύος των κινητών σε συστήματα CDMA για την αποφυγή παρεμβολών σε άλλες συσκευές για την προσφορά καλύτερης ποιότητας υπηρεσίας.

Λέξεις – Κλειδιά:

Τεχνολογίες Πληροφορικής Επικοινωνιών, Λογισμικό, Υπολογιστές, Δίκτυα, Παιγνία.

Summary

This postgraduate thesis studies the application of Game Theory in Wireless Communications. Applications of Game Theory study the interaction of individuals in environments where each individual influences the other with his or her own decisions. These conditions, subject to conditionality, also apply in a wireless communication environment in which, natural persons are now replaced by electronic networking devices.

The application of Game Theory to wireless communications, albeit at a research stage, has started providing solutions to more and more problems. In this postgraduate thesis, we will study how Game Theory can be applied to wireless communications, providing solutions to the ever-increasing demand of users for advanced services, relying on the efficient allocation of the available wireless spectrum. We will also look at how to adjust the power of mobile terminals in CDMA systems to avoid interference with other devices, thus providing better quality of service.

Key - words:

Information Communication Technologies, Software, Computers, Networks, Games.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, επιθυμώ να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας μου, καθηγητή κύριο Δρ. Νομικό Νικόλαο για την καθοδήγησή του και τη συμπαράστασή του, σε όλες τις επιμέρους φάσεις της εκπόνησής της εν λόγω εργασίας καθώς και όλους τους καθηγητές του Ανοικτού Πανεπιστημίου της Κύπρου, για τις πολύτιμες γνώσεις που μας παρείχαν κατά την διάρκεια των σπουδών μας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράστασή που μου παρείχε και να αφιερώσω την εν λόγω εργασία στην ανηψιά μου Ελεάνα, ελπίζοντας να με συγχωρέσει για τον χρόνο που δεν είχα για να της διαθέσω τα χρόνια των σπουδών μου.

Πίνακας Περιεχομένων

Μεταπτυχιακή Διατριβή Στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας.....	1
Περίληψη.....	3
Summary.....	4
Ευχαριστίες.....	5
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	11
1.1 Εισαγωγή στις ασύρματες επικοινωνίες	11
1.2 Σκοπός της Εργασίας	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	17
2.1 Ανάλυση των δικτύων 5G	17
2.2 Τεχνολογίες 5G	19
2.3.1 Επικοινωνίες D2D	21
2.3.2 M2M	23
2.3.3 Interference management.....	24
2.3.4 V2V	24
2.3.5 C-Ran	26
2.3.6 Full duplex-Half duplex	27
2.4 Εφαρμογές της τεχνολογίας 5G.....	28
2.4.1 Εικονική Πραγματικότητα	28
2.4.2 Αυτόνομα Οχήματα	28
2.4.3 Βιομηχανικές Εφαρμογές	29
2.4.4 Διασκέδαση και πολυμέσα.....	29
2.4.5 Έξυπνο σπίτι.....	30
2.4.6 Έξυπνες πόλεις.....	30
2.4.7 Έξυπνη καλλιέργεια.....	30
2.4.8 Εφαρμογές κρίσιμης σημασίας (υγεία - διάσωση ατόμων)	31
2.5 Οι προσδοκίες των χρηστών από τα δίκτυα 5G.....	32
2.5.1 Δικτυακή Κάλυψη.....	32
2.5.3 Ταχύτητα Δικτύου.....	34
2.5.4 Μελλοντικές τάσεις και εξελίξεις	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	39
ΘΕΩΡΙΑ ΠΑΙΓΝΙΩΝ.....	39
3.1 Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων	39
3.2 Nash ισορροπία.....	40
3.3 Μεικτές στρατηγικές.....	42

3.4	Θεωρία παιγνίων και τηλεπικοινωνίες	43
3.5	Η Τιμή της Αναρχίας.....	44
3.6	Μηχανισμοί.....	45
3.7	Κατηγορίες παιγνίων - Ταξινόμηση των Προσεγγίσεων της Θεωρίας Παιγνίων.....	46
3.7.1	Κλασικά μη συνεργατικά παίγνια.....	49
3.7.2	Εξελικτικά παίγνια	50
3.7.3	Δυναμικά παίγνια.....	51
3.7.4	Εκτεταμένη μορφή με τέλεια πληροφορία.....	51
3.7.5	Nash Equilibria σε παίγνια.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4		54
4.1	Εφαρμογές της Θεωρίας Παιγνίων στις τηλεπικοινωνίες	54
4.1.1	Συνεταιριστική ή μη συνεταιριστική προσέγγιση	54
4.1.2	Συναρτήσεις χρησιμότητας	55
4.1.3	Τιμολόγηση	56
4.1.4	Κατανάλωση ενέργειας.....	58
4.1.5	Πολλαπλών παρόχων και τεχνολογιών	58
4.1.6	Επιπτώσεις στους χρήστες.....	59
4.1.7	Πολυπλοκότητα και πραγματικά σενάρια.....	59
4.2	Εφαρμογή μη συνεργατικού παίγνιου	61
4.3	Δεύτερη εφαρμογή της Θεωρίας Παιγνίων.....	64
4.4	Τρίτη εφαρμογή της Θεωρίας Παιγνίων.....	66
4.5	Θεωρία Παιγνίων και D2D τεχνολογία σε 4G δίκτυα	67
4.5.1	Μετάδοση D2D: Σενάρια και προκλήσεις.....	68
4.5.2	MAC στρατηγικές για D2D μετάδοση.....	70
4.5.3	Εξέλιξη WI-FI	70
4.5.4	Μετάδοση D2D με χρήση Θεωρίας Παιγνίων.....	72
4.5.5	Οργανωμένη στρατηγική πρόσβασης	75
4.5.6	NE αριθμητικά αποτελέσματα.....	76
4.5.7	Σενάριο προσομοίωσης.....	77
4.5.8	Αποτελέσματα προσομοίωσης	78
4.6	Διαχείριση πόρων σε δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης για 5G.....	81
4.6.1	Σχεδίαση πομποδέκτη NOMA σε PD και CD.....	83
4.6.2	Μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος για uplink PD-NOMA.....	85
4.6.3	Παίγνιο συνασπισμού για downlink PD-NOMA.....	86
4.6.4	Μοντέλα παιγνίων για κατανομή πόρων στο CD-NOMA	87
4.6.7	Πιθανές εφαρμογές και προκλήσεις έρευνας.....	91

4.7 MFG Παίγνια για παρεμβολές και έλεγχο ενεργειακής απόδοσης στα 5G.....	93
4.7.1 Πρόσφατες εφαρμογές Θεωρίας Παιγνίων.....	95
4.7.2 Mean Field Games εφαρμογές	96
4.7.3 Εφαρμογές MFG	98
4.7.4 Σενάρια δικτύου και τυπικά προβλήματα.....	99
4.7.5 Προτεινόμενος Αλγόριθμος.....	100
4.7.6 Προσομοίωση και αποτελέσματα.....	101
4.8 Σύντομη παρουσίαση του COMP	103
4.8.1 Πάγνιο με βάση το COMP.....	106
4.8.2 Προσομοίωση συστήματος.....	108
4.8.3 Αποτελέσματα και αναλύσεις.....	111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	114
5.1 Συμπεράσματα.....	114
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	116

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1. Ετερογένεια δικτύου 5G	20
Εικόνα 2. Παράδειγμα σεναρίων εφαρμογής για D2D	22
Εικόνα 3. Η συσκευή προς συσκευή(D2D).....	23
Εικόνα 4. Το ερευνητικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη.....	32
Εικόνα 5. Διάκριση των κατηγοριών Θεωρίας των Παιγνίων	48
Εικόνα 6. Εκτεταμένο παιχνίδι	53
Εικόνα 7. Προκλήσεις Της Θεωρίας Παιγνίων	55
Εικόνα 8. Παράδειγμα συμπλοκής χρησιμοποιώντας το CONET.....	59
Εικόνα 9. Σενάριο διάδοσης περιεχομένου D2D.....	70
Εικόνα 10. Μοντέλο συστήματος PD-NOMA	87
Εικόνα 11. Μοντέλο συστήματος ενός δικτύου CD-NOMA	89

Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 1. κόμβοι στο παίγνιο προώθησης πακέτων.....	63
Σχήμα 2. ad – hoc δίκτυο.....	66
Σχήμα 3. κόμβοι στο παίγνιο προώθησης πακέτων.....	67
Σχήμα 4. Χρόνος ολοκλήρωσης της διάδοσης.....	80
Σχήμα 5. Ενεργειακή απόδοση των στρατηγικών πρόσβασης.....	81
Σχήμα 6. Αριθμός προγραμματισμένων χρηστών έναντι αριθμού χρηστών σε CD-NOMA	91
Σχήμα 7. Βασικά στοιχεία για τα παίγνια μέσου πεδίου	98
Σχήμα 8. Μέση διάρκεια ζωής της μπαταρίας	102
Σχήμα 9. Βελτιωμένη απόδοση σε σύγκριση με τις παρεμβολές.....	104
Σχήμα 10. Οπτικοποίηση του COMP	105
Σχήμα 11. Προτεινόμενος αλγόριθμος	109
Σχήμα 12. Τοπολογία προσομοίωσης	110
Σχήμα 13. CDF of throughput with and without game-based CoMP	113
Σχήμα 14. CDF of SINR with and without proposed game-based CoMP	114

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Επιρροή του ασύρματου δικτύου 5G σε διάφορους τομείς	18
Πίνακας 2. Περιοχές και αντίστοιχα φάσματα.....	26
Πίνακας 3.50 Απαιτήσεις και δυνατότητες των δικτύων 5G.....	39
Πίνακας 504. Ταξινόμηση των εφαρμογών με βάση το σενάριο.....	52
Πίνακας 5. Ωφέλεια δύο χρηστών.....	68
Πίνακας 6. Στρατηγική μορφή του προτεινόμενου παιχνιδιού.....	74
Πίνακας 7. Πιθανότητες μετάδοσης NE.....	78
Πίνακας 8. Παράμετροι Προσομοίωσης.....	79
Πίνακας 9. Σύνοψη μοντέλων παιγνίων εκχώρησης πόρων για NOMA.....	92
Πίνακας 10. Παράμετροι προσομοίωσης	111

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

IoT	Internet of things	Διαδίκτυο των πραγμάτων
WLAN	Wireless Local Area Network	Τοπικό ασύρματο δίκτυο
MIMO	Multiple-input and multiple-output	Πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων
LTE	Long-Term Evolution	Μακροπρόθεσμη εξέλιξη
eNB	Evolved Node B	Εξελιγμένος κόμβος B
RAT	Radio access technology	Τεχνολογία ράδιο-πρόσβασης
D2D	Device to Device	Συσκευή προς συσκευή
V2V	Vehicle to Vehicle	Όχημα προς όχημα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή στις ασύρματες επικοινωνίες

Η επικοινωνία ήταν και είναι ένας σημαντικός τομέας στην ιστορία της ανθρωπότητας. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν εργαλεία που καθόρισαν και ανέδειξαν πολιτισμούς και εξελίχθηκαν σε βασικό παράγοντα στην εξέλιξη και την ευημερία, καθώς επίσης, και στη δημιουργία των πρώτων δικτύων. Στην αρχαία Μινωική Κρήτη για παράδειγμα υπήρχαν οι φρυκτωρίες για τη μεταφορά της πληροφορίας με χρήση της φωτιάς και πολύ αργότερα, κάπου τον 5ο αιώνα π. Χ., υπήρξε ένα εξελιγμένο δίκτυο εμπορίου που επεκτεινόταν από την Ανατολή μέχρι τη Δύση. Θα μπορούσε κανείς να παρομοιάσει τις φρυκτωρίες και τα λιμάνια εκείνων των εποχών ως τους πρώτους κόμβους οι οποίοι είτε μετέφεραν πληροφορία, είτε αγαθά. Τα δίκτυα εξελίχθηκαν, έγιναν πιο περίπλοκα και εκβιομηχανίστηκαν με την πάροδο των ετών, με σκοπό να ικανοποιούν τις όλο και αυξανόμενες ανάγκες των ανθρώπων. Δημιουργήθηκαν δίκτυα σιδηροδρόμων και ταχυδρομεία και η ναυτιλία με την αεροναυπηγική που ακολούθησαν πιστά το πρότυπο των απλών δικτύων, άκμασαν. Ωστόσο, η εφευρετικότητα και η τάση του ανθρώπου για διαρκή έρευνα απαιτούσε κάτι καλύτερο.

Η εποχή της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών, καθώς, και η δυναμικότητα σε όλα τα επίπεδα που θα έφερνε μαζί της, ήταν γεγονότα καίριας σημασίας και καταλύτης σε πολλές επιστήμες και κλάδους της ζωής. Το Διαδίκτυο (Internet) και τα ηλεκτρονικά συστήματα είναι πλέον τα νέα εργαλεία του ανθρώπινου πολιτισμού. Η επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις, το ηλεκτρονικό εμπόριο αγαθών, ακόμη, και οι καθημερινές υποχρεώσεις του ανθρώπου όπως η πληρωμή των λογαριασμών και η αλληλεπίδραση με το κράτος, είναι πλέον μία απλή ρουτίνα η οποία ικανοποιείται από τα προηγμένα ασύρματα και ενσύρματα δίκτυα επικοινωνιών.

Η ραγδαία ανάπτυξη του Διαδικτύου οδήγησε, κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων, την επιστημονική κοινότητα της Πληροφορικής, στην εκ νέου προσπάθεια για κατανόηση κάποιων παραγνωρισμένων χαρακτηριστικών του Διαδικτύου. Αυτό απαρτίζεται από μια πληθώρα αυτόνομων υπολογιστικών οντοτήτων, οι οποίες αλληλεπιδρούν στο σύστημα, έχοντας διαφορετικά και συχνά αντικρουόμενα συμφέροντα.

Από τις πολλές θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή στην πληροφορική και τις τηλεπικοινωνίες, ιδιαίτερα δημοφιλής είναι η (Μη Συνεργατική) Θεωρία Παιγνίων. Η θεωρία αυτή μελετά καταστάσεις (παίγνια), στις οποίες, ιδιοτελείς παίκτες με αντικρουόμενα συμφέροντα, λαμβάνουν αποφάσεις με σκοπό την ατομική τους ικανοποίηση, αδιαφορώντας για την ευημερία του συνόλου. Η παρατήρηση αυτή είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας νέας περιοχής, με έντονη ερευνητική δραστηριότητα, που βρίσκεται στην τομή της Επιστήμης των Υπολογιστών με την Οικονομική θεωρία και ιδιαίτερος τη Θεωρία Παιγνίων. Το αντικείμενο της περιοχής αυτής, είναι η μοντελοποίηση ενός κατανεμημένου συστήματος ως ένα (μη) συνεργατικό παίγνιο στο οποίο οι αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα αποτελούν στρατηγικές επιλογές των ιδιοτελών αυτόνομων οντοτήτων (παίκτες, πράκτορες), που αποτελούν το δίκτυο.

Από τότε που έκαναν την εμφάνισή τους, τη δεκαετία του 1970, τα ασύρματα δίκτυα απέκτησαν αυξανόμενη δημοτικότητα στην βιομηχανία των υπολογιστών. Η γοργή ανάπτυξη της τεχνολογίας των ασύρματων ψηφιακών επικοινωνιών και η εκπληκτική άνοδος της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος των φορητών υπολογιστών δημιούργησαν δυνατότητες που τα συστήματα λογισμικού μόλις αρχίζουν να εκμεταλλεύονται. Ο κινητός υπολογισμός είναι ένας πολύ γενικός όρος που περιγράφει τον υπολογισμό εν κινήσει. Οι χρήστες των υπολογιστών δεν είναι πια καθηλωμένοι σε μια συγκεκριμένη συσκευή ή σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία ή σε ορισμένη χρονική στιγμή [1] .

Ως σήμερα, χρησιμοποιούταν το μοντέλο κινητού συστήματος «σταθερής υποδομής» το οποίο εξελίχθηκε σε ένα αρκετά δημοφιλές σύστημα που παρέχει μια ποικιλία ευρέως διαθέσιμων υπηρεσιών. Η βασική ιδέα είναι ότι η περιοχή κάλυψης υποδιαιρείται σε κυψέλες με μεγέθη που κυμαίνονται από 50-100 km στα πρώτα κυψελωτά συστήματα. Κάθε κυψέλη έχει ένα σταθμό βάσης (ο οποίος αναφέρεται και ως *Mobile Support Station*, MSS είτε ως *Base Station*, BS) που διασυνδέεται με τους γειτονικούς σταθμούς με τη χρήση ενός σταθερού δικτύου υποδομής υψηλού εύρους ζώνης επικοινωνίας [2].

Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικά σενάρια στα οποία δεν διατίθεται μια σταθερή ασύρματη υποδομή όπως αυτά των κυψελωτών συστημάτων, είτε γιατί μπορεί να είναι οικονομικά ασύμφορο ή φυσικώς αδύνατο να παρασχεθεί η απαραίτητη υποδομή, είτε γιατί η υφιστάμενη κατάσταση δεν προσφέρεται για την εγκατάστασή της (παραδείγματος χάριν, δίκτυα που σχηματίζονται από δορυφόρους, πλοία ή αεροπλάνα, ή δίκτυα που συνδέουν ομάδες διάσωσης σε περίπτωση σεισμού ή πλημμύρας). Σε τέτοιες περιπτώσεις, μια συλλογή από γεωγραφικά κατανεμημένους κινητούς σταθμούς με εξοπλισμό ασύρματης επικοινωνίας μπορεί να διαμορφώσει ένα κυψελωτό δίκτυο χωρίς τη βοήθεια οποιασδήποτε προϋπάρχουσας υποδομής ή κεντροποιημένης διαχείρισης. Αυτό το είδος ασύρματου δικτύου είναι γνωστό ως ad-hoc δίκτυο [3]. Πρωταρχικό κίνητρο της ανάπτυξης των ad-hoc δικτύων ήταν οι στρατιωτικές εφαρμογές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ad-hoc δικτύωσης αποτελεί το δίκτυο των στρατιωτών και των κινητών υπολογιστών στα πεδία της μάχης [4].

Η εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα της κινητής τηλεφωνίας και η πληθώρα των προσωπικών ψηφιακών συσκευών έφερε στο προσκήνιο αρκετές πιθανές εμπορικές εφαρμογές των ad-hoc δικτύων. Παραδείγματα αποτελούν, η αντιμετώπιση καταστροφών, οι τηλεδιασκέψεις, η οικιακή δικτύωση, τα «smartdust» δίκτυα, τα δίκτυα μικρής εμβέλειας και οι ενσωματωμένες υπολογιστικές εφαρμογές. Η έλλειψη σταθερής υποδομής στα ad-hoc δίκτυα συνεπάγεται ότι, οποιοσδήποτε υπολογισμός στο δίκτυο πρέπει να λαμβάνει χώρα με μη κεντροποιημένο τρόπο. Έτσι, πολλά από τα βασικά προβλήματα των ad-hoc δικτύων μπορούν να διατυπωθούν ως προβλήματα του κατανεμημένου υπολογισμού. Ωστόσο, ορισμένα χαρακτηριστικά των ad-hoc δικτύων καθιστούν αυτή τη μελέτη πολύ διαφορετική από τις παραδοσιακές εργασίες στα κατανεμημένα συστήματα.

Σε αντίθεση με τα σταθερά δίκτυα, τα κινητά υπολογιστικά συστήματα πρέπει να αντιμετωπίσουν νέα προβλήματα όπως είναι τα ζητήματα διατήρησης ενέργειας λόγω χαμηλής διαθεσιμότητας πηγών ενέργειας και οι χαμηλοί ρυθμοί μεταφοράς δεδομένων των ασύρματων μέσων επικοινωνίας, σε σχέση με τα ενσύρματα ευρυζωνικά δίκτυα, καθώς επίσης, και τα προβλήματα που εμφανίζονται και στα ενσύρματα δίκτυα, όπως είναι η κλιμάκωση, η ασφάλεια και η δια-συνδεσιμότητα. Στην ανάπτυξη του κινητού υπολογιστικού συστήματος, η επίλυση αυτών των προβλημάτων παρουσιάζει περισσότερες δυσκολίες και η εύρεση αποτελεσματικών λύσεων αποτελεί πρόκληση.

Την τελευταία δεκαετία, γίνεται λόγος και για το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things - IoT). Το IoT είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που αναμένεται να προσφέρει οικονομικό αποτέλεσμα 1,9 τρισεκατομμυρίων δολαρίων και δημιουργία αγοράς 300 δισεκατομμυρίων δολαρίων[5] . Η ανάπτυξη της τεχνολογίας του IoT συμβάλλει στη βελτίωση της ζωής του ανθρώπου και αυξάνει την ανταγωνιστικότητα, αλλά ταυτόχρονα μπορεί να αυξήσει και τις απειλές για την ασφάλεια της έκθεσης στην τεχνολογία IP [6].

1.2 Σκοπός της Εργασίας

Το τελευταίο χρονικό διάστημα, έχουν αναπτυχθεί ιδιαιτέρως, τα δίκτυα με μη κεντρική διαχείριση. Έτσι, η γενικότερη λειτουργία αυτών των δικτύων και οι απαραίτητες ρυθμίσεις τους απαιτείται να είναι κατανοητές. Το πλαίσιο ενέργειας όμως καθώς και εκείνου της ισχύος του κάθε κόμβου, είναι αρκετά ασφυκτικό. Σήμερα, τα ασύρματα δίκτυα χρειάζεται να έχουν μη κεντροποιημένη λειτουργία και η ρύθμιση των παραμέτρων τους να γίνεται αυτόματα.

Η Θεωρία Παιγνίων, εξετάζει την επίδραση μεταξύ πρακτόρων οι οποίοι, αποφασίζουν μόνοι τους. Ακριβώς, αυτό το σημείο, καθιστά πρακτικά πολύ χρήσιμη την εφαρμογή τους στα ασύρματα δίκτυα. Στα ασύρματα δίκτυα, ο κάθε κόμβος παίρνει αποφάσεις στηριζόμενος σε ένα πρωτόκολλο και σε πληροφορίες που αντλεί μέσω της αλληλεπίδρασης του με άλλους κόμβους. Ο στόχος κάθε κόμβου είναι σε συνάρτηση με το είδος του και το ρόλο του και παρόλο που τις περισσότερες φορές, ο κάθε κόμβος έχει ως στόχο, το καλύτερο δυνατό για το σύνολο του δικτύου, δεν λείπουν οι περιπτώσεις που λειτουργεί για την πλήρη ικανοποίηση του χρήστη στον οποίο αντιστοιχεί. Επιπλέον, δεν λείπουν οι περιπτώσεις κατά τις οποίες η μη συνεργατική συμπεριφορά ενός κόμβου οδηγεί στην μείωση της απόδοσης των άλλων κόμβων.

Υπάρχει βέβαια, και η περίπτωση που οι στόχοι είναι κοινοί, ακόμη και εδώ όμως, ο κάθε κόμβος απαιτεί πόρους του συστήματος εξετάζοντας την κατάσταση του δικτύου από τη δική του πλευρά, με αποτέλεσμα τη δημιουργία των συγκρούσεων. Για να δημιουργηθεί το κατάλληλο παίγνιο, απαιτείται μεγάλη προσοχή στις ρυθμίσεις του κάθε κόμβου, όπως για παράδειγμα, στην επιλογή των παιχτών, στην επιλογή των αποφάσεών τους, στην επιλογή των στόχων τους, στη μοναδικότητα ή στη μη μοναδικότητα του παιγνίου.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εστιάζει, στα μη και στα συνεργατικά παίγνια, κατά τα οποία, ο εκάστοτε χρήστης, κάνει επιλογή της πιο καλής απόφασης με βάση το κοινό καλό, με τρόπο ανεξάρτητο, διότι όπως είναι ήδη γνωστό, στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, οι χρήστες δύναται να αποφασίζουν για την δρομολόγηση, για την ποσότητα των πόρων που θέλουν να έχουν, αλλά και για την ποιότητα των υπηρεσιών. Ακόμη, μπορεί να καθορίζουν τον τύπο των πόρων και την απόδοση επιλέγοντας συγκεκριμένες παραμέτρους, διότι διαφοροποιημένα σύνολα παραμέτρων, ενδέχεται να ωφελούν τις ανάγκες ενός μόνο χρήστη. Είναι εμφανές όμως ότι, η απόδοση είναι το αποτέλεσμα του συνόλου των επιλογών όλων των χρηστών του δικτύου και ακριβώς αυτός ο συνδυασμός ή αυτή η εξάρτηση ονομάζεται συνάρτηση της κατάστασης του δικτύου.

Η Θεωρία Παιγνίων, δίνει το μαθηματικό υπόβαθρο για την ανάλυση διαδραστικών διαδικασιών λήψης αποφάσεων. Δίνει, εκείνους τους τρόπους με τους οποίους μπορούμε να προβλέψουμε, με στοχαστικές συναρτήσεις, το αποτέλεσμα που θα έχει η ανεξάρτητη δράση χρηστών με συμφέροντα που συγκρούονται μεταξύ τους, αλλά και να προβλέψουμε και ποιες είναι οι επιλογές που χρειάζεται να ληφθούν για να επιτευχθεί ο καλύτερος σχεδιασμός και η πιο καλή οργάνωση του δικτύου. Τα βασικά στοιχεία του παιγνίου είναι τα σύνολα των παικτών, των διαδικασιών, και των επιλογών.

Οι παίκτες στη Θεωρία Παιγνίων είναι αυτοί που αποφασίζουν και στα ασύρματα δίκτυα αντιστοιχούν στους κόμβους δικτύου. Οι διαδικασίες είναι οι επιλογές του κάθε παίκτη και στα δυναμικά παίγνια μπορεί να διαφοροποιούνται κάθε στιγμή. Στα ασύρματα δίκτυα, οι επιλογές μπορεί να σχετίζονται με την τάξη διαμόρφωσης, με την κωδικοποίηση και πιο συγκεκριμένα με τον ρυθμό της, με τα πρωτόκολλα ή και με άλλους παράγοντες που είναι κάτω από τον έλεγχο των εκάστοτε κόμβων. Όταν οι παίκτες πραγματοποιούν τις επιλογές τους, το δίκτυο χαρακτηρίζεται από ένα πλαίσιο επιλογών και μία τελική κατάσταση. Η σχέση των επιλογών των παικτών με τα διαφορετικά αποτελέσματα σχετίζεται με την αξιολόγηση του παίκτη για κάθε δυνατό αποτέλεσμα. Αυτή η συσχέτιση αντιπροσωπεύεται με μια συνάρτηση χρησιμότητας (utility function), κατά την οποία μία τιμή αντιστοιχεί σε κάθε αποτέλεσμα, με τα πιο καλά αποτελέσματα να αντιστοιχίζονται και υψηλότερες τιμές. Στα ασύρματα δίκτυα, οι παίκτες επιλέγουν αποτελέσματα με καλύτερη αναλογία σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio), χαμηλότερο ρυθμό σφαλμάτων bit, καλύτερη διασύνδεση κόμβων και

μικρότερη κατανάλωση ενέργειας μεταξύ άλλων. Ωστόσο, τις περισσότερες φορές, οι απαιτήσεις αυτές οδηγούν σε κατάσταση σύγκρουσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 5G

2.1 Ανάλυση των δικτύων 5G

Τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα έχουν γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας. Καθώς όλο και περισσότερες συσκευές που χρησιμοποιούμε στην καθημερινότητα μας απαιτούν πρόσβαση στο Διαδίκτυο, π.χ. έξυπνα ρολόγια (smartwatches), λάμπες φωτισμού, home assistants αυξάνεται ο όγκος των δεδομένων που πρέπει να δρομολογηθεί από τα ασύρματα δίκτυα. Η ικανοποίηση των αυξημένων αναγκών των χρηστών που προέρχονται από τον μεγάλο όγκο συσκευών θα ικανοποιηθεί με την ολοκλήρωση της υλοποίησης των δικτύων 5G. Τα δίκτυα 5G θα βελτιώσουν την καθημερινότητα μας και θα προσφέρουν πληθώρα επιπλέον δυνατοτήτων σε ένα μεγάλο εύρος τομέων της παραγωγής [7].

Βιομηχανία	Βελτιωμένη ευρυζωνική σύνδεση κινητής	Μαζικό διαδίκτυο των πραγμάτων	Υπηρεσίες κρίσιμης σημασίας	Απόδοση με 5G (2016, \$,M)	% απόδοση της βιομηχανίας
Δασοκομία και αλιεία	4	4	5	510	6,4
Τέχνες και ψυχαγωγία	5	0	3	65	3,5
Κατασκευές	3	4	4	742	4,7
Εκπαίδευση	5	0	0	277	3,5

Οικονομία και ασφάλεια	4	2	5	676	4,6
Υγεία και κοινωνική εργασία	4	3	5	119	2,3
Νοσοκομειακά	4	3	0	562	4,9
Πληροφορική και επικοινωνίες	5	4	4	1421	11,5
Κατασκευές	5	5	4	3364	4,2
Εξόρυξη και λατόμηση	4	5	4	249	4,1
Επαγγελματικές υπηρεσίες	5	0	0	623	3,7
Δημόσιες υπηρεσίες	4	5	4	1066	6,5
Δραστηριότητες ακίνητης περιουσίας	3	4	2	400	2,4
Αποθήκευση και μεταφορά	3	5	5	659	5,6
Βοηθητικά προγράμματα	3	4	3	273	4,5
Λιανική και χονδρική	4	5	3	1295	3,4
Όλοι οι τομείς της βιομηχανίας	4.400\$	3.600 \$	4.300	12.300	4,6

Πίνακας 1 Επιρροή του ασύρματου δικτύου 5G σε διάφορους τομείς της κοινωνίας και τα έσοδα που σημειώθηκαν το 2016. (το μηδέν αντιστοιχεί σε μηδενικό αντίκτυπο και το 5 σε υψηλό αντίκτυπο)

Στον Πίνακα 1, καταγράφεται το πόσο επηρεάζονται διαφορετικοί τομείς της κοινωνίας και της οικονομίας από τα ασύρματα δίκτυα 5G καθώς και τα κέρδη που απεκόμισαν το 2016 από την ανάπτυξη των δικτύων. Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι, τα ασύρματα δίκτυα έχουν επηρεάσει θετικά διάφορους τομείς σε τέτοιο βαθμό που

μπορεί να μη γίνεται αντιληπτός από τη καθημερινή χρήση του. Πιο συγκεκριμένα, οι τρεις πρώτοι τομείς αναφορικά με τα ποσοστιαία κέρδη που παρουσίασαν για το 2016 ήταν κατά σειρά οι τομείς της πληροφορικής και των επικοινωνιών, οι δημόσιες υπηρεσίες, η δασοκομία και η αλιεία. Το γεγονός ότι το μεγαλύτερο ποσοστό επιρροής εμφανίζεται στον τομέα της πληροφορικής και των επικοινωνιών, δεν προξενεί εντύπωση, καθώς είναι προφανές ότι γίνεται εκτεταμένη χρήση των δικτύων 5G. Παρ' όλα αυτά, άξιο αναφοράς είναι ότι, μεγάλα ποσοστιαία κέρδη εμφανίζουν και τομείς που πιθανόν να μην ήταν αναμενόμενο, όπως η δασοκομία και η αλιεία. Αυτό το γεγονός υποδεικνύει ότι από τα ασύρματα δίκτυα 5G μπορούν να ωφεληθούν όλοι οι τομείς αν αυτά ενσωματωθούν με τον κατάλληλο τρόπο. Τα χαμηλότερα ποσοστά κερδών εμφανίζονται στην υγεία και την κοινωνική εργασία[8] , με τη δυναμική της ηλεκτρονικής υγείας παρόλα ταύτα να είναι πολύ μεγάλη.

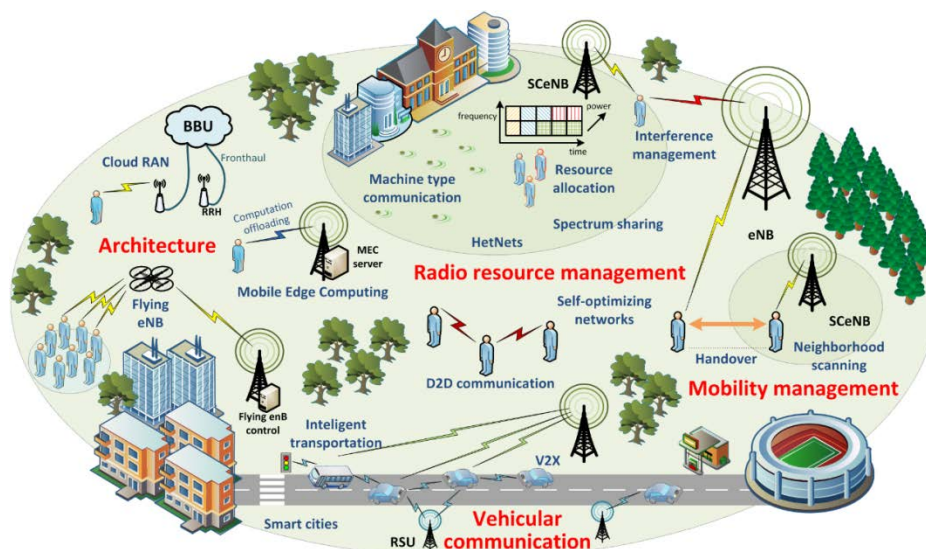
Το 5G δίκτυο, αποσκοπεί στη βελτίωση της επικοινωνίας μέσω της αύξησης της ταχύτητας μετάδοσης στο επίπεδο των 10Gbps, την υποστήριξη μεγαλύτερου αριθμού συσκευών έως και ένα εκατομμύριο σε ένα τετραγωνικό χιλιόμετρο και την μείωση των καθυστερήσεων σε λιγότερο από 1ms [9] . Με την είσοδο αυτών των χαρακτηριστικών και των εφαρμογών που θα δημιουργηθούν για την αξιοποίηση των δυνατοτήτων του 5G δικτύου, θα επέλθουν σημαντικές αλλαγές στον τρόπο λειτουργίας των μελλοντικών κοινωνιών.

2.2 Τεχνολογίες 5G

Υπάρχουν πολλές διαφορές μεταξύ των συστημάτων 4G/Long-Term Evolution (LTE) και 5G, μερικές από τις οποίες περιγράφονται στην συνέχεια, με τα 5G δίκτυα να στοχεύουν σε βελτιωμένη ποιότητα εμπειρίας χρήστη, επεκτείνοντας τα δίκτυα 4G. Κάποιοι από τους παράγοντες που καθορίζουν την εμπειρία χρήστη είναι η ευκολία σύνδεσης με γειτονικές συσκευές, καθώς και η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης της συσκευής του.

Μια βασική διαφορά μεταξύ των συστημάτων που χρησιμοποιούν τα δίκτυα 4G και 5G είναι ο τρόπος διαχείρισης της ετερογένειας του δικτύου (heterogeneous networks). Γενικά, ως ετερογένεια ορίζεται, η δυνατότητα δημιουργίας ενός δικτύου με χρήση πολλών και διαφορετικών ειδών κόμβων. Ένα ασύρματο δίκτυο μπορεί να αποτελείται από μακρο-κυψέλες, μικρο-κυψέλες, πίκo-κυψέλες, ή και φέμτο-κυψέλες, ούτως ώστε να προσφέρει ασύρματη κάλυψη σε ένα περιβάλλον με μεγάλη ποικιλία ασύρματων

ζωνών, όπως είναι οι υπαίθριοι χώροι, τα γραφεία ενός κτηρίου, το εσωτερικό των σπιτιών, υπόγειοι χώροι, κ.ά. Συγκεκριμένα, στα δίκτυα 5G, η δομή του ετερογενούς δικτύου αποτελείται από σαφώς λιγότερες μάκρο-κυψέλες οι οποίες ελέγχουν άλλα είδη κυψελών. Οι μάκρο-κυψέλες θα λειτουργούν ως σταθμοί βάσης και τα άλλα είδη κυψελών είναι αυτά που θα παρέχουν κυρίως κάλυψη στους χρήστες (εικόνα 1).



Εικόνα 1 Ετερογένεια Δικτύου 5G (Πηγή: <http://5gmobile.fel.cvut.cz/activities/>)

Τα διαφορετικά αυτά είδη κυψελών δίνουν τη δυνατότητα καλύτερης δικτυακής απόδοσης μέσω της αξιοποίησης διαφορετικών συχνοτήτων. Αυτές οι μπάντες χωρίζονται στις μπάντες με «εξουσιοδότηση» (licensed), π.χ. LTE και σε αυτές χωρίς «εξουσιοδότηση» (unlicensed), π.χ. Wi-Fi. Παράλληλα, με τη χρήση αυτών των συχνοτήτων θα χρησιμοποιηθεί και ένα νέο φάσμα υψηλότερων συχνοτήτων, αυτό του χιλιοστομετρικού μήκους κύματος (mmWave). Αυτό το νέο φάσμα θα χρησιμοποιηθεί με σκοπό την εξυπηρέτηση υπηρεσιών με πολύ μεγάλο ρυθμό μετάδοσης (ultra-high-data-rates) [10] .

Στο νέο τοπίο των δικτύων 5G, οι ίδιες οι συσκευές των χρηστών θα διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στην λειτουργία του δικτύου. Η επικοινωνία συσκευής με συσκευή (device-to-device communication-D2D) θα αποτελέσει τη νέα βάση στη δομή του δικτύου, μια βάση όμως χαμηλού κόστους, που θα βοηθήσει τόσο στη γεωγραφική κάλυψη όσο στη χωρητικότητά του. Μια νέα τεχνολογία που θα εφαρμοστεί στα δίκτυα 5G είναι η υποστήριξη πολλαπλών τεχνολογιών ασύρματης μετάδοσης (Multi Radio Access Technology-RAT). Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει το δίκτυο να διαθέτει

αρχιτεκτονική «end-to-end» η οποία να υποστηρίζει τόσο τις εκδόσεις των πρωτοκόλλων LTE όσο και την οικογένεια των πρωτοκόλλων 802.11, δημιουργώντας ένα ενιαίο εικονικό ασύρματο δίκτυο πρόσβασης (Radio Access Network–RAN).

Η διαχείριση αυτών των πολλαπλών δικτύων πραγματοποιείται από ένα εικονικό ασύρματο δίκτυο το οποίο διαμοιράζει τους πόρους στις διαφορετικού είδους κυψέλες με στόχο, την βελτίωση της χωρητικότητας, την αύξηση της γεωγραφικής κάλυψης και της εμβέλειας. Με την αύξηση του αριθμού των κυψελών, τα δίκτυα 5G θα πρέπει να διαχειριστούν τις παρεμβολές που δημιουργούνται. Ο τρόπος με τον οποίο θα διαχειριστούν τις παρεμβολές αυτές είναι με τη «συνεργασία» των εμπλεκόμενων κόμβων του δικτύου, τόσο σε επίπεδο μικρο-κυψέλης όσο και σε επίπεδο χρήστη.

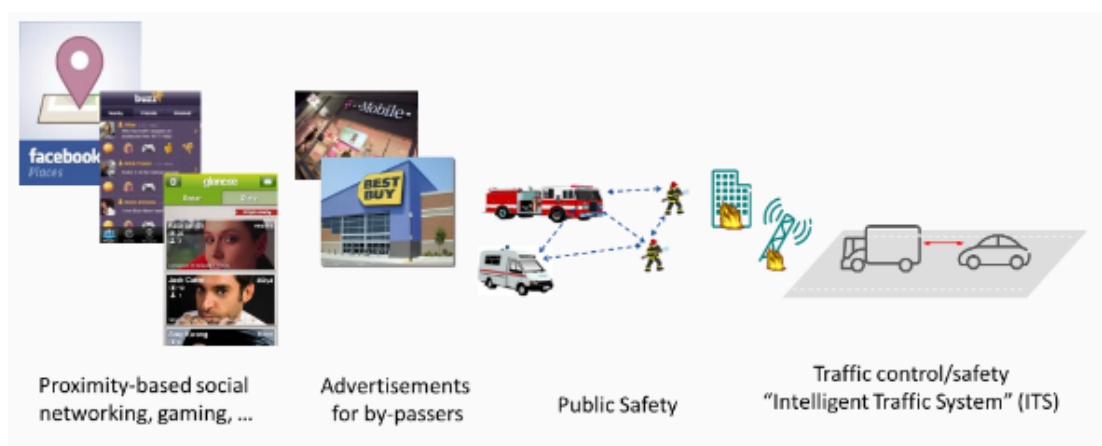
Η συνεργασία του πυκνού δικτύου μικροκυψελών με τις συσκευές των χρηστών που βρίσκονται στα άκρα μιας κυψέλης θα οδηγήσει στη λύση του προβλήματος. Αντιμετωπίζοντας λοιπόν αυτές τις παρεμβολές θα δημιουργηθεί ένα ομοιόμορφο δίκτυο (edgeless) για τους χρήστες. Επιπλέον, μια ακόμα σημαντική διαφορά των δικτύων 5G και 4G είναι η δυνατότητα ταυτόχρονης αποστολής και λήψης (Simultaneous Transmission and Reception–STR). Με τη συγκεκριμένη τεχνική πραγματοποιείται ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη δεδομένων στις ίδιες συχνότητες και στον ίδιο χρόνο. Η τεχνική αυτή είναι πολύ σημαντική για την ενσωμάτωση των Wi-Fi δικτύων αλλά και της D2D επικοινωνίας στο δίκτυο 5G, καθώς βοηθάει στην «ανίχνευση» των γειτονικών συσκευών και κόμβων (device and node discovery).

Τέλος, στα δίκτυα 5G, οι συσκευές θα πρέπει αυτόματα να αναγνωρίζουν τα χαρακτηριστικά των παρεμβολών και να εφαρμόζουν τους κατάλληλους αλγόριθμους εξομάλυνσης ανάλογα με το είδος της παρεμβολής. Για παράδειγμα, θα πρέπει να μπορούν να εξομαλύνουν τις παρεμβολές που δημιουργούνται στην συχνότητα που χρησιμοποιούν από τις γειτονικές κυψέλες, καθώς και παρεμβολές από γειτονικές συσκευές, ενώ μεγάλο θα είναι και το πρόβλημα της αυτό-παρεμβολής (self-interference) στις μεταδόσεις πλήρους διπλεξίας (full-duplex–FD). Ειδικά για την τελευταία περίπτωση παρεμβολής θα χρησιμοποιηθούν εξελιγμένες τεχνικές ακύρωσης των παρεμβολών (self-interference cancelation) [11] .

2.3.1 Επικοινωνίες D2D

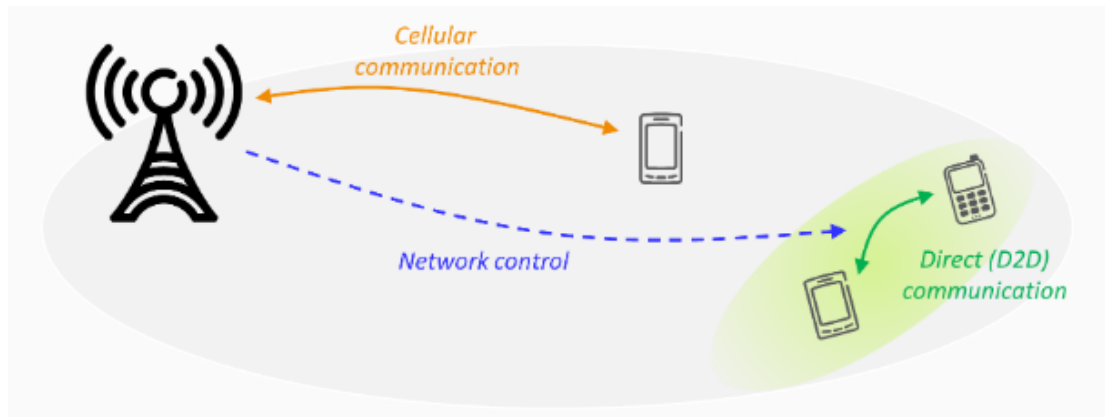
Η τεχνολογία D2D που παρουσιάζεται στην εικόνα 2, καθορίζεται από την 3GPP στην έκδοση LTE Rel-12. Το D2D αναγνωρίζεται επίσης ως ένα από τα τεχνολογικά

συστατικά της εξελισσόμενης αρχιτεκτονικής 5G. Η επικοινωνία D2D αναφέρεται σε τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης που επιτρέπει στις συσκευές να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους, δηλαδή χωρίς δρομολόγηση των διαδρομών δεδομένων μέσω υποδομής δικτύου. Τα πιθανά σενάρια εφαρμογής περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων υπηρεσίες βασισμένες στην εγγύτητα, όπου συσκευές εντοπίζουν την εγγύτητά τους και στη συνέχεια ενεργοποιούν διαφορετικές υπηρεσίες (όπως κοινωνικές εφαρμογές που προκαλούνται από την εγγύτητα του χρήστη, διαφημίσεις, τοπική ανταλλαγή πληροφοριών, έξυπνη επικοινωνία μεταξύ οχημάτων κλπ.). Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν υποστήριξη δημόσιας ασφάλειας, όπου οι συσκευές παρέχουν τουλάχιστον τοπική συνδεσιμότητα ακόμη και σε περίπτωση βλάβης της ράδιο-δικτυακής υποδομής [12] .



Εικόνα 2 Παράδειγμα Σεναρίων Εφαρμογής Για D2D(Πηγή:[12])

Με την D2D επικοινωνία οι τελικοί χρήστες θα μπορούν να επωφεληθούν από ορισμένες υπηρεσίες που σήμερα δεν είναι εφικτές, όπως η επικοινωνία δημόσιας ασφάλειας σε περίπτωση βλάβης της υποδομής καθώς και επικοινωνίες κοντινής περιοχής. Στο μέλλον, η D2D επικοινωνία θα επιτρέψει μειωμένη καθυστέρηση επικοινωνίας, μετάδοση αυξημένου ρυθμού και μειωμένη κατανάλωσης ενέργειας, εικόνα 3. Η επικοινωνία D2D συνεπάγεται νέες προκλήσεις για το σχεδιασμό των συσκευών, τη διαχείριση παρεμβολών, την ασφάλεια, τη διαχείριση της κινητικότητας και άλλες πτυχές. Επιπλέον, η επιτυχία αυτής της τεχνολογίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα σενάρια στα οποία επικοινωνούν οι χρήστες βρισκόμενοι σε εγγύτητα μεταξύ τους, καθώς και τις εφαρμογές που θα αναπτυχθούν τα επόμενα χρόνια [13].



Εικόνα 1 Η συσκευή προς συσκευή και οι κυψελοειδείς επικοινωνίες μοιράζονται τους ίδιους ραδιοφωνικούς πόρους. Το δίκτυο ελέγχει και βελτιστοποιεί τη χρήση των πόρων τόσο για την κυψελωτή επικοινωνία όσο και για το D2D, με αποτέλεσμα την αυξημένη απόδοση και την ποιότητα της υπηρεσίας(Πηγή:[13])

Η τεχνολογία D2D προσδιορίζεται στην έκδοση 3GPP LTE Rel-12 εστιάζει στις εφαρμογές Δημόσιας Ασφάλειας και στις υπηρεσίες που βασίζονται στην εγγύτητα (proximity services), όπως ο εντοπισμός συσκευών για το σχηματισμό ομάδας κόμβων επικοινωνίας.

2.3.2 M2M

Η συνδεσιμότητα 5G δεν θα επηρεάσει μόνο τον τομέα των smartphones. Οι IoT και Machine-to-Machine(M2M) αναμένεται να γνωρίσουν σημαντική ανάπτυξη ξεπερνώντας τις περιορισμένες δυνατότητες στους τομείς της καθυστέρησης και της ταχύτητας λήψης των 4G δικτύων. Όσο περισσότερες συσκευές συνδέονται σε ένα δίκτυο και επικοινωνούν μεταξύ τους, τόσο μεγαλύτερος είναι ο σωρευτικός αντίκτυπος αστοχιών και αναποτελεσματικότητας του δικτύου. Συνεπώς, το 5G δίκτυο έχει ρυθμιστεί για να εγγυηθεί καθυστέρηση της τάξης του 1ms και αξιοπιστία στις μεταδόσεις IoT και M2M.

Από επιχειρηματικής άποψης, υπάρχει ήδη ζήτηση από τους χρήστες ώστε οι εταιρείες να υιοθετήσουν την τεχνολογία IoT και M2M στις προσφορές προϊόντων και υπηρεσιών τους. Με τη συνδεσιμότητα 5G θα είναι σε θέση να το κάνουν με πολύ μεγαλύτερη αποδοτικότητα και αξιοπιστία. Μια άλλη απαίτηση της σύνδεσης 5G περιλαμβάνει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας για το είδος των συσκευών που χρησιμοποιούνται στο M2M. Συγκεκριμένα, συσκευές χαμηλής ισχύος, τύπου μηχανής,

πρέπει να διαθέτουν μπαταρία που μπορεί να διαρκέσει τουλάχιστον δέκα χρόνια. Η εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και η μακροπρόθεσμη αξιοπιστία είναι απαραίτητες για την ευρεία εφαρμογή της τεχνολογίας M2M σε όλους τους κλάδους. Η σύνδεση μηχανημάτων και εξοπλισμού με μεγάλα βιομηχανικά δίκτυα θα είναι σύντομα πολύ πιο εύκολη, φθηνότερη και θα έχει μεγαλύτερα αποτελέσματα από ποτέ αξιοποιώντας τα δίκτυα 5G [14].

2.3.3 Interference management

Το εξαιρετικά πυκνό ετερογενές δίκτυο (HetNet), το οποίο αποτελείται από μακρο-κυψέλες και πίκτο-κυψέλες, έχει αναγνωριστεί ως βασική τεχνική για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Ωστόσο, ο αυξανόμενος αριθμός πίκτο-κυψέλων προκαλεί επίσης σοβαρές παρεμβολές, συμπεριλαμβανομένης της παρεμβολής μεταξύ των κυττάρων και της ενδοκυτταρικής παρεμβολής. Ως εκ τούτου, η διαχείριση παρεμβολών αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα σε εξαιρετικά πυκνά HetNets και το ενισχυμένο σύστημα συντονισμού παρεμβολών μεταξύ κυψελών (eICIC) δεν είναι πλέον κατάλληλο για την υψηλή πυκνότητα των μικρών κυψελών [15]. Αξιοσημείωτες είναι οι τεχνικές που αναπτύσσονται για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων όπως, ο συνδυασμός φάσματος με κοινή χρήση ράδιο-φάσματος, περισσότερα small cells και αυξημένη φασματική απόδοση.

2.3.4 V2V

Η vehicle-to-vehicle (V2V) επικοινωνία είναι μια τεχνολογία οχημάτων που έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει τη μεταξύ τους επικοινωνία. Το V2V σύστημα βρίσκεται σήμερα σε ενεργό ανάπτυξη από διάφορες αυτοκινητοβιομηχανίες. Πρόκειται για μια παραλλαγή των κινητών ad-hoc δικτύων (mobile ad hoc networks–MANETs). Το 2001 αναφέρθηκε ότι δίκτυα ad hoc μπορούν να σχηματιστούν από αυτοκίνητα όντας σε θέση να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση τυφλών σημείων, στην αποφυγή ατυχημάτων κ.λπ. [16]. Με τα χρόνια, πραγματοποιήθηκαν σημαντικές έρευνες και έργα σε αυτόν τον τομέα, εφαρμόζοντας V2V για ποικίλες εφαρμογές, από την ασφάλεια έως την πλοήγηση και την επιβολή του νόμου.

Αναφορικά με την ασφάλεια των δικτύων V2V, η υποδομή δημόσιου κλειδιού (public key infrastructure-PKI) εφαρμόζεται σήμερα στις επικοινωνίες V2V. Το

V2V κινδυνεύει από την καλωδιακή τηλεόραση και άλλες τεχνολογίες που θέλουν να αφαιρέσουν ένα μεγάλο κομμάτι του φάσματος ράδιο-συχνοτήτων που προορίζεται για το σκοπό αυτό και να χρησιμοποιούν αυτές τις συχνότητες για υπηρεσίες Internet υψηλής ταχύτητας. Στις ΗΠΑ, το σημερινό μερίδιο του V2V στο ράδιο-φάσμα αφαιρέθηκε από την κυβέρνηση το 1999, αλλά δεν έχει χρησιμοποιηθεί. Επιπλέον, η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (Federal-Communications-Commission-FCC) απέσπασε μέρος του φάσματος από τις εταιρείες τεχνολογίας, με το Εθνικό Συμβούλιο Ασφάλειας των Μεταφορών να υποστηρίζει τη θέση της αυτοκινητοβιομηχανίας. Οι πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου που επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν το φάσμα ισχυρίζονται ότι τα αυτόνομα αυτοκίνητα θα καταστήσουν την επικοινωνία V2V περιττή. Η αμερικανική αυτοκινητοβιομηχανία δήλωσε ότι είναι διατεθειμένη να μοιραστεί το φάσμα εάν η υπηρεσία V2V δεν επιβραδυνθεί ή διακοπεί και έτσι, η FCC σκοπεύει να δοκιμάσει διάφορα προγράμματα κοινής χρήσης [17] .

Με κυβερνήσεις σε διαφορετικές χώρες που υποστηρίζουν διαφορετικό φάσμα επικοινωνίας V2V, οι κατασκευαστές οχημάτων ενδέχεται να αποθαρρυνθούν να υιοθετήσουν την τεχνολογία σε ορισμένες αγορές. Στην Αυστραλία για παράδειγμα, δεν υπάρχει φάσμα αποκλειστικά για την επικοινωνία V2V επομένως, τα οχήματα θα υποφέρουν από παρεμβολές από άλλα ράδιο-δίκτυα. Η κατάσταση αναφορικά με το φάσμα που είναι δεσμευμένο για τις επικοινωνίες V2V σε διάφορες περιοχές περιλαμβάνεται στον πίνακα 2 [18] .

Περιοχή	Περιοχή φάσματος V2V
ΗΠΑ	5.855-5.905 GHz
Ευρώπη	5.855-5.925 GHz
Ιαπωνία	5.770-5.850 GHz. 715-725 MHz

Αυστραλία	5.855-5.925 GHz
------------------	------------------------

Πίνακας 2 Περιοχές και αντίστοιχα φάσματα

2.3.5 C-Ran

Το C-RAN(Cloud-RAN), που μερικές φορές αναφέρεται ως Centralized-RAN, είναι μια προτεινόμενη αρχιτεκτονική για μελλοντικά κυψελωτά δίκτυα. Εισήχθη για πρώτη φορά από το Ινστιτούτο Κινητών Ερευνών της Κίνας τον Απρίλιο του 2010 στο Πεκίνο 9 χρόνια μετά την κοινοποίησή της στις αιτήσεις για διπλώματα ευρεσιτεχνίας που κατατέθηκαν από αμερικανικές εταιρείες. Πιο συγκεκριμένα, το C-RAN είναι μια κεντριοποιημένη αρχιτεκτονική που βασίζεται σε υπολογιστικά cloud για δίκτυα ασύρματης πρόσβασης που υποστηρίζουν 2G, 3G, 4G και μελλοντικά πρότυπα ασύρματης επικοινωνίας. Το όνομά του προέρχεται από τα τέσσερα «C» στα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος C-RAN, «Clean, Centralized processing, Collaborative radio και ένα δίκτυο Cloud Radio Access σε πραγματικό χρόνο». Τα παραδοσιακά κυψελωτά ή τα δίκτυα πρόσβασης ράδιο-συχνοτήτων (RAN), αποτελούνται από πολλούς BS. Κάθε BS καλύπτει μια μικρή περιοχή, ενώ μια ομάδα BS παρέχει κάλυψη σε μια συνεχή περιοχή. Κάθε BS επεξεργάζεται και μεταδίδει το δικό του σήμα προς και από το κινητό τερματικό και προωθεί το ωφέλιμο φορτίο δεδομένων προς και από το κινητό τερματικό και κατευθύνεται στο κεντρικό δίκτυο μέσω του backhaul. Λόγω περιορισμένων φασματικών πόρων, οι πάροχοι δικτύων επαναχρησιμοποιούν τη συχνότητα μεταξύ διαφορετικών σταθμών βάσης, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές μεταξύ γειτονικών κυψελών [19].

Το σήμα RF παράγεται από τη μονάδα RF του BS και διαδίδεται μέσω ζευγών καλωδίων RF μέχρι τις κεραίες στην κορυφή ενός πύργου BS ή σε άλλα σημεία τοποθέτησης. Αυτή η ενοποιημένη αρχιτεκτονική βρισκόταν ως επί το πλείστον σε εφαρμογές μακροεντολών. Ένα σύστημα αμφίδρομης επικοινωνίας είναι ένα σύστημα από σημείο σε σημείο αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα συνδεδεμένα μέρη ή συσκευές που μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους και προς τις δύο κατευθύνσεις. Τα δίκτυα διπλής κατεύθυνσης χρησιμοποιούνται σε πολλά δίκτυα επικοινωνιών είτε για να επιτρέπουν ταυτόχρονη επικοινωνία και προς τις δύο κατευθύνσεις μεταξύ δύο συνδεδεμένων

μερών είτε για να παρέχουν μια αντίστροφη πορεία για την παρακολούθηση και απομακρυσμένη προσαρμογή του εξοπλισμού στο πεδίο. Υπάρχουν δύο τύποι συστημάτων αμφίδρομης επικοινωνίας: πλήρες αμφίδρομο (FDX) και ήμι-αμφίδρομο (HDX) [20] .

2.3.6 Full duplex-Half duplex

Σε ένα σύστημα πλήρους αμφίδρομης επικοινωνίας, αμφότερα τα μέρη μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους ταυτόχρονα. Ένα παράδειγμα συσκευής πλήρους διπλής κατεύθυνσης είναι ένα τηλέφωνο. Τα μέρη και στα δύο άκρα μιας κλήσης μπορούν να μιλήσουν και να ακουστούν από το άλλο μέρος ταυτόχρονα. Το ακουστικό αναπαράγει την ομιλία του απομακρυσμένου κόμματος καθώς το μικρόφωνο εκπέμπει την ομιλία του τοπικού κόμματος, διότι υπάρχει μεταξύ τους ένας αμφίδρομος διάυλος επικοινωνίας ή αυστηρότερα, επειδή υπάρχουν δύο κανάλια επικοινωνίας μεταξύ τους. Σε ένα σύστημα ημί-διπλεξίας, αμφότερα τα μέρη μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους, αλλά όχι ταυτόχρονα. Η επικοινωνία γίνεται προς μια κατεύθυνση κάθε φορά. Ένα παράδειγμα ημι-αμφίδρομης συσκευής είναι ένα ασύρματο ραδιόφωνο δύο δρόμων που έχει ένα κουμπί «push-to-talk». Όταν ο τοπικός χρήστης θέλει να μιλήσει με το απομακρυσμένο άτομο, πιέζει αυτό το κουμπί, το οποίο ενεργοποιεί τον πομπό αλλά σβήνει τον δέκτη, ώστε να μην ακούει το απομακρυσμένο άτομο. Για να ακούσει το άλλο άτομο απελευθερώνει το κουμπί, το οποίο ενεργοποιεί τον δέκτη αλλά απενεργοποιεί τον πομπό [21] .

Το 5G δίκτυο αναμένεται να προσφέρει πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα και καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας σε σύγκριση το τρέχον δίκτυο 4G. Επαναστατικές τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των πλήρων αμφίδρομων (FD), αναμένεται να ενσωματωθούν με υπάρχοντα και εξελισσόμενα συστήματα, π.χ. LTE-A και WiFi, για να βελτιώσουν την απόδοση των σημερινών συστημάτων και να ανταποκριθούν τις νέες απαιτήσεις για δίκτυα 5G. Η τεχνολογία FD υποστηρίζει την ίδια μετάδοση και λήψη της χρονικής συχνότητας της πηγής και μπορεί δυνητικά να διπλασιάσει το φάσμα και την αποτελεσματικότητα σε σύγκριση με την τεχνολογία (HD).

2.4 Εφαρμογές της τεχνολογίας 5G

Οι ερευνητές προβλέπουν τον παγκόσμιο, κοινωνικό και οικονομικό αντίκτυπο του 5G που θα ωφελήσει ολόκληρες οικονομίες και κοινωνίες, παράγοντας τρισεκατομμύρια αξιόλογων εσόδων τα επόμενα χρόνια.

2.4.1 Εικονική Πραγματικότητα

Η παροχή εφαρμογών εικονικής πραγματικότητας είναι από τους στόχους του δικτύου 5G. Μία τέτοια υλοποίηση πραγματοποιήθηκε στους χειμερινούς Ολυμπιακούς Αγώνες του 2018 από διάφορες εταιρίες οι οποίες τοποθέτησαν κάμερες για την αναμετάδοση των αθλημάτων. Μέσω αυτών των καμερών και της εικονικής πραγματικότητας, παρέχονταν στους χρήστες μια πιο πλήρης εμπειρία των αθλημάτων καθώς και στατιστικά των αθλητών (π.χ. καρδιακοί παλμοί, ταχύτητα) [22].

Πέραν όμως από ψυχαγωγία, η τεχνολογία της εικονικής πραγματικότητας μπορεί να εφαρμοστεί και σε τομείς όπως είναι η υγεία και η εκπαίδευση. Μέσω της εικονικής πραγματικότητας σε συνδυασμό με τις μειωμένες καθυστερήσεις του δικτύου 5G, μπορούν να πραγματοποιηθούν επεμβάσεις σε απομακρυσμένες περιοχές καθώς και εκπαίδευση χειρουργών σε νέες τεχνικές [23].

Από τεχνικής απόψεως, ο χρόνος απόκρισης θα είναι κοντά στο ένα χιλιοστό δευτερολέπτου, η δε αξιοπιστία, αγγίζει το ενενήντα εννέα τοις εκατό, ακόμη η ταχύτητα του είναι 1 gb/s.

2.4.2 Αυτόνομα Οχήματα

Μία επιπλέον εφαρμογή που θα αναπτυχθεί στα πλαίσια του δικτύου 5G είναι τα αυτόνομα οχήματα (self-driving cars). Τα αυτόνομα οχήματα σήμερα χρησιμοποιούν δεδομένα από αισθητήρες και κάμερες τα οποία επεξεργάζονται για την πλοήγηση τους. Καθώς όμως στο μέλλον αναμένεται ότι ο αριθμός τους θα αυξηθεί, απαιτείται ένας τρόπος μεταφοράς των δεδομένων αυτών για την επικοινωνία τους (Internet of Vehicles -IoV). Μέσω του 5G δικτύου θα μεταφέρονται πληροφορίες για το περιβάλλον μηνύματα καθώς και χαρτογράφηση της κυκλοφοριακής συμφόρησης μεταξύ των οχημάτων. Λόγω της μικρής καθυστέρησης η οποία αγγίζει το ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου, που παρέχεται από το 5G δίκτυο, η μεταφορά της πληροφορίας θα γίνεται άμεσα, η δε αξιοπιστία της μετάδοσης των πληροφοριών είναι κοντά στο 99%,

με αποτέλεσμα τα αυτοκίνητα να κινούνται με ασφάλεια και αποδοτικά αναφορικά με τη χρήση καυσίμων [24].

2.4.3 Βιομηχανικές Εφαρμογές

Τέλος, μία εφαρμογή που θα υλοποιηθεί μέσω του δικτύου 5G είναι η επικοινωνία μεταξύ των μηχανημάτων ενός εργοστασίου. Καθώς τα σύγχρονα εργοστάσια σήμερα αποτελούνται κυρίως από μηχανές, μέσω του δικτύου 5G θα υπάρχει η δυνατότητα της επικοινωνίας μεταξύ των μηχανών αλλά και μεταξύ ανθρώπων και μηχανών. Οι χειριστές θα έχουν την ικανότητα να επιβλέπουν την κατάσταση των μηχανών σε πραγματικό χρόνο και να παρέχουν λύσεις σε περιπτώσεις που υπάρξουν δυσλειτουργίες. Το δίκτυο 5G παρέχει την δυνατότητα της υλοποίησης πολλών εφαρμογών οι οποίες έχουν στόχο την βελτίωση της παραγωγικής δραστηριότητας, προλαμβάνοντας και προβλέποντας αστοχίες των μηχανών αλλά και βελτιώνοντας την ποιότητα των αγαθών.

Παρόλα αυτά, η υλοποίησή τους απαιτεί καινοτομίες τόσο σε επίπεδο κατασκευής, σχεδίασης όσο και σε επίπεδο διαδικασιών ελέγχου ποιότητας. Νέες υποδομές επενδύσεις, αλλά και κυβερνητικές πρωτοβουλίες αναφορικά με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια λειτουργίας δικτύων θα πρέπει να τεθούν άμεσα σε ισχύ. Στην έμμεση τεχνολογία των διαδικασιών παραγωγής η οποία διαχειρίζεται την επεξεργασία των πληροφοριών η ενσωμάτωση των 5G θα έχει ρόλο πρωταγωνιστικό, η αύξηση της ταχύτητας της μετάδοσης των πληροφοριών για τον συντονισμό των επιμέρους δραστηριοτήτων των επιχειρήσεων θα έχει πολύ θετικές επιπτώσεις στην παραγωγική διαδικασία. [25] .

2.4.4 Διασκέδαση και πολυμέσα

Το 5G προσφέρει έναν ψηφιακό κόσμο υψηλής ευκρίνειας στο κινητό σας τηλέφωνο. Η υψηλής ταχύτητας ροή βίντεο 4K διαρκεί μόνο λίγα δευτερόλεπτα και μπορεί να υποστηρίξει την καθαρότητα του ήχου. Τα ζωντανά συμβάντα μπορούν να μεταδοθούν μέσω ασύρματου δικτύου με υψηλή ευκρίνεια. Τα τηλεοπτικά κανάλια HD μπορούν να έχουν πρόσβαση σε κινητές συσκευές χωρίς καμία διακοπή. Η βιομηχανία ψυχαγωγίας δύναται να ωφεληθεί σε σημαντικό βαθμό από τα ασύρματα δίκτυα 5G.

Η επαυξημένη πραγματικότητα και η εικονική πραγματικότητα απαιτεί HD βίντεο με χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση. Το δίκτυο 5G είναι αρκετά ισχυρό ώστε να τροφοδοτεί

AR και VR με εκπληκτική εικονική εμπειρία. Οι εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας HD καθίστανται δημοφιλείς και πολλές εταιρείες επενδύουν σε ηλεκτρονικά παιχνίδια με βάση το VR. Το υψηλής ταχύτητας 5G δίκτυο μπορεί να προσφέρει καλύτερη εμπειρία gaming με χαμηλή καθυστέρηση [26] .

2.4.5 Έξυπνο σπίτι

Οι έξυπνες οικιακές συσκευές και προϊόντα καλύπτουν σήμερα την αγορά. Η έξυπνη αρχική ιδέα θα χρησιμοποιεί δίκτυα 5G για τη συνδεσιμότητα των συσκευών και την παρακολούθηση των εφαρμογών. Το ασύρματο δίκτυο 5G θα χρησιμοποιηθεί από έξυπνες συσκευές, οι οποίες μπορούν να διαμορφωθούν και να αποκτήσουν πρόσβαση από απομακρυσμένες τοποθεσίες. Οι κάμερες κλειστού κυκλώματος θα παρέχουν υψηλής ποιότητας βίντεο σε πραγματικό χρόνο για λόγους ασφαλείας [27] .

2.4.6 Έξυπνες πόλεις

Θα είναι εφικτές έξυπνες εφαρμογές της πόλης, όπως η διαχείριση της κυκλοφορίας, η άμεση ενημέρωση καιρού, η τοπική μετάδοση, η ενεργειακή διαχείριση, το έξυπνο ηλεκτρικό δίκτυο, ο έξυπνος φωτισμός δρόμων, η διαχείριση των υδάτινων πόρων, η διαχείριση πλήθους. Η έξυπνη πόλη είναι μια αστική περιοχή στην οποία τόσο οι συνθήκες οικονομικής ανάπτυξης όσο και οι συνθήκες παροχής ποιότητας ζωής είναι σε υψηλό επίπεδο. Στις έξυπνες πόλεις γίνεται η καλύτερη δυνατή χρήση όλων των διασυνδεδεμένων συστημάτων που παράγουν πληροφορίες για να ελέγχονται αλλά και να βελτιώνονται όλες οι δραστηριότητες που έχουν σχέση με την ποιότητα της ζωής των πολιτών τους. Οι έξυπνες πόλεις χρησιμοποιούν την πληροφορική για την καλύτερη αξιοποίηση των υφιστάμενων υποδομών τους με στόχο τις καλύτερες παροχές συνθηκών στους πολίτες τους.

2.4.7 Έξυπνη καλλιέργεια

Η τεχνολογία 5G θα χρησιμοποιηθεί στο μέλλον για τη γεωργία και την έξυπνη γεωργία. Χρησιμοποιώντας έξυπνους αισθητήρες RFID και τεχνολογία GPS, οι αγρότες μπορούν να εντοπίσουν τη θέση των ζώων και να τα διαχειριστούν εύκολα. Οι έξυπνοι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο άρδευσης, έλεγχο πρόσβασης και διαχείριση ενέργειας [28] .

Οι έξυπνες φάρμες διαθέτουν αισθητήρες σε όλα τα στάδια των διαδικασιών καλλιέργειας αλλά, και στο υλικό τμήμα της καλλιέργειας. Η συλλογή πληροφοριών σε συνδυασμό με την αξιοποίηση της τεχνολογίας IoT επιστρέφουν στον αγρότη τις πληροφορίες για περαιτέρω αξιοποίηση τους.

2.4.8 Εφαρμογές κρίσιμης σημασίας (υγεία-διάσωση ατόμων)

Η τεχνολογία 5G θα υποστηρίξει τους ιατρούς στην εκτέλεση προηγμένων ιατρικών διαδικασιών μέσω του αξιόπιστου ασύρματου δικτύου. Οι συνδεδεμένες αίθουσες διδασκαλίας θα βοηθήσουν τους μαθητές να παρακολουθήσουν σεμινάρια και σημαντικούς διδάσκοντες. Τα άτομα με χρόνιες ιατρικές παθήσεις θα επωφεληθούν από τις έξυπνες συσκευές και την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Οι γιατροί μπορούν να συνδεθούν με ασθενείς από οπουδήποτε και ανά πάσα στιγμή και να τους συμβουλευθούν όταν είναι απαραίτητο. Οι επιστήμονες εργάζονται σε έξυπνες ιατρικές συσκευές που μπορούν να εκτελέσουν χειρουργική απομακρυσμένη λειτουργία [29] .

Η βιομηχανία υγειονομικής περίθαλψης πρέπει να ενσωματώσει όλες τις απαραίτητες λειτουργίες με τη χρήση ενός αξιόπιστου δικτύου. Το 5G θα παρέχει στη βιομηχανία υγειονομικής περίθαλψης έξυπνες ιατρικές συσκευές, το Διαδίκτυο των ιατρικών πραγμάτων, έξυπνες αναλύσεις και τεχνολογίες ιατρικής απεικόνισης υψηλής ευκρίνειας. Οι έξυπνες φορητές ιατρικές συσκευές θα παρακολουθούν συνεχώς την κατάσταση του ασθενούς και θα ενεργοποιούν την προειδοποίηση σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Τα νοσοκομεία και οι υπηρεσίες ασθενοφόρων θα λαμβάνουν ειδοποιήσεις κατά τη διάρκεια κρίσιμης κατάστασης και θα μπορούν να κάνουν τα απαραίτητα βήματα για την επιτάχυνση της διάγνωσης και της θεραπείας. Οι ασθενείς με ειδικές ανάγκες θα μπορούν να παρακολουθούνται χρησιμοποιώντας ειδικές ετικέτες και ακριβείς συσκευές εντοπισμού θέσης. Η βάση δεδομένων για την υγειονομική περίθαλψη μπορεί να προσεγγιστεί από οποιεσδήποτε τοποθεσίες, η συλλεγμένη ανάλυση δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έρευνα και τη βελτίωση των θεραπειών.

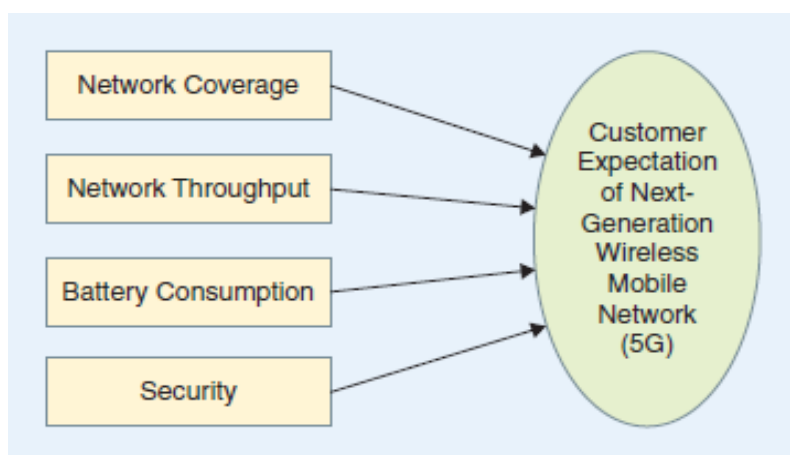
Η ασύρματη τεχνολογία 5G αποτελεί την καλύτερη λύση για την ασφάλεια και την επιτήρηση λόγω του υψηλότερου εύρους ζώνης. Το 5G είναι μία από τις πιο εξελιγμένες ασύρματες τεχνολογίες που έχει αναπτυχθεί μέχρι τώρα και έχει φέρει επανάσταση σε ολόκληρη την περιοχή όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ασύρματο δίκτυο για αποτελεσματική και ασφαλή επικοινωνία [30] .

2.5 Οι προσδοκίες των χρηστών από τα δίκτυα 5G

Ένας σημαντικός παράγοντας στην επιτυχία ενός νέου δικτύου ασύρματων επικοινωνιών, πέρα από τις νέες τεχνολογίες που προσφέρονται, είναι η ικανοποίηση των αναγκών των χρηστών που θα το χρησιμοποιήσουν. Τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να διαθέτει το 5G δίκτυο διαχωρίζονται σε ποιοτικά και ποσοτικά.

Για την εξαγωγή αυτών των πληροφοριών πραγματοποιήθηκε έρευνα από χρήστες που χρησιμοποιούσαν το δίκτυο 4G και από διαφορετικές χώρες [31] . Οι χώρες από τις οποίες επιλέχθηκαν οι χρήστες ήταν η Αμερική, η Αγγλία, η Σιγκαπούρη και η Αυστραλία. Τα ευρήματα από την μελέτη υποδεικνύουν ότι η ταχύτητα και η ασφάλεια του δικτύου επηρεάζουν περισσότερο τις προσδοκίες των πελατών και ακολουθούν η δικτυακή κάλυψη και η κατανάλωση της μπαταρίας των τερματικών των χρηστών, όπως φαίνεται στην εικόνα 4. Ανεξάρτητα από αυτούς τους βασικούς παράγοντες, οι χρήστες προσδοκούν και σε καλύτερη σύνδεση με δίκτυα Wi-Fi, σε χρήση εξελιγμένων συσκευών, στην αύξηση της επεξεργαστικής ισχύς, στην ευκολία χρήσης και τέλος, στη μείωση των καθυστερήσεων στην μετάδοση πληροφορίας μέσα στο δίκτυο.

Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι βασικοί παράγοντες που επιδέχονται βελτίωση σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ερευνών που διεξήχθησαν για την ικανοποίηση των αναγκών των χρηστών στο δίκτυο 5G [32] .



Εικόνα 2 Το ερευνητικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη(Πηγή[5]).

2.5.1 Δικτυακή Κάλυψη

Με τον όρο δικτυακή κάλυψη εννοούμε τη γεωγραφική περιοχή στην οποία, ένας πάροχος ασύρματου δικτύου προσφέρει υπηρεσίες δεδομένων σε κάθε χρήστη με

κινητό τερματικό. Η δικτυακή κάλυψη είναι ένας από τους παράγοντες που χρήζει βελτίωσης. Λόγω του γεγονότος ότι οι χρήστες σήμερα κινούνται διαρκώς με διάφορες ταχύτητες και σε διαφορετικά σημεία, η δικτυακή κάλυψη είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας καθώς απαιτείται απρόσκοπτη συνδεσιμότητα.

Παρά το γεγονός ότι η δικτυακή κάλυψη όλων των διαφορετικών γεωγραφικών περιοχών είναι δύσκολη λόγω των διαφορετικών τοπολογιών και διαφορετικών κλιμάτων, αυτή βελτιώνεται με κάθε νέα γενιά δικτύων [33]. Οι σημερινές προσπάθειες τυποποίησης δικτύων 5G και οι αυστηρές απαιτήσεις κάλυψης και χωρητικότητας που έχουν τεθεί για να παρέχουν απεριόριστη εμπειρία χρήστη υποδηλώνουν επίσης ότι τα μικρά κελιά θα παραμείνουν η κύρια κινητήρια δύναμη της κυψελοειδούς τεχνολογίας τα επόμενα χρόνια, η αγορά αναμένεται να έχει έσοδα ύψους 6,7 δισεκατομμυρίων δολαρίων έως το 2020 [34]. Με περισσότερες λεπτομέρειες:

- Στην πρώτη φάση ανάπτυξης του 5G, η ορθογώνια ανάπτυξη των πυκνών κυψελών (ultra dense network - UDN), στις συχνότητες των έως 6 GHz θεωρείται βασικός παράγοντας για τη βελτίωση της χωρητικότητας για τους περισσότερους δικτυακούς παρόχους και τα μεγάλα οφέλη που επιτυγχάνονται μέσω της χωρικής επαναχρησιμοποίησης και της απλοποιημένης διαχείρισης παρεμβολών και κινητικότητας που απορρέει από τη χαμηλή αλληλεπίδραση με το δίκτυο μακρο-κυψέλων [35]. Αυτές οι μικρές κυψέλες υπο-6 GHz αναμένεται να επιτύχουν ρυθμούς μέγιστης ταχύτητας δεδομένων 1 Gbps και πανταχού παρούσα κάλυψη πάνω από 100 Mbps όπου χρειάζεται.
- Στην οπίσθια ζεύξη (backhaul) του 5G, η ανάπτυξη των UDN σε συχνότητες εκατοστού κύματος, χιλιοστομετρικού κύματος ή ακόμα και TeraHz [36] αναμένεται να παρέχει υψηλότερους μέγιστους ρυθμούς δεδομένων της τάξης των 10 Gbps και σε συνδυασμό με το πυκνότερο δίκτυο οπτικών ινών θα βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα υπηρεσίας του δικτύου [37].

2.5.2 Ασφάλεια και Κατανάλωση ενέργειας

Ένα ευρύ πλαίσιο θεμάτων ασφάλειας χρειάζεται να αντιμετωπιστεί με την ύπαρξη των 5G δικτύων και σε αυτό, συνδράμουν οι εξής παράγοντες: α) η αρχιτεκτονική IP β) η ποικιλία των τεχνολογιών γ) ο μεγάλος αριθμός συνδεδεμένων συσκευών δ) ο μεγάλος αριθμός των λειτουργικών συστημάτων

και τέλος ε) της χρήσης των συσκευών από μη επαγγελματίες σε θέματα ασφάλειας.

Τα έξυπνα τηλέφωνα και τα tablets θα είναι ο βασικός εξοπλισμός των χρηστών ο εξοπλισμός θα διαθέτει πολύ ελκυστικές λειτουργίες, οι οποίες θα επιτρέπουν στους κατόχους τους την πρόσβαση σε πολύ καλής ποιότητας υπηρεσίες. Ωστόσο, η αυξανόμενη χρήση του βασικού εξοπλισμού συνδυαζόμενη με την αύξηση του όγκου δεδομένων, με τις δυνατότητες της επικοινωνίας των 5G δικτύων, με τη χρήση μεγάλου αριθμού λειτουργικών συστημάτων, αλλά και την μεγάλη ποικιλία συνδέσεων των συσκευών αυξάνουν και τους κινδύνους κακόβουλων επιθέσεων. Εκτός από την παραδοσιακή μορφή επιθέσεων, που βασίζεται σε μηνύματα κειμένου και σε βίντεο-μηνύματα, οι μελλοντικές επιθέσεις, θα βασίζονται σε κινητά λογισμικά που ως στόχο θα έχουν όχι μόνο τις συσκευές αλλά και το δίκτυο 5G. Η ύπαρξη έξυπνων αλγορίθμων θα καθιστούν το δίκτυο 5G αυτό-διαχειριζόμενο και θα το προστατεύουν από εξωτερικούς παράγοντες [37]. Το 4G δίκτυο κάνει χρήση ράδιο-συχνοτήτων της τάξης των 6Gh ενώ το δίκτυο 5G των 30-90 Gh, το μήκος κύματος του θα είναι μεταξύ του 1-10 χιλιοστά και είναι αντιστρόφως ανάλογο με την ράδιο-συχνότητα του, όσο μεγαλύτερη είναι η ράδιο - συχνότητα του τόσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος, το οποίο σημαίνει μεγαλύτερο όγκο μετάδοσης δεδομένων και αυτό, βασίζεται, στην ύπαρξη περισσότερων κεραιών στους σταθμούς βάσης, η ύπαρξη όμως περισσότερων κεραιών στους σταθμούς βάσης έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των παρεμβολών, την μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας και την αύξηση της ταχύτητας.

2.5.3 Ταχύτητα Δικτύου

Με τον όρο ταχύτητα του δικτύου εννοούμε το πλήθος των δεδομένων που μεταφέρονται ή επεξεργάζονται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Δεδομένου ότι οι απαιτήσεις και ο αριθμός των χρηστών αυξάνονται, η ταχύτητα δικτύου είναι σημαντικότερος παράγοντας στο βαθμό ικανοποίησης των χρηστών των δικτύων 5G. Καθώς όμως ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται παρατηρείται μείωση στην απόδοση του δικτύου καθώς και στην ποιότητα εξυπηρέτησης των χρηστών λόγω της συμφόρησης που υφίσταται. Παρ' όλα αυτά η ταχύτητα του 5G δικτύου είναι δέκα φορές μεγαλύτερη σε σχέση με το

δίκτυο 4G, για παράδειγμα η παρακολούθηση τάνυαν σε ανάλυση 8K θα επιτυγχάνεται χωρίς εμπόδια. Η ταχύτητα μαζί με το εύρος ζώνης και τον χρόνο απόκρισης αποτελούν τρία από τα πιο σπουδαία πλεονεκτήματα του δικτύου 5G, το οποίο και εξαιτίας των προαναφερόμενων, είναι σε θέση να διαχειριστεί και να μεταδίδει τεράστιους όγκους δεδομένων. Η υψηλή συχνότητα στην οποία βρίσκεται το 5G δίκτυο συναντά προβλήματα διαπέρασης υπαρκτών εμποδίων όπως είναι παράδειγμα τα κτίρια, αυτό όμως το πρόβλημα επιλύθηκε με την ύπαρξη του 4G δίκτυο το οποίο και θα ενσωματώσει στην τεχνολογία του[38] .

2.5.4 Μελλοντικές τάσεις και εξελίξεις

Τα συστήματα επικοινωνίας επόμενης γενιάς πιθανότατα θα είναι η πρώτη περίπτωση ενός πραγματικά συγκλίνοντος δικτύου όπου, οι ενσύρματες και ασύρματες επικοινωνίες θα συνεργάζονται αποδοτικά με βάση τις ανάγκες των χρηστών του δικτύου, είτε αυτές είναι άνθρωποι είτε μηχανές. Το 5G προσφέρει βελτιώσεις στην κάλυψη, την αποτελεσματικότητα σηματοδότησης, τα ποσοστά μετάδοσης και τη μειωμένη καθυστέρηση. Σε αντίθεση με τα υφιστάμενα δίκτυα, η 5G θα περιλαμβάνει πολλές διαφορετικές ραδιο-τεχνολογίες κάθε μία βελτιστοποιημένη για συγκεκριμένη ανάγκη (π.χ. IoT, κρίσιμες επικοινωνίες V2V, κατοικίες και ενεργειακές υποδομές)[39].

Είναι αλήθεια ότι η δημιουργία επικοινωνιακών προτύπων δεν αποτελεί μια εύκολη διαδικασία, η δυσκολία μεγαλώνει ακόμη περισσότερο από τη στιγμή, που είναι μια κοινή προσπάθεια διαφόρων φορέων, πανεπιστημιακών εργαστηρίων και άλλων η οποία δύναται να καταλήξει σε διαφωνίες μεταξύ τους.

Η κατανάλωση ενέργειας είναι ένα ακόμη θέμα που χρειάζεται να αντιμετωπισθεί, καθώς οι χρήστες ενώ εκφράζουν ικανοποίηση για την ποιότητα της υπηρεσίας τους, το σημείο το οποίο τους δυσαρεστεί είναι η στιγμή της επαναφόρτισης της συσκευής τους. Αν προστεθεί στο σημείο αυτό και η δημιουργία κινητών συσκευών με ταχύτερους και μεγαλύτερης ισχύος επεξεργαστές η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται ακόμη περισσότερο [40] . Η αύξηση της ταχύτητας, σημαίνει και πιο εξελιγμένες συσκευές για χρήση, αυτό με τη σειρά του, σημαίνει αυξημένο κόστος απόκτησης τέτοιων συσκευών

ταυτόχρονα, με την αύξηση του κόστους των συσκευών υπάρχει και αύξηση του κόστους παροχής υπηρεσιών το οποίο οφείλεται στην αλλαγή της τεχνολογίας. Ένα από τα πιο σημαντικά θέματα όμως της τεχνολογίας 5G είναι η αρχιτεκτονική και η διαμόρφωση της. Οι προηγούμενες τεχνολογίες από την 1G ως και την 4G διέθεταν το χαρακτηριστικό της εισαγωγής νέων μεθόδων πολλαπλής πρόσβασης συνδυάζοντας ταυτόχρονα την εξελικτική πορεία των συστημάτων της διαμόρφωσης και της κωδικοποίησης. Οι συζητήσεις των διαφόρων φορέων σχετικά με την αρχιτεκτονική της τεχνολογίας 5G κυμαίνονται στο πλαίσιο της ετερογένειας του δικτύου το οποίο θα αποτελείται από ποικιλία διεπαφών, πρωτοκόλλων, συχνοτήτων, τύπων δικτύων και κόμβων πρόσβασης. Ουσιαστικά η αρχιτεκτονική της τεχνολογίας 5G θα αποτελέσει τον καλύτερο δυνατό συνδυασμό των προγενέστερων τεχνολογιών. Είναι σίγουρο δε, ότι θα υπάρξει αύξηση της ευρυζωνικότητας και των υπηρεσιών της, επιτυγχάνοντας αποδοτικότερη χρήση ράδιο-πόρων, που σημαίνει ότι πολύ μεγάλος όγκος δεδομένων θα παρέχεται μέσω της ασύρματης σύνδεσης, της οποίας το χαρακτηριστικό θα είναι η αξιοπιστία. Η πρόσθετη όμως αξιοπιστία σημαίνει, και καλύτερη κάλυψη χωρίς διακοπές, αύξηση του όγκου δεδομένων ανά μονάδα επιφανείας, καλύτερη ευελιξία και επεκτασιμότητα, πιο μικρό κόστος εγκατάστασης, και πιο αξιόπιστους συνδέσμους επικοινωνίας.

Η αρχιτεκτονική της τεχνολογίας 5G και τα πρωτοκόλλα της χρειάζεται να είναι ικανά να διαχειρίζονται δεκαπλάσια τουλάχιστον αύξηση στην επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων, επίσης, θα χρειαστεί η ανάπτυξη εκείνων των τεχνολογιών που δεν θα επιτρέπουν την κρίση του φάσματος, θα επιδιώκουν μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά ένα συντελεστή 10, θα επιτυγχάνουν καθυστέρηση από το ένα άκρος μέχρι το άλλο (end-to-end) της τάξης του ενός ms, διαφοροποίηση για πολλαπλές εφαρμογές, καθώς επίσης και ευελιξία στις υποδομές ράδιο-πρόσβασης [41].

Παρόλο που οι ενσύρματες συνδέσεις εξασφαλίζουν αξιοπιστία για το backhaul και επιτυγχάνουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, το κόστος της σύνδεσης εξαρτάται από την επιθυμητή χωρητικότητα και την απόσταση. Επίσης, συνδέσεις μεγάλης αξιοπιστίας στο backhaul μπορεί να μην είναι απαραίτητες στις μικρο-κυψέλες καθώς δεν εξυπηρετούν μεγάλο όγκο δεδομένων όπως οι μακρο-κυψέλες. Έτσι, η ασύρματη σύνδεση στο

backhaul είναι μια βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική προσέγγιση, η οποία επιτρέπει στους διαχειριστές να έχουν το έλεγχο του δικτύου τους αντί, για παράδειγμα, να το νοικιάζουν. Σημαντικό ρόλο στο ασύρματο backhaul έχει η σωστή αξιοποίηση του φάσματος: σε μήκη κύματος χιλιοστών (mmWave), στην περιοχή των μικροκυμάτων (micro-wave), σε συχνότητες μικρότερες των 6GHz (sub-6GHz), σε συχνότητες της τηλεόρασης (TV WhiteSpace - TVWS) και στις τεχνολογίες των δορυφόρων. Ωστόσο, η βέλτιστη επιλογή των κατάλληλων συχνοτήτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Μερικοί από αυτούς τους παράγοντες είναι το περιβάλλον διάδοσης, η επιθυμητή χωρητικότητα του backhaul, οι παρεμβολές, το κόστος, η εμβέλεια διάδοσης και η διαθεσιμότητα του φάσματος [42].

Ένα δίκτυο 5G το οποίο θα κάνει χρήση συχνοτήτων στην μπάντα των mmWaves έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- μεγάλο εύρος ζώνης λόγω της χρήσης υψηλών συχνοτήτων.
- χρήση πυκνά τοποθετημένων κυψελών οι οποίες θα συνεργάζονται με τις ήδη υπάρχουσες μακροκυψέλες.
- Ύπαρξη μεγάλου αριθμού κεραιών οι οποίες θα είναι κατευθυντικές και θα βρίσκονται και στον πομπό και στον δέκτη ούτως ώστε να επιτυγχάνουν μεγάλα κέρδη λόγω της μεγάλης κατευθυντικότητας.

Η επιλογή του ασύρματου backhauling και μάλιστα του self-backhauling για την μετάδοση της πληροφορίας από τους σταθμούς βάσης στο δίκτυο κορμού είναι μια βασική τεχνική. Μέσω της συγκεκριμένης τεχνικής, παρέχεται επέκταση στην δικτυακή κάλυψη και αύξηση στην χωρητικότητα. Μια βασική πρόκληση που προκύπτει όμως από την χρήση ασύρματου backhaul είναι η διαχείριση των ράδιο-πόρων. Στον πίνακα 2 συνοψίζονται οι απαιτήσεις και οι δυνατότητες των δικτύων 5G.

Ταχύτητα και Κάλυψη	Αξιοπιστία και καθυστέρηση	Κόστος κατανάλωσης ενέργειας	Τεχνολογίες Πρόσβασης
>10 Gbps ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές	Καθυστέρηση λόγω του αέρα <1 χιλιοστό του δευτερολέπτου	90% περισσότερη αποδοτικότητα	Μια νέα και πιο ικανή τεχνολογία ράδιο-πρόσβασης (RAT)
> 100 Mbps ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων	Καθυστέρηση από συσκευή σε συσκευή	10 χρόνια ζωής μπαταρίας για	Υποστήριξη δικτύων

σε αραιοκατοικημένες αστικές περιοχές και προαστιακές περιοχές	κάτω από 5 χιλιοστά του δευτερολέπτου	συσκευές M2M και Συσκευές χαμηλής ισχύος και των αισθητήρων	βασισμένα στο πρωτόκολλο IPv6
> 10 Mbps ρυθμοί μετάδοσης σε αγροτικές περιοχές παγκοσμίως	Κατανεμημένη Υπολογιστική Χωρητικότητα και Αποθήκευση	Συνδέσεις χαμηλού κόστους και Υπηρεσίες δεδομένων για πολλαπλές συσκευές	Συμβατό προς τα πίσω με συστήματα 4G
10 έως 100 συνδεδεμένες συσκευές σε κάθε node	Διαθεσιμότητα που αγγίζει το 99,99%	Εξαιρετικά χαμηλό κόστος υλικού συσκευής	Πολυφασικό και Διυπηρεσιακή Συνεργασία
Ομοιογενείς χειρισμοί	Λειτουργία υψηλής κινητικότητας και Παρακολούθηση υψηλών ταχυτήτων	Ανάπτυξη υποδομής χαμηλού κόστους	Διαλειτουργικά ετερογενή ασύρματα δίκτυα

Πίνακας 3- Απαιτήσεις και δυνατότητες των δικτύων 5G

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΘΕΩΡΙΑ ΠΑΙΓΝΙΩΝ

3.1 Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων

Η Θεωρία Παιγνίων αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως η μελέτη των μαθηματικών στοιχείων με την οποία μπορεί να προβλεφθούν οι αποφάσεις που παίρνουν ομάδες ή άτομα [43]. Η Θεωρία Παιγνίων παρέχει γενικές μαθηματικές τεχνικές για την ανάλυση καταστάσεων, όπου δύο ή περισσότερα άτομα λαμβάνουν αποφάσεις που μπορούν να επηρεάσουν την ευημερία (welfare) των υπολοίπων. Αν και χρησιμοποιείται ο όρος «παίγνιο», η εν λόγω θεωρία εφαρμόζεται και σε περιπτώσεις που δεν αφορούν αποκλειστικά την ψυχαγωγία. Οι όροι «ανάλυση αντιπαράθεσης» (conflict analysis) ή «διαδραστική θεωρία αποφάσεων» (interactive decision theory) περιγράφουν πιο κατάλληλα το αντικείμενο μελέτης της θεωρίας.

Η Θεωρία Παιγνίων είναι ένας κλάδος εφαρμοσμένων μαθηματικών που χρησιμοποιείται για να μελετήσει πώς οι ορθολογικοί παίκτες, με στόχο να έχουν ικανοποιητικό αριθμό κοινών και σπάνιων πόρων του συστήματος, μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους για να αποκτήσουν δίκαιη και σταθερή κατανομή χρήσιμων υπηρεσιών από ένα συγκεκριμένο σύστημα. Με αυτόν τον τρόπο, η Θεωρία Παιγνίων αναλύει την αλληλεπίδραση μεταξύ ανεξάρτητων και αυτόνομων παικτών. Πιο πρόσφατα, υπήρξε σημαντική έρευνα σε ασύρματα δίκτυα. Τη στιγμή της συγγραφής υπάρχει ένα τεράστιο ενδιαφέρον για τη μελέτη εφαρμογών Θεωρία Παιγνίων για αναδυόμενα περιβάλλοντα ασύρματης επικοινωνίας δεδομένων, όπως γνωστικά ράδιο-συστήματα και δίκτυα αισθητήρων [44].

3.2 Nash ισορροπία

Ο τυπικός ορισμός ενός παιγνίου είναι το πρώτο βήμα στη διαδικασία επίλυσης του παιγνίου. Με τον όρο επίλυση νοείται ο καθορισμός ενός προφίλ στρατηγικής, επιλογή δηλαδή της στρατηγικής για κάθε παίχτη, το οποίο αφενός συμμορφώνεται με τους κανόνες του παιγνίου (και ανήκει στο σύνολο S) αφετέρου ικανοποιεί τη βασική αρχή που τέθηκε νωρίτερα ότι κάθε παίχτης προσπαθεί να μεγιστοποιήσει την ωφέλειά του.

Ένα τέτοιο προφίλ στρατηγικής ονομάζεται ισορροπία (equilibrium). Σε ένα παίγνιο ένας παίχτης, για να κινηθεί προς την κατεύθυνση της μεγιστοποίησης της ωφέλειάς του, θα πρέπει, δεδομένων των στρατηγικών των υπολοίπων παιχτών, να επιλέξει τη στρατηγική εκείνη που του αποφέρει τη μέγιστη ωφέλεια. Η στρατηγική αυτή του χρήστη καλείται βέλτιστη απόκριση (best response). Σύμφωνα με τον καθιερωμένο φορμαλισμό, με n συμβολίζεται το σύνολο των συμπαιχτών - αντιπάλων του παίχτη i .

Η Nash ισορροπία είναι ένα προφίλ στρατηγικής από το οποίο κανένας χρήστης δε θα επιλέξει να διαφοροποιηθεί μονομερώς, αφού, δεδομένων των στρατηγικών των υπολοίπων παικτών, δε μπορεί να αποκομίσει μεγαλύτερη ωφέλεια. Διατυπωμένο διαφορετικά, η Nash ισορροπία είναι ένα προφίλ στρατηγικών που αποτελείται από αμοιβαίες βέλτιστες αποκρίσεις των παιχτών.

Για την κατανόηση της Nash ισορροπίας, θα γίνει αναφορά σε ένα από τα πιο διάσημα παραδείγματα της Θεωρίας Παιγνίων, το δίλημμα του φυλακισμένου (prisoner's dilemma). Δύο ύποπτοι για ένα έγκλημα κρατούνται από τις αρχές και ανακρίνονται σε χωριστά δωμάτια. Αν και υπάρχουν αρκετά στοιχεία για να παραπεμφθούν για ένα πταίσμα, δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία για να παραπεμφθούν για το έγκλημα, εκτός εάν κάποιος από τους δύο καταδώσει τον άλλο. Αν και οι δύο σιωπήσουν, τότε θα καταδικαστούν για το πταίσμα σε ένα χρόνο φυλάκισης έκαστος. Αν μόνον ο ένας καταδώσει τον άλλο, τότε ο καταδότης θα απελευθερωθεί και θα χρησιμοποιηθεί σαν μάρτυρας εναντίον του δεύτερου, ο οποίος θα καταδικαστεί για το έγκλημα σε τέσσερα χρόνια φυλάκισης. Αν και οι δύο καταδώσουν αλλήλους, τότε έκαστος θα καταδικαστεί σε τρία χρόνια φυλάκιση [45] .

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα που έχουν απασχολήσει τους μελετητές της Θεωρίας Παιγνίων είναι ο ορισμός της σωστής έννοιας επίλυσης ενός παιγνίου. Μολονότι υπάρχουν πολλές προτάσεις, τρία είδη σημείων ισορροπίας έχουν επικρατήσει στη βιβλιογραφία της μη συνεργατικής Θεωρίας Παιγνίων.

Το πρώτο σημείο συναντάται όταν υπάρχουν κυρίαρχες (dominant) στρατηγικές, κατά τις οποίες κάθε παίκτης διαθέτει μια βέλτιστη στρατηγική, ανεξάρτητα από τις στρατηγικές επιλογές των υπολοίπων παικτών. Δυστυχώς, τέτοιες λύσεις δεν υπάρχουν σε όλα τα παίγνια (και μερικές φορές, ακόμα κι αν υπάρχουν, όπως στο δίλημμα των φυλακισμένων, μπορεί να οδηγούν σε απροσδόκητες καταστάσεις) [46].

Η δεύτερη και πιο δημοφιλής έννοια επίλυσης ενός παιγνίου, είναι το σημείο ισορροπίας Nash (Nash equilibrium), του οποίου η ύπαρξη εξασφαλίζεται για κάθε πεπερασμένο παίγνιο, από το διάσημο θεώρημα του Nash [47].

Ο τρίτος τύπος ισορροπίας είναι η έννοια των συσχετιζόμενων σημείων ισορροπίας (correlated equilibrium), που εισήγαγε ο κάτοχος βραβείου Νομπελ, Robert Aumann και η οποία είναι σχεδόν εξίσου ευρέως μελετημένη έννοια όσο τα σημεία ισορροπίας Nash [48].

Πρόσφατα, αυτού του είδους τα σημεία ισορροπίας, μελετήθηκαν υπολογιστικά. Μια συσχετιζόμενη στρατηγική για ένα παίγνιο, είναι μια πιθανοτική κατανομή πάνω σε όλες τις δυνατές στρατηγικές καταστάσεις. Μια διαδεδομένη ερμηνεία της κατάστασης είναι η εξής: υπάρχει ένας έμπιστος μεσολαβητής που εκτελεί το τυχαίο πείραμα και ανακοινώνει τις στρατηγικές που προκύπτουν ως αποτέλεσμα, σε κάθε παίκτη ιδιαιτέρως. Οι παίκτες, μολονότι γνωρίζουν την κατανομή, δεν πληροφορούνται για το αποτέλεσμα του τυχαίου πειράματος, αλλά μόνο για ένα μέρος του, τη στρατηγική τους. Μπορούν να επιλέξουν να ακολουθήσουν ή να αγνοήσουν τη συμβουλή του μεσολαβητή, ανάλογα με το συμφέρον τους. Μια συσχετιζόμενη στρατηγική είναι συσχετιζόμενο σημείο ισορροπίας, αν κανένας παίκτης δεν έχει λόγο να παρακούσει, από μόνος του το μεσολαβητή.

Αυτό το παράδειγμα, αποτελεί μια άλλη δυνατή ερμηνεία για τα μικτά σημεία ισορροπίας Nash, με τη διαφορά ότι η κατανομή σχηματίζεται από ανεξάρτητα τυχαία πειράματα (ένα για κάθε παίκτη) πάνω στο απλό σύνολο στρατηγικών κάθε παίκτη. Δηλαδή, τα σημεία ισορροπίας Nash, αποτελούν περιορισμό των συσχετιζόμενων σημείων ισορροπίας.

Οι τρεις παραπάνω τύποι σημείων ισορροπίας (κυρίαρχες, Nash και συσχετιζόμενα) συνδέονται με το σύνολο των σημείων ισορροπίας Nash που περιέχει τις κυρίαρχες στρατηγικές και το σύνολο των συσχετιζόμενων σημείων ισορροπίας που περιέχει όλα τα σημεία ισορροπίας Nash. Συνεπώς, από το θεώρημα του Nash, συνάγεται ότι η ύπαρξη των συσχετιζόμενων σημείων ισορροπίας είναι εξασφαλισμένη.

Ένα από τα κυριότερα εργαλεία στη μελέτη της ιδιοτελούς συμπεριφοράς, είναι η τιμή της αναρχίας ένα μέτρο που συγκρίνει το σημείο ισορροπίας Nash με τη χειρότερη απόδοση, με τη βέλτιστη στρατηγική κατάσταση. Η έννοια της τιμής της αναρχίας επεκτείνεται φυσικά για τα συσχετιζόμενα σημεία ισορροπίας.

Αν το μόνο που γνωρίζουμε είναι ότι οι παίκτες παίζουν σε κάποιο σημείο ισορροπίας, η τιμή της αναρχίας φράσσει την επιδείνωση της απόδοσης του συστήματος, λόγω της ιδιοτελούς συμπεριφοράς. Από την άλλη μεριά, υπάρχει η αισιόδοξη οπτική γωνία, κατά την οποία, οι παίκτες καθοδηγούνται να παίξουν στο καλύτερο σημείο ισορροπίας Nash. Πόσο κοντά στο βέλτιστο βρίσκεται το καλύτερο σημείο ισορροπίας: θωρώντας συσχετιζόμενο σημεία ισορροπίας, αυτή η οπτική φαίνεται να έχει ιδιαίτερο νόημα [49] .

3.3 Μεικτές στρατηγικές

Από την παρουσίαση που προηγήθηκε, συμπεραίνει κανείς ότι σε ένα παίγνιο κάθε παίχτης έχει τη δυνατότητα να ακολουθήσει μία μόνο δράση ως στρατηγική. Στη θεωρία Παιγνίων, όταν στα στρατηγικά παίγνια ο παίχτης επιλέγει ως στρατηγική μία μόνο δράση, τότε η στρατηγική αυτή καλείται αμιγής (pure strategy). Σε μια διαφορετική θεώρηση, ο παίχτης θα μπορούσε να διαμορφώνει τη στρατηγική του επιλέγοντας με κάποια πιθανότητα μία από τις διαθέσιμες δράσεις. Καθ' αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε η ιδέα των μεικτών στρατηγικών (mixed strategics).

Ως μεικτή στρατηγική του παίχτη i ορίζεται μια κατανομή πιθανότητας στις αμιγείς στρατηγικές. Αντίστοιχα, ο χώρος των μεικτών στρατηγικών του παίχτη i ορίζεται και περιλαμβάνει τις μεικτές στρατηγικές του παίχτη i . Επίσης, ως προφίλ στρατηγικής σ ορίζεται το διάνυσμα που καθορίζει τη μεικτή στρατηγική που ακολουθεί κάθε παίχτης του παιγνίου και ανήκει στο χώρο των προφίλ στρατηγικής.

Καθώς στην ανάλυση εισέρχεται η κατανομή πιθανοτήτων για την επιλογή της στρατηγικής του χρήστη, για τον ορισμό της ωφέλειας επιστρατεύεται η έννοια της αναμενόμενης ωφέλειας. Για ένα προφίλ στρατηγικής σ , η αναμενόμενη ωφέλεια (Expected Value) για το χρήστη i ορίζεται ως:

$$ExpectedValue = \sum_{i=0}^n \sigma_i(s_i) * u_i(s_i, \sigma - i)$$

Στα παίγνια μεικτών στρατηγικών κάθε παίχτης, σύμφωνα με την προϋπόθεση των λογικών παιχτών που ετέθη προηγούμενα, επιδιώκει τη μεγιστοποίηση του αναμενόμενου οφέλους του. Εύκολα προκύπτει ότι δεν υπάρχει προφίλ στρατηγικής που να αποτελείται από αμοιβαία βέλτιστες αποκρίσεις και έτσι δεν υπάρχει Nash ισορροπία, όταν το παίγνιο μελετάται με αμιγείς στρατηγικές [50] .

3.4 Θεωρία παιγνίων και τηλεπικοινωνίες

Η εφαρμογή παίγνιο-θεωρητικών μεθόδων σε ζητήματα τηλεπικοινωνιών ξεκινά από τα μέσα της δεκαετίας του '70, όταν ο ίδιος ο μαθηματικός κλάδος της Θεωρίας Παιγνίων βρισκόταν ακόμα σε έντονη ανάπτυξη και θεμελίωση, ενώ ο κύριος όγκος εργασιών εντοπίζεται από τις αρχές της δεκαετίας του '90 [51] . Στην υφιστάμενη βιβλιογραφία η Θεωρία Παιγνίων επιστρατεύεται για να αντιμετωπίσει ένα ευρύ φάσμα τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών, στις οποίες περιλαμβάνονται:

- Έλεγχος ισχύος και συμφόρησης
- Δρομολόγηση
- Εκχώρηση αρχειών
- Εξισορρόπηση φορτίου
- Ροή πολλαπλών αντικειμένων
- Εκχώρηση κόρων
- Παροχή ποιότητας υπηρεσίας και ποικίλα άλλα ερευνητικά αντικείμενα

Οι λόγοι που οδηγούν στην αξιοποίηση της θεωρίας παιγνίων για τη σχεδίαση τηλεπικοινωνιακών δικτύων είναι κυρίως δύο. Ο πρώτος αφορά στις οντότητες που συγκροτούν τα δίκτυα και είναι συσκευές οποιουδήποτε τύπου. Οι συσκευές αυτές αντιπροσωπεύουν την παρουσία στο δίκτυο ανθρώπων (ή μηχανών), είτε αυτοί είναι από την πλευρά του τελικού χρήστη είτε από την πλευρά του παρόχου μιας υπηρεσίας. Επειδή οι άνθρωποι μπορούν να λειτουργήσουν εγωιστικά και να προσπαθήσουν να μεγιστοποιήσουν το όφελός τους από τη χρήση του δικτύου σε βάρος ίσως των υπολοίπων χρηστών, το δίκτυο θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μπορεί να αποφύγει μια τέτοια κατάσταση ή να μπορεί να την εκμεταλλευτεί εποικοδομητικά.

Επιπρόσθετα, η παράλληλη εφαρμογή διαφορετικών τεχνολογιών στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες καθιστά το υφιστάμενο δικτυακό τοπίο ετερογενές και έτσι έχει δημιουργηθεί η ανάγκη για διαλειτουργικότητα μεταξύ των δικτύων αυτών. Στις

περιπτώσεις αυτές, η σχεδίαση τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων που θα βασίζονται σε κοινά αποδεκτές μετρικές, είναι απαραίτητη προς την κατεύθυνση της ενοποίησης των δικτύων.

Παρά το γεγονός ότι ο κύριος όγκος της υφιστάμενης βιβλιογραφίας εστιάζει σε μη συνεργατικά παίγνια, η ανάπτυξη των ad-hoc δικτύων και η ραγδαία αύξηση δικτύων με αναμεταδότες (relays), ώθησαν στην εισαγωγή συνεργατικών παιγνίων στα ασύρματα δίκτυα. Εκεί πλέον οι οντότητες του δικτύου δε λειτουργούν εντελώς ανεξάρτητα αλλά συνεργάζονται με άλλες οντότητες, δημιουργώντας συμμαχίες για την επίτευξη ενός κοινού σκοπού [52] .

3. 5 Η Τιμή της Αναρχίας

Ένα κεντρικό ζήτημα που αντιμετωπίζεται σε δίκτυα επικοινωνιών ευρείας κλίμακας όπως το διαδίκτυο, είναι το πρόβλημα της δρομολόγησης δεδομένων πληροφορίας μέσα στο δίκτυο, με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η βελτιστοποίηση της απόδοσης του. Μια από τις εκδοχές του προβλήματος είναι η εξής: δοθέντος του ρυθμού πληροφορίας μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων του δικτύου, το ζητούμενο είναι να βρεθεί μια ανάθεση της κίνησης των δεδομένων σε διαδρομές του δικτύου, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο μέσος χρόνος παραμονής ενός πακέτου στο σύστημα.

Μια πηγή δυσκολίας του προβλήματος, είναι ότι ο χρόνος που χρειάζεται για τη διάσχιση μίας ζεύξης δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται άμεσα από το φόρτο της ζεύξης. Αυτό σημαίνει, ότι η κοινή καθυστέρηση που γίνεται αισθητή από όλα τα δεδομένα που συνθέτουν την κίνηση που διέρχεται από μία ζεύξη, αυξάνεται όσο αυξάνεται ο φόρτος στη ζεύξη.

Λόγω του τεράστιου και δυναμικού μεγέθους αυτών των δικτύων, συχνά είναι αδύνατο να εφαρμόσουμε κεντρική διαχείριση της κίνησης, βρίσκοντας τα βέλτιστα ή έστω σχεδόν βέλτιστα μονοπάτια. Έτσι καταφεύγουμε σε κατανεμημένες λύσεις, στις οποίες ο κάθε δρομολογητής (χρήστης) επιλέγει ανεξάρτητα το μονοπάτι μέσω του οποίου θα προωθήσει την κίνηση. Συχνά για τη δρομολόγηση χρησιμοποιούνται άπληστοι αλγόριθμοι, που επιλέγουν τα μονοπάτια με τη μικρότερη καθυστέρηση, λαμβάνοντας υπόψη τη συμφόρηση που προκαλούν οι υπόλοιποι χρήστες του συστήματος.

Στα peer-to-peer (P2P) συστήματα, τα δεδομένα συνήθως αποθηκεύονται σε πολλούς εξυπηρετητές για να εξασφαλιστεί υψηλό επίπεδο διαθεσιμότητας και ανοχής σφαλμάτων. Ως αποτέλεσμα, οι χρήστες έχουν επιλογή από ένα πλήθος εξυπηρετών από

όπου μπορούν να λάβουν τα δεδομένα που τους ενδιαφέρουν. Ο κάθε χρήστης είναι ιδιοτελής και θέλει να ελαχιστοποιήσει το χρόνο απόκρισης. Από την άλλη μεριά, ένας εξυπηρετητής που παρέχει υπηρεσίες σε πολλούς χρήστες ταυτοχρόνως, θα πρέπει να διαμοιράσει στους χρήστες το περιορισμένο εύρος ζώνης του.

Συνεπώς, η καθυστέρηση (χρόνος απόκρισης) που αντιλαμβάνεται ο κάθε χρήστης όταν λαμβάνει (download) δεδομένα από έναν εξυπηρετητή εξαρτάται από το πόσοι άλλοι χρήστες είναι συνδεδεμένοι με τον ίδιο εξυπηρετητή. Θεωρούμε ότι οι χρήστες του δικτύου είναι ελεύθεροι να ενεργήσουν σαν ανεξάρτητοι πράκτορες κατά το συμφέρον τους, αδιαφορώντας για τη συνολική απόδοση του συστήματος, και συνεπώς συμμετέχουν σε ένα μη συνεργατικό παίγνιο. Ίσως η πιο κεντρική έννοια της «Μη Συνεργατικής Θεωρίας Παιγνίων», είναι η έννοια της Ισορροπίας Nash, κατά την οποία οι παίκτες βρίσκονται σε μια ευσταθή κατάσταση του συστήματος.

Άτυπα, αναφέρεται πως μια κατάσταση του συστήματος βρίσκεται σε ισορροπία Nash όταν κανένας παίκτης δεν μπορεί, από μόνος του, να βελτιώσει το όφελος του επιλέγοντας μια άλλη στρατηγική απόφαση. Δανειζόμενοι αυτήν την έννοια, θεωρούμε ότι οι άπληστες αποφάσεις των παικτών (επιλογή μονοπατιού, εξυπηρετητής κ. ο. κ), συγκλίνουν σε κάποιο σημείο ισορροπίας Nash.

Η Τιμή της Αναρχίας, είναι η έννοια που εισήγαγαν οι ερευνητές στο[53] με σκοπό να μελετήσουν τη μείωση της απόδοσης των συστημάτων, στα οποία παρατηρούνται φαινόμενα ιδιοτέλειας από τις ανεξάρτητες οντότητες που το συντελούν. Η Τιμή της Αναρχίας συγκρίνει την απόδοση του συστήματος, όταν οι παίκτες παίζουν στο χειρότερο δυνατό σημείο ισορροπίας Nash, με τη βέλτιστη απόδοση του συστήματος που θα προέκυπτε αν κάποιος κεντρικός συντονιστής αναλάμβανε να δρομολογήσει την κίνηση στο δίκτυο.

3.6 Μηχανισμοί

Η σχεδίαση αλγορίθμων (πρωτοκόλλων), για διασυνδεδεμένες ομάδες υπολογιστών αποτελεί κεντρικό πεδίο της Επιστήμης των Υπολογιστών. Ο σχεδιαστής ενός τέτοιου αλγορίθμου ή πρωτοκόλλου συχνά κάνει την έμμεση υπόθεση ότι οι υπολογιστές που συμμετέχουν στο σύστημα, θα συμπεριφερθούν σύμφωνα με τις εντολές που έχουν λάβει, με εξαίρεση τους ελαττωματικούς ή τους κακόβουλους.

Σε δίκτυα ευρείας κλίμακας, όπως το Διαδίκτυο, όταν αυτά θεωρούνται ως πλατφόρμες κατανεμημένου υπολογισμού, αυτή η παραδοχή παύει να έχει ισχύ. Οι κατανεμημένες

μονάδες που απαρτίζουν το δίκτυο, ανήκουν σε διαφορετικές οικονομικές οντότητες (φυσικά πρόσωπα, οργανισμούς). Κάθε μια από αυτές τις μονάδες έχει τα δικά της κίνητρα και συμφέροντα (των ιδιοκτητών της). Επιπλέον, συχνά ενεργούν, μερικώς ή εντελώς, αυτόνομα και μπορούν να εκμεταλλευτούν αυτήν την αυτονομία έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τα συμφέροντά τους. Έτσι, αντί να ακολουθήσουν πιστά τους κανόνες του συστήματος (πρωτόκολλο), που καθόρισε ο σχεδιαστής, μπορεί να τους εκμεταλλευτούν προς όφελός τους. Υπάρχουν πολλές καταστάσεις όπου τέτοιες στρατηγικές αποκλίσεις δεν μπορούν να αποφευχθούν.

Για παράδειγμα, μπορεί το πρωτόκολλο να απαιτεί από ένα συμμετέχοντα να αναφέρει στο σύστημα κάποιες πληροφορίες που είναι ενδογενώς προσωπικές, όπως για παράδειγμα οι προτιμήσεις του. Η συμπεριφορά του συμμετέχοντα μπορεί να μην είναι εντελώς παρατηρήσιμη ή επαληθεύσιμη από κάποια άλλη μονάδα του συστήματος. Μπορεί να υφίστανται νομικές δυσκολίες που να μην επιτρέπουν την επιβολή συμβολαίου, ή μπορεί απλώς η επαλήθευση να είναι οικονομικά και χρονικά ασύμφορη. Αυτοί οι στρατηγικοί συμμετέχοντες μπορούν κάλλιστα να μοντελοποιηθούν σαν ιδιοτελείς πράκτορες (παίκτες). Ένας πράκτορας δεν αντιστοιχεί απαραίτητα σε μια ξεχωριστή οντότητα, αλλά μπορεί να αντιπροσωπεύει μια ομάδα ή έναν οργανισμό. Για παράδειγμα, σε ένα σενάριο πολυεκπομπής (multicast), ένας απλός χρήστης είναι φυσικό να μοντελοποιηθεί ως διακεκριμένος παίκτης [54] .

Το γεγονός αυτό αποτελεί κίνητρο δημιουργίας και μελέτης πρωτοκόλλων, τέτοιων ώστε λαμβάνοντας υπόψη την ιδιοτέλεια των παικτών, η συμπεριφορά τους να οδηγεί σε επιθυμητούς στόχους του συστήματος. Ο σχεδιασμός μηχανισμών είναι ένα παρακλάδι της Θεωρίας Παιγνίων που αφορά στην κατασκευή παιγνίων (μηχανισμών) των οποίων ο σκοπός είναι να οδηγήσουν τους παίκτες να συμπεριφέρονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να προκύπτουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Αυτό επιτυγχάνεται παραλλάσσοντας τους κανόνες του παιχνιδιού και τα συμφέροντα των παικτών. Οι ισορροπίες του παιγνίου αυτού, αποτελούν αποδοτικές καταστάσεις του συστήματος.

3.7 Κατηγορίες παιγνίων-ταξινόμηση των προσεγγίσεων της Θεωρίας Παιγνίων

Υπάρχουν δύο ξεχωριστές προοπτικές υψηλού επιπέδου στη Θεωρία Παιγνίων α) κλασική και β) εξελικτική. Η κλασική ουσιαστικά απαιτεί από όλους τους παίκτες να κάνουν λογικές επιλογές μεταξύ ενός προκαθορισμένου συνόλου στατικών

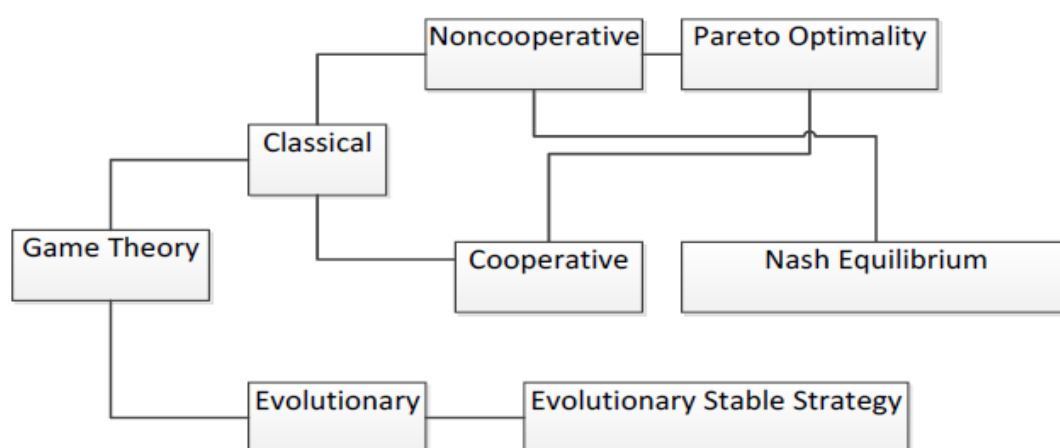
στρατηγικών. Κατά συνέπεια, στη Θεωρία Παιγνίων κάθε παίκτης πρέπει να εξετάσει τη στρατηγική ανάλυση που κάνουν οι αντίπαλοι των παικτών για να καθορίσει ότι η δική του στατική στρατηγική επιλογή είναι κατάλληλη. Αντίθετα, ένας πιο πρόσφατος κλάδος-η εξελικτική Θεωρία Παιγνίων δηλώνει ότι οι παίκτες δεν είναι απολύτως ορθοί οι παίκτες έχουν περιορισμένες πληροφορίες σχετικά με τις διαθέσιμες επιλογές και συνέπειες και οι στρατηγικές δεν είναι στατικές (οι στρατηγικές εξελίσσονται).

Οι παίκτες έχουν μια προτιμώμενη στρατηγική που βρίσκεται σε συνεχή κατάταξη με άλλες εναλλακτικές στρατηγικές. Εάν ένας παίκτης βρει μια καλύτερη στρατηγική, τότε προτιμά να αλλάξει σε αυτή τη στρατηγική για να πάρει μια καλύτερη ανταμοιβή. Η απόφαση αλλαγής της προτιμώμενης στρατηγικής μπορεί επίσης να επηρεαστεί από άλλους γείτονες παίκτες που ανήκουν στον ίδιο πληθυσμό (με παρατήρηση και μάθηση). Με αυτόν τον τρόπο, η στρατηγική με την υψηλότερη βαθμολογία επιλογής μέσα σε μια ομάδα ατόμων που σχηματίζουν μια κοινότητα θα γίνει η κυρίαρχη στρατηγική για αυτή τη γενιά ατόμων και θα μεταφερθεί στην επόμενη γενιά ατόμων (εξελικτική πλευρά). Κατά τη διάρκεια της προηγούμενης μεταβίβασης, ορισμένα μεμονωμένα χαρακτηριστικά μπορούν να αλλάξουν μέσω επιλογών ή μεταλλάξεων. Ένα σημαντικό μείζον πλεονέκτημα της εξελικτικής Θεωρίας Παιγνίων σε σύγκριση με την κλασική είναι ότι η ισορροπία του συστήματος θα μπορούσε να επιτευχθεί πιο γρήγορα.

Η ισορροπία του συστήματος (δηλαδή η λύση του παιγνίου) σε κλασικά και εξελικτικά μοντέλα σημαίνει μια διαμόρφωση σταθερού συστήματος, που ικανοποιεί ποικίλες απαιτήσεις συστήματος και από τις οποίες κανένας παίκτης δεν επιδιώκει να αποκλίνει. Καθώς ένας παίκτης αποκλίνει από την ισορροπία του συστήματος, τότε αυτός ο παίκτης θα τιμωρηθεί με κάποια μορφή υποβάθμισης της ανταμοιβής του (κλασικού παιγνίου) ή της φυσικής κατάστασης (εξελικτικό παίγνιο).

Εφόσον η κατανομή των πόρων επηρεάζει το πρόβλημα της επιλογής δικτύου, έχουμε επικεντρωθεί στη συνέχεια σε προσεγγίσεις που αφορούν το πρόβλημα της επιλογής δικτύου και της κατανομής των πόρων. Οι περισσότερες από αυτές διαμορφώνουν τα προβλήματα της κατανομής πόρων και επιλογής δικτύου ως μη συνεργατικά παίγνια ενώ λίγες τα αντιμετωπίζουν ως συνεργατικά

παίγνια.



Εικόνα 3 Διάκριση των κατηγοριών Θεωρίας των Παιγνίων (Πηγή: Cardellini et al. 2016)

Η κλασσική προσέγγιση της Θεωρίας Παιγνίων μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικές κατηγορίες, δηλαδή μη συνεργατική και συνεργατική. Η βασική διάκριση μεταξύ αυτών των κλάδων είναι ότι στη μη συνεργατική Θεωρία Παιγνίων, η βασική μονάδα μοντελοποίησης είναι ο μεμονωμένος παίκτης, ενώ στη συνεργατική, η βασική μονάδα μοντελοποίησης είναι μια ομάδα διαφόρων παικτών που έχουν κοινό στόχο αλλά ανταγωνίζονται άλλες ομάδες. Το όφελος του παιγνίου χωρίζεται επίσης με διαφορετικούς τρόπους.

Σε ένα μη συνεργατικό παίγνιο, κάθε συμμετέχων κερδίζει ατομικά οφέλη από προεπιλογή με εγωιστικό τρόπο. Αντίθετα, σε ένα συνεταιριστικό παίγνιο το όφελος που αποκτάται από μια ομάδα συνασπισμού μοιράζεται μεταξύ των διαφόρων στοιχείων που αποτελούν αυτή την ομάδα [55].

Αυτή η συνεργασία μπορεί να είναι χρήσιμη επειδή οι πόροι του δικτύου για την ικανοποίηση μεγάλων φορτίων είναι σπάνιοι, όπως συνήθως συμβαίνει στα ασύρματα δίκτυα. Με αυτόν τον τρόπο, οι διαθέσιμοι πόροι μπορούν να διανεμηθούν δίκαια στους διάφορους χρήστες [56]. Τα μέλη με καλή φήμη, καθώς συμβάλλουν θετικά στη ζωή της κοινότητας, μπορούν να χρησιμοποιήσουν τους πόρους του δικτύου χωρίς κανένα σημαντικό περιορισμό, ενώ οι κόμβοι με κακή φήμη, καθώς συνήθως αρνούνται να συνεργαστούν, περιορίζονται σταδιακά στη χρήση των πόρων του δικτύου.

Τα συστήματα φήμης μπορούν να ταξινομηθούν ως συγκεντρωτικά ή αποκεντρωμένα ανάλογα με το πού εκτιμάται η φήμη του κόμβου, αντίστοιχα, σε έναν κεντρικό κόμβο ή σε κάθε μεμονωμένο κόμβο. Τα συστήματα φήμης προσφέρουν το κύριο πλεονέκτημα

ότι βασίζονται πληροφορίες από πολλές πηγές για να αξιολογήσουν τη φήμη ενός κόμβου. Έτσι, είναι σχετικά ανθεκτικά στη διάδοση ψευδών πληροφοριών από ένα μικρό αριθμό κόμβων.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι η σημαντική απώλεια της μπαταρίας κόμβου και του εύρους ζώνης επικοινωνίας για την υποστήριξη της συνεχούς παρακολούθησης και αναφοράς της συμπεριφοράς των κόμβων. Μία πολύ πρόσφατη έρευνα [57], εξετάζει περαιτέρω μηχανισμούς, εκτός από την τιμολόγηση και τη φήμη, για να παρακινήσει τους χρήστες να συμμετάσχουν ενεργά και επίμονα σε μια κοινή στρατηγική μεταξύ τους. Μια ακόμη έρευνα εξετάζει πώς παρέχονται τα κίνητρα στους κοινωνικούς φίλους των συμμετεχόντων για να τονωθεί η συνεργασία και όχι να ενθαρρύνουν άμεσα τους ίδιους τους συμμετέχοντες [58] .

3.7.1 Κλασικά μη συνεργατικά παίγνια

Σε ένα κλασικό μη συνεργατικό παίγνιο, η θεμελιώδης μονάδα μοντελοποίησης είναι ο μεμονωμένος παίκτης, έχοντας γνώσεις σχετικές με την κατάσταση του παιχνιδιού, τις προσδοκίες και τις πιθανές στατικές στρατηγικές. Σε αυτόν τον τύπο παιχνιδιού, ο κύριος στόχος είναι να αξιολογήσει εάν υπάρχει μια λογική λύση για το συγκεκριμένο παίγνιο. Αυτή η λύση συνεπάγεται ένα σύνολο στρατηγικών που οι παίκτες θα επιλέξουν ορθολογικά για τη βελτιστοποίηση της δικής τους χρησιμότητας ή πληρωμής. Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να είναι σαφές ότι ένα κλασικό μη συνεργατικό παίγνιο ορίζεται ως ένα μοντέλο στο οποίο οποιαδήποτε επιθυμητή συνεργασία πρέπει να εκτελεσθεί.

Επιπλέον, οι παίκτες λαμβάνουν τις αποφάσεις τους ταυτόχρονα. Έτσι, κάθε παίκτης δεν έχει πληροφορίες σχετικά με τις αποφάσεις άλλων. Ένα επαναλαμβανόμενο παίγνιο είναι ένα μη συνεργατικό παίγνιο το οποίο παίζεται με ένα πεπερασμένο αριθμό στροφών. Επίσης, διατηρείται ένα ιστορικό αρχείο με όλες τις αποφάσεις των παικτών μέσω των διαφόρων επαναλήψεων αυτού του παιχνιδιού. Μπορούμε επίσης να κατατάξουμε, το επαναλαμβανόμενο παίγνιο ως μια εκτεταμένη μορφή παιχνιδιού, που σημαίνει ότι ένας παίκτης πρέπει να λάβει υπόψη τον αντίκτυπο της τρέχουσας δράσης του στις μελλοντικές ενέργειες άλλων[59]. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να επιβάλει κάποιο επίπεδο συνεργασίας μεταξύ των παικτών, συμπεριλαμβανομένων και των παικτών που δεν έχουν αρχική πρόθεση να συνεργαστούν (δηλαδή εγωιστές παίκτες) με άλλους. Ένα επαναλαμβανόμενο παίγνιο χαρακτηρίζεται επίσης μερικές φορές ως

δυναμικό. Οι συγγραφείς στο [60], προτείνουν μια ταξινόμηση των εφαρμογών επαναλαμβανόμενων παιγνίων σε ασύρματα δίκτυα που συνοψίζονται στον Πίνακα 4.

Σενάριο Δικτύου	Βασικοί στόχοι
Ασύρματα και κυψελωτά	Πρόσβαση πολλών χρηστών και ποιότητα υπηρεσιών (Quality of service)
Ad hoc	Προώθηση πακέτων: αποδοτικότητα ενέργειας
Cognitive Radio	Διαχείριση : Χρήση του φάσματος

Πίνακας 4. Ταξινόμηση των εφαρμογών με βάση το σενάριο

3.7.2 Εξελικτικά παίγνια

Ένα εξελικτικό παίγνιο παίζεται επανειλημμένα ανάμεσα στους εκλεγμένους πράκτορες από ένα μεγάλο πληθυσμό. Οι δύο κύριοι μηχανισμοί που συνδέονται με την εξελικτική διαδικασία κατά μήκος των διαφόρων γενεών του πληθυσμού είναι η μετάλλαξη και η επιλογή [61]. Ο μηχανισμός μετάλλαξης (στατικός) χρησιμοποιείται για να εγγυηθεί την ποικιλομορφία του πληθυσμού. Ο μηχανισμός επιλογής (δυναμικός) χρησιμοποιείται για την προώθηση του γενετικού κώδικα των παραγόντων με υψηλότερη καταλληλότητα έναντι άλλων παραγόντων με χαμηλή φυσική κατάσταση. Με αυτόν τον τρόπο, οι τελευταίοι παράγοντες τείνουν να εξαφανίζονται καθώς συνεχίζεται η εξελικτική διαδικασία. Ο μηχανισμός επιλογής περιγράφεται από τη δυναμική αναπαραγωγής.

Λόγω της ταχείας ανάπτυξης των ασύρματων τερματικών συσκευών και της δημοφιλούς χρήσης εφαρμογών κινητού διαδικτύου, η ασύρματη ροή δεδομένων αυξάνεται με σχεδόν εκθετικό ρυθμό τα τελευταία χρόνια. Το φορτίο κυκλοφορίας αλλάζει επίσης πολύ γρήγορα ανάλογα με τη χρονική στιγμή της ημέρας. Οι τρέχουσες υποδομές δικτύου στερούνται πόρων για τη στήριξη της μεγάλης αύξησης της ζήτησης δεδομένων, της πανταχού παρούσας συνδεσιμότητας ροής, της εξαιρετικά χαμηλής λανθάνοντος χρόνου και των απαιτήσεων πολύ υψηλής ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων.

Υπάρχουν μερικές αναδυόμενες σχεδιαστικές λύσεις για την ικανοποίηση αυτών των νέων απαιτήσεων. Αυτές οι λύσεις περιλαμβάνουν την επέκταση της υποδομής του διαχειριστή δικτύου με Femtocells ή μεγαλύτερου μεγέθους κυψέλες. Επιπλέον, με την

επερχόμενη εμφάνιση του IoT, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πρέπει να επεκταθούν στην άκρη τους με ορισμένα τριχοειδή δίκτυα (multi-hop), συνδέοντας μια τεράστια ποικιλία συσκευών, δηλαδή: αισθητήρες, ενεργοποιητές, χερσαία οχήματα, αισθητήρες κάτω από το νερό, αισθητήρες υπόγειου εδάφους και αεροσκάφη. Περαιτέρω, οι φορείς κινητής τηλεφωνίας μελετούν λύσεις όπου στην άκρη των δικτύων τους υπάρχουν εικονικά μηχανήματα που προσφέρουν στους πελάτες τους κάποια αποθήκευση δεδομένων και στέγαση εφαρμογών, όλα με χαμηλότερη RTT (Round Trip Time) από την εναλλακτική λύση που βασίζεται σε cloud [62] .

3.7.3 Δυναμικά παίγνια

Στην απεικόνιση στρατηγικής φόρμας συνήθως θεωρείται ότι οι παίκτες κάνουν τις κινήσεις τους ταυτόχρονα χωρίς να γνωρίζουν τι κάνουν οι άλλοι παίκτες. Αυτό μπορεί να είναι μια λογική υπόθεση σε ορισμένα προβλήματα, για παράδειγμα στο παίγνιο πολλαπλής πρόσβασης. Στα περισσότερα παίγνια, ωστόσο, οι παίκτες μπορούν να έχουν μια διαδοχική αλληλεπίδραση, που σημαίνει ότι η κίνηση ενός παίκτη εξαρτάται από την κίνηση του άλλου παίκτη. Αυτά τα παίγνια ονομάζονται δυναμικά.

Αναφερόμαστε σε ένα παίγνιο με τέλειες πληροφορίες, εάν οι παίκτες έχουν τέλεια γνώση όλων των προηγούμενων κινήσεων του παιγνίου οποιαδήποτε στιγμή πρέπει να κάνουν μια νέα κίνηση. Η αναπαράσταση των δυναμικών παιγνίων γίνεται με την μορφή ενός δέντρου με διακλαδώσεις, το κάθε επίπεδο του δέντρου αναπαριστά τις κινήσεις του ενός παίκτη, για παράδειγμα, στο επίπεδο ένα οι κινήσεις του παίκτη ένα, στο επίπεδο δύο οι κινήσεις του παίκτη δύο κλπ αναλόγως με την επιλογή του κάθε παίκτη, θα ολοκληρωθεί το παίγνιο φθάνοντας ο παίκτης στο τελικό κλαδί [63].

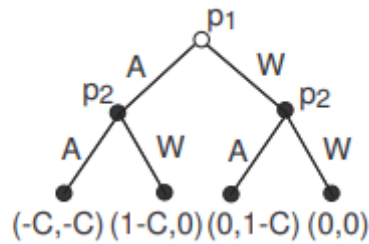
3.7.4 Εκτεταμένη μορφή με τέλεια πληροφορία

Στην εκτεταμένη μορφή, το παίγνιο παριστάνεται ως δέντρο, όπου η ρίζα του δέντρου είναι η αρχή του παιγνίου και εμφανίζεται με κενό κύκλο. Οι κόμβοι ενός δέντρου, που σημειώνονται με n και έναν γεμάτο κύκλο, δείχνουν το πιθανό ξεδίπλωμα του παιγνίου που σημαίνει ότι αντιπροσωπεύουν τη σχέση αλληλουχίας των κινήσεων των παικτών. Αυτή η ακολουθία κινήσεων καθορίζει μια διαδρομή στο δέντρο και αναφέρεται ως η ιστορία h του παιγνίου. Υποτίθεται γενικά ότι ένας μόνο παίκτης μπορεί να κινηθεί όταν το παίγνιο είναι σε ένα δεδομένο κόμβο. Αυτός ο παίκτης αντιπροσωπεύεται ως ετικέτα

στον κόμβο. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό είναι ένα δέντρο, επομένως κάθε κόμβος είναι μια πλήρης περιγραφή της διαδρομής που προηγείται (δηλαδή, κάθε κόμβος έχει ένα μοναδικό ιστορικό). Οι κινήσεις που οδηγούν σε έναν δεδομένο κόμβο παρουσιάζονται σε κάθε κλάδο του δέντρου. Κάθε τερματικός κόμβος (δηλαδή φύλλο) του δέντρου ορίζει ένα πιθανό τέλος του παιγνίου που ονομάζεται αποτέλεσμα και του αποδίδονται οι αντίστοιχες αποδόσεις [64].

Επιπλέον, θεωρούνται παίγνια με πεπερασμένο ορίζοντα, που σημαίνει ότι υπάρχει ένας πεπερασμένος αριθμός σταδίων. Διαφορετικά, αποκαλείται «παίγνιο άπειρου ορίζοντα». Η εκτεταμένη μορφή είναι μια πιο βολική αναπαράσταση, αλλά ουσιαστικά κάθε εκτεταμένη μορφή μπορεί να μετατραπεί σε στρατηγική μορφή και αντίστροφα. Ωστόσο, εκτεταμένα παίγνια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν διαδοχικές αλληλεπιδράσεις πιο εύκολα από παίγνια στρατηγικής μορφής. Σε εκτεταμένη μορφή, η στρατηγική του παίκτη i εκχωρεί μια κίνηση: σε κάθε μη τερματικό κόμβο στο δέντρο του παιγνίου με την ιστορία h όπου ο παίκτης i πρέπει να κινηθεί. Οι στρατηγικές ορίζουν μια ισορροπία Nash [65]. Για να απεικονίσουμε αυτές τις έννοιες θα εξεταστεί το παίγνιο διαδοχικής πολλαπλής προσπέλασης. Αυτή είναι μια τροποποιημένη έκδοση του παιγνίου πολλαπλής προσπέλασης, υποθέτοντας ότι το $p1$ κινείται πάντοτε πρώτα (δηλ. προσπελάσεις ή όχι) και το $p2$ παρατηρεί την κίνηση του $p1$ πριν κάνει τη δική του κίνηση.

Αυτό το εκτεταμένο παίγνιο με τέλεια πληροφορία παρουσιάζεται στην εικόνα 6. Σε αυτό η στρατηγική του παίκτη $p1$ είναι να έχει πρόσβαση στο κανάλι (A) ή να περιμένει (W). Αλλά η στρατηγική του παίκτη $p2$ πρέπει να καθορίσει μια κίνηση δεδομένης της προηγούμενης κίνησης του παίκτη $p1$. Έτσι, οι πιθανές στρατηγικές του $p2$ είναι οι AA, AW, WA και WW, όπου για παράδειγμα το AW σημαίνει ότι ο παίκτης $p2$ προσεγγίζει εάν το $p1$ κάνει το ίδιο και περιμένει εάν το $p1$ περιμένει επίσης. Έτσι μπορούμε να προσδιορίσουμε την ισορροπία Nash με καθαρή στρατηγική στο παίγνιο διαδοχικής πολλαπλής προσπέλασης. Αποδεικνύεται ότι υπάρχουν τρεις ισορροπίες Nash με καθαρή στρατηγική: (A, W A), (A, WW) και (W, AA).



Εικόνα 4 Εκτεταμένο παίγνιο

3.7.5 Nash Equilibria σε παίγνια

Αρχικά λύνεται το πεπερασμένο δίλημμα επαναλαμβανόμενου προωθητή χρησιμοποιώντας την έννοια της ισορροπίας Nash. Υποθέτουμε ότι οι παίκτες είναι μακροχρόνιοι και θέλουν να μεγιστοποιήσουν τη συνολική πληρωμή τους (το αποτέλεσμα του παιγνίου). Όμως, είναι ανέφικτο να υπολογιστεί η ισορροπία Nash με βάση στρατηγικές που είναι αμοιβαίες καλύτερες αντιδράσεις μεταξύ τους καθώς ο αριθμός των σταδίων αυξάνεται. Παρ'όλα αυτά, είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η έννοια της τελειότητας [66].

Επειδή το παίγνιο είναι πλήρους ενημέρωσης, οι παίκτες γνωρίζουν το τέλος του. Τώρα στο τελευταίο στάδιο του παιγνίου, και οι δύο καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η κυρίαρχη στρατηγική τους είναι να ρίξουν το πακέτο του αντιπάλου (δηλ. να παίξουν D). Με δεδομένο αυτό το επιχείρημα, η καλύτερη στρατηγική τους είναι να παίξουν D στο προτελευταίο στάδιο. Ακολουθώντας το ίδιο επιχείρημα, αυτή η τεχνική της καθυστερημένης επαγωγής υπαγορεύει ότι οι παίκτες πρέπει να επιλέξουν μια στρατηγική που παίζει D σε κάθε στάδιο.

Υπάρχουν πολλές στρατηγικές με αυτήν την ιδιότητα. Σε επαναλαμβανόμενα παίγνια γενικά, είναι υπολογιστικά ανέφικτο να λαμβάνονται υπόψη όλες οι πιθανές στρατηγικές για κάθε πιθανό ιστορικό, επειδή ο χώρος της στρατηγικής αυξάνεται εκθετικά με το μήκος του παιγνίου. Ως εκ τούτου, συνήθως περιορίζεται ο χώρος της στρατηγικής σε ένα εύλογο υποσύνολο. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη οικογένεια στρατηγικών είναι οι στρατηγικές της ιστορίας -1. Αυτές οι στρατηγικές λαμβάνουν υπόψη μόνο τις κινήσεις των αντιπάλων στο προηγούμενο στάδιο (που σημαίνει ότι είναι «ξεχασμένες» στρατηγικές, γιατί «ξεχνούν» την προηγούμενη συμπεριφορά του αντιπάλου) [67].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΠΑΙΓΝΙΩΝ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

4.1 Εφαρμογές της Θεωρίας Παιγνίων στις τηλεπικοινωνίες

Όταν χρησιμοποιείται η θεωρία Παιγνίων στο ετερογενές ασύρματο περιβάλλον, πολλές προκλήσεις και ζητήματα μπορούν να επιλυθούν, τα οποία αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.



Εικόνα 7 Προκλήσεις Της Θεωρίας Παιγνίων(Πηγή:[93])

4.1.1 Συνεταιριστική ή μη συνεταιριστική προσέγγιση

Το περιβάλλον 4G/5G στοχεύει να προσφέρει ένα συνδυασμό ετερογενών δικτύων, τεματικών και υπηρεσιών. Σε αυτό το περιβάλλον πολλαπλών χρηστών, οι χρήστες

που διαθέτουν ασύρματες κινητές συσκευές πολλαπλών λειτουργιών θα έχουν τη δυνατότητα σύνδεσης σε ένα ή περισσότερα δίκτυα πρόσβασης, τα οποία διαφέρουν ως προς την τεχνολογία, το εύρος κάλυψης, το διαθέσιμο εύρος ζώνης και τον πάροχο υπηρεσιών.

Σε αυτό το πλαίσιο, οι προσεγγίσεις της Θεωρίας Παιγνίων χρησιμοποιήθηκαν κατά παράδοση για να μοντελοποιηθούν και να αναλυθεί η συνεταιριστική ή ανταγωνιστική αλληλεπίδραση μεταξύ των λογικών υπευθύνων λήψης αποφάσεων, των εκπροσώπων και των φορέων εκμετάλλευσης δικτύων. Μία από τις πρώτες προκλήσεις είναι να προσδιοριστούν οι παίκτες και να διαμορφωθεί το πρόβλημα με το κατάλληλο συνεταιριστικό ή μη παίγνιο. Οι παίκτες, οι στρατηγικές που είναι διαθέσιμες σε κάθε παίκτη και οι στόχοι τους πρέπει να είναι σαφώς προσδιορισμένοι, καθώς αντιπροσωπεύουν τα βασικά συστατικά με καθοριστικούς ρόλους στο παίγνιο.

Η Θεωρία Παιγνίων λειτουργεί με βάση την ορθολογικότητα, πράγμα που σημαίνει ότι υποτίθεται ότι οι παίκτες ενεργούν με βάση τους στόχους τους. Όταν ως παίκτες ορίζονται οι πάροχοι υπηρεσιών, το κύριο ενδιαφέρον τους είναι να προσπαθήσουν να αυξήσουν τα έσοδά τους αυξάνοντας τον αριθμό των πελατών τους, ενώ οι χρήστες αναμένουν να αποκτήσουν την ποιότητα των υπηρεσιών που πληρώνουν. Εξετάζοντας το ετερογενές ασύρματο περιβάλλον, οι παίκτες εκπροσωπούνται από οντότητες (τερματικά) στα δίκτυα, τα οποία θεωρούνται λογικά. Ωστόσο, δεν μπορεί πάντοτε να διασφαλιστεί ότι οι εν λόγω οντότητες θα ενεργήσουν με ορθολογικό τρόπο.

4.1.2 Συναρτήσεις χρησιμότητας

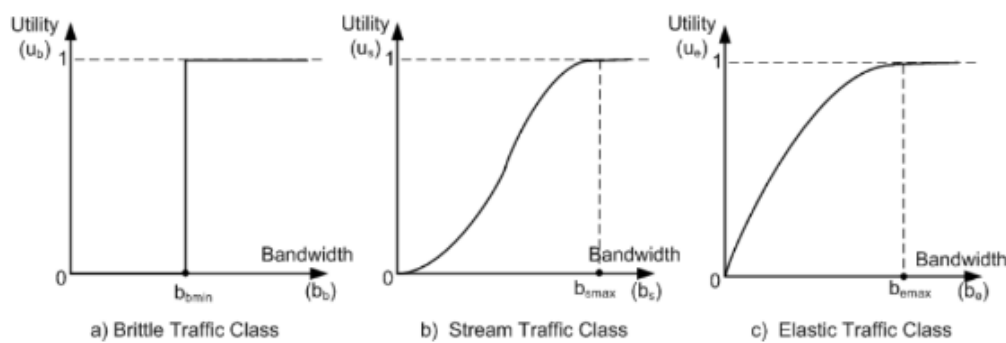
Η επιλογή της συνάρτησης χρησιμότητας θεωρώντας κάποια συνάρτηση χρησιμότητας είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό, που επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο οι παίκτες θα επιλέξουν τη στρατηγική του παιγνίου. Η συνάρτηση χρησιμότητας σχηματίζεται για να περιγράψει την αντίληψη του παίκτη αναφορικά με την απόδοση και την ικανοποίηση.

Συγκεκριμένα, εκφράζει το συμβιβασμό που ο χρήστης είναι πρόθυμος να πραγματοποιήσει μεταξύ της απόκτησης περισσότερων πόρων εύρους ζώνης και της εξοικονόμησης πόρων (κυρίως χρημάτων, ενέργειας κλπ.). Όλες οι υπάρχουσες προσεγγίσεις έχουν κοινό στόχο τη βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας του δικτύου μεγιστοποιώντας την τιμή της συνάρτησης χρησιμότητας.

Λόγω της ετερογένειας των πολιτικών τιμολόγησης, που αφορά έναν τεράστιο αριθμό εφαρμογών με διαφορετικές απαιτήσεις, ο ακριβής προσδιορισμός μιας συνάρτησης

χρησιμότητας καθίσταται πολύ περίπλοκος. Ενδεικτικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το εξής παράδειγμα, όπου ένας πάροχος διαφοροποιεί την κυκλοφορία σε τρεις κλάσεις (αυστηρών απαιτήσεων, ροής βίντεο και ελαστικών απαιτήσεων) και προτείνει τη χρήση μιας συνάρτησης χρησιμότητας για κάθε κλάση, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 8. Η κίνηση στην κλάση αυστηρών απαιτήσεων αφορά τη μετάδοση σε πραγματικό χρόνο εφαρμογών όπως τηλεφωνία, βίντεο, τηλεϊατρική, συναλλαγές δεδομένων υψηλής ασφάλειας κλπ. Αυτός ο τύπος μεταφοράς δεν επιτρέπεται να εισέλθει στο δίκτυο εάν δεν πληρούνται οι βασικές απαιτήσεις [68].

Η μαθηματική απεικόνιση της συνάρτησης χρησιμότητας είναι απλή, που δίνεται στην παρακάτω εξίσωση. Συνήθως οι χρήστες αυτού του τύπου μεταφορών ενδιαφέρονται μόνο σε QoS υψηλού επιπέδου, οπότε το βοηθητικό πρόγραμμα θα είναι 1. Εάν το δίκτυο δεν μπορεί να εκπληρώσει τις απαιτήσεις, το βοηθητικό πρόγραμμα θα είναι 0.



Εικόνα 8 Λειτουργίες Χρησιμότητας Για Διαφορετικές Κατηγορίες Μετακίνησης

$$u_b(b_b) = \begin{cases} 1, & b_b \geq b_{bmin} \\ 0, & b_b < b_{bmin} \end{cases}$$

4.1.3 Τιμολόγηση

Το περιβάλλον πολλών χρηστών, πολλαπλών χρήσεων, εφαρμογών και παρόχων δημιουργεί αυξανόμενες απαιτήσεις αναφορικά με τον όγκο ασύρματων δεδομένων απαιτώντας ευελιξία, επεκτασιμότητα και αποτελεσματικότητα. Σε δίκτυα κινητής τηλεπικοινωνίας τα μοντέλα χρέωσης αποτελούνται κυρίως από την τιμολόγηση βάσει χρόνου και όγκου.

Λαμβάνοντας υπόψιν την ανταγωνιστική αγορά, οι πάροχοι ασύρματων δικτύων ακολουθούσαν το μοντέλο «όλοι μπορείτε να καταναλώσετε». Η κατ'αποκοπή

τιμολόγηση λειτουργεί όσο και αν η χρήση στο δίκτυο είναι λογική. Σήμερα, με την εκθετική αύξηση της μεταφοράς δεδομένων, περισσότεροι πάροχοι άρχισαν να υιοθετούν εκ νέου ένα σύστημα τιμολόγησης βασισμένο στη χρήση (π.χ. η AT & T μεταφέρθηκε σε ένα κλιμακωτό μοντέλο) [69]. Εάν όλο και περισσότεροι πάροχοι ασύρματου δικτύου υιοθετήσουν το μοντέλο που βασίζεται στη χρήση, τότε θα προσελκύσουν τους πιο απαιτητικούς χρήστες δεδομένων οδηγώντας σε σημαντική αύξηση της κίνησης στα δίκτυά τους.

Εξετάζοντας το εύρος των παραμέτρων QoS (π.χ. εύρος ζώνης, απώλεια πακέτων καθυστέρηση, jitter κλπ.), θεωρείται ότι το εύρος ζώνης είναι σχετικό με το φορτίο παρόλο που άλλες παράμετροι είναι εξίσου σημαντικές. Για παράδειγμα, με την αυξανόμενη δημοφιλία των εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο, η καθυστέρηση είναι κρίσιμης σημασίας. Η μετάβαση προς το σύστημα 4G δημιούργησε σημαντικές προκλήσεις για τους μηχανισμούς τιμολόγησης:

Πολλαπλοί πάροχοι υπηρεσιών: Στο 4G, οι χρήστες μπορούν να περιπλανηθούν ελεύθερα μεταξύ διαφορετικών παρόχων υπηρεσιών. Η κατάσταση αυτή απαιτεί έναν πιο προηγμένο μηχανισμό τιμολόγησης και χρέωσης. Διάφορες έρευνες [70] διερευνούν τη δημιουργία συνασπισμών μεταξύ παρόχων υπηρεσιών προκειμένου να μοιραστούν τους πόρους. Οι συγγραφείς στο [71] προτείνουν δύο περιπτώσεις για την κατανομή των απολαβών μεταξύ των μελών των συνασπισμών. Στην πρώτη περίπτωση προτείνουν τη χρήση μη μεταβιβάσιμων κερδών, που σημαίνει ότι οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύου πρόσβασης, μέλη του συνασπισμού, λαμβάνουν μια σταθερή αποζημίωση με βάση τη συνεισφορά των πόρων τους. Στη δεύτερη περίπτωση, κάνουν χρήση των μεταβιβάσιμων απολαβών στις οποίες τα μέλη ενός συνασπισμού μπορούν να κάνουν πληρωμές σε άλλα μέλη για να προσελκύσουν άλλους παίκτες στο συνασπισμό.

Πολλαπλές RAT: Η συνύπαρξη πολλαπλών RATs με τον ίδιο πάροχο υπηρεσιών αποτελεί μια ακόμα πρόκληση για τα μοντέλα τιμολόγησης. Τα RATs διαφέρουν σε περιοχή κάλυψης, χωρητικότητα, QoS, προσφερόμενη ταχύτητα, υποστήριξη κινητικότητας κλπ. Επιπλέον, οι χρήστες που είναι εξοπλισμένοι με ένα τερματικό πολλαπλών λειτουργιών μπορούν να συνδέονται ταυτόχρονα με διαφορετικά RATs [72].

4.1.4 Κατανάλωση ενέργειας

Όταν εξετάζεται η κατανάλωση ενέργειας μιας κινητής συσκευής πολλαπλών διεπαφών μια σημαντική πτυχή είναι η επιτυγχανόμενη συνδεσιμότητα. Η κινητή συσκευή πολλαπλών διεπαφών διαθέτει ταυτόχρονες συνδέσεις με τις απαιτήσεις εύρους ζώνης να διαχωρίζονται μεταξύ των πολλαπλών δικτύων. Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, οι ταυτόχρονες συνδέσεις εξαντλούν ταχύτερα την μπαταρία της κινητής συσκευής. Όσον αφορά το οικονομικό κόστος, οι ταυτόχρονες συνδέσεις συνεπάγονται πιο πολύπλοκα συστήματα τιμολόγησης για τους παρόχους [73].

4.1.5 Πολλαπλοί πάροχοι και τεχνολογίες

Μια άλλη πρόκληση, όταν σχεδιάζεται ένα συνεταιριστικό ή μη παίγνιο, προέρχεται από την εξέταση ενός ή πολλών παρόχων. Μερικά από τα σχετικά συνεταιριστικά παίγνια στο χώρο ερευνούν τη δημιουργία συνασπισμών μεταξύ των διαφόρων παρόχων. Στην έρευνα [35] οι συγγραφείς προβλέπουν ένα ενιαίο περιβάλλον στο οποίο οι πάροχοι δικτύων θα συνεργαστούν για να συνδυάσουν και να μοιραστούν τους πόρους τους και να παράσχουν στον τελικό χρήστη βελτιωμένη συνδεσιμότητα.

Τα δίκτυα πρόσβασης σχηματίζουν έναν συνασπισμό και προσφέρουν τις διαθέσιμες πηγές τους με αντάλλαγμα κάποιο όφελος, που καθορίζεται από μια λειτουργία τιμολόγησης. Στην έρευνα [37] οι συγγραφείς υποθέτουν ότι οι διαφορετικοί φορείς εκμετάλλευσης δικτύων βρίσκονται σε συμβατικές συμφωνίες μεταξύ τους για να μοιράζονται πόρους. Ένας χρήστης θεωρείται ότι έχει συμβατική συμφωνία με έναν πάροχο που χειρίζεται έναν αριθμό από RATs. Ο πάροχος θα κατανείμει αρχικά τις αιτήσεις παροχής υπηρεσιών στα ίδια του τα RAT, εάν η ζήτηση υπερβεί την προσφορά τότε θα ζητήσει πρόσθετο εύρος ζώνης από ξένους παρόχους που διαθέτουν RATs στην ίδια περιοχή.

Η επίτευξη ενός τέτοιου σεναρίου στον πραγματικό κόσμο των τηλεπικοινωνιών, όπου ο ανταγωνισμός μεταξύ των επιχειρήσεων είναι έντονος, αμφισβητείται σε σημαντικό βαθμό. Επιπλέον, η εμβέλεια κάλυψης και οι πληροφορίες λειτουργίας θεωρούνται ότι είναι θεμελιωδώς εμπιστευτικές για τους παρόχους. Για παράδειγμα, στις [30], [31], οι συγγραφείς υποθέτουν την ύπαρξη υπηρεσίας πληροφόρησης που παρέχεται στο σύστημα, το οποίο παρέχει πληροφορίες σχετικά με τα διαθέσιμα AP και τους συνδεδεμένους χρήστες τους. Θα ήταν ασυνήθιστο οι πάροχοι να είναι πρόθυμοι να

παράσχουν τέτοιες πληροφορίες. Οι υπάρχουσες λύσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε μεμονωμένες ή πολλαπλές μορφές τεχνολογιών δικτύου πρόσβασης. Συγκεκριμένα, στις έρευνες [29], [30], [31], [35] ισχύουν μόνο για δίκτυα WLAN, στην [36], ισχύουν για κυψελωτά, στην [40] ισχύουν μόνο για δίκτυα CDMA.

4.1.6 Επιπτώσεις στους χρήστες

Η εμπλοκή του χρήστη στο μηχανισμό λήψης αποφάσεων βασίζεται στην ιδέα ότι προκειμένου να παρασχεθεί μια καλή λύση, αν όχι η καλύτερη για τον πελάτη, οι πάροχοι υπηρεσιών θα πρέπει να γνωρίζουν τι ακριβώς χρειάζεται ο κάθε πελάτης και πού βρίσκεται το πραγματικό πρόβλημα. Δεδομένου ότι οι προτιμήσεις των χρηστών διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον μηχανισμό λήψης αποφάσεων, μια άλλη σημαντική πτυχή είναι η έκφραση των εκάστοτε επιπτώσεων στους χρήστες.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι συλλογής δεδομένων από τον χρήστη. Μερικές από τις προτεινόμενες λύσεις επεξεργάζονται τον χρήστη για κάποιες απαιτούμενες ρυθμίσεις που μετατρέπονται σε βάρη για τις παραμέτρους των δικτύων [33]. Η λύση που προτείνεται στο [37] ενσωματώνει ένα γραφικό περιβάλλον χρήστη στο τερματικό του προκειμένου να συλλέξει τις προτιμήσεις των χρηστών στις ακόλουθες εισόδους: Κλάση αιτήματος υπηρεσίας (Δεδομένα, Βίντεο, Φωνή), Προτιμώμενη ποιότητα υπηρεσίας (Άριστη, Καλή, μέτρια), Μέγιστη τιμή εξυπηρέτησης.

Η συλλογή δεδομένων μπορεί να καταστεί ενοχλητική ή ακόμα και επεμβατική για τον χρήστη, καθώς ο μηχανισμός λήψης αποφάσεων δεν είναι πλέον διαφανής. Είναι πολύ σημαντικό να βρεθεί μια ανταλλαγή μεταξύ του κόστους της συμμετοχής του χρήστη και τον μηχανισμό απόφασης. Μία λύση για την ελαχιστοποίηση της αλληλεπίδρασης των χρηστών μπορεί να είναι η εφαρμογή ενός έξυπνου μηχανισμού μάθησης που θα μπορούσε να προβλέψει τις προτιμήσεις των χρηστών με την πάροδο του χρόνου.

4.1.7 Πολυπλοκότητα και πραγματικά σενάρια

Γενικά, οι προτεινόμενες λύσεις ελέγχθηκαν με έντονη αριθμητική ανάλυση ή προσομοιώσεις που υποδηλώνουν την απλοποίηση του ασύρματου περιβάλλοντος. Δεν προτάθηκαν δοκιμαστικά κλιμάκια πραγματικού κόσμου. Η εφαρμογή στο πραγματικό κόσμο είναι αμφισβητήσιμη. Ορισμένες λύσεις απαιτούν την ανάπτυξη εξωτερικών οντοτήτων. Για παράδειγμα, στην έρευνα [9] η ανάπτυξη του κεντρικού συντονιστή

ράδιο-φάσματος, στο δίκτυο, απαιτεί να διαχωριστούν οι διαθέσιμοι πόροι μεταξύ των ανταγωνιστών.

Στην [34] χρησιμοποιείται ένας κεντρικός πράκτορας για την κατανομή των πόρων βάσει των προσφορών των χρηστών. Η προσθήκη νέου εξοπλισμού σε ένα ήδη ολοκληρωμένο δίκτυο μπορεί να μην είναι μια καλή λύση. Οι συγγραφείς στις [30], [31] κάνουν χρήση της ύπαρξης μιας υπηρεσίας που αναπτύσσεται σε ένα σύστημα που παρέχει πληροφορίες σχετικά με την τοποθεσία και το φορτίο των AP.

Σε ένα σενάριο πραγματικού κόσμου, λαμβάνοντας υπόψη την ανταγωνιστική αγορά, οι φορείς εκμετάλλευσης δεν θα είναι διατεθειμένοι να παράσχουν πληροφορίες χωρίς να έχουν σαφές όφελος από αυτό.

Μια άλλη σημαντική πτυχή κατά τη χρήση της θεωρίας Παιγνίων σε ένα ετερογενές και πολύπλοκο περιβάλλον είναι ο κίνδυνος της μη ομαλής λειτουργίας των χρηστών, όπου ένας χρήστης προσπαθώντας να επιτύχει τη μέγιστη απόδοση σε σχέση με τους άλλους οδηγεί σε συνολική υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος. Μια έρευνα σχετικά με τις απειλές ασφάλειας για τα δίκτυα 4G παρουσιάζεται στο [39]. Συγκεκριμένα, λόγω των αντιφατικών συμφερόντων μεταξύ των παρόχων υπηρεσιών και των χρηστών απαιτούνται διαφορετικές ανάγκες ασφάλειας. Από τη μία πλευρά, οι πάροχοι υπηρεσιών ανταγωνίζονται προκειμένου να μεγιστοποιήσουν τα δικά τους έσοδα κερδίζοντας περισσότερους πελάτες. Από την άλλη πλευρά, οι χρήστες ανταγωνίζονται με καθένα από αυτούς να επιδιώκει την καλύτερη εξυπηρέτηση/απόδοση. Σε αυτό το σενάριο μπορεί να εντοπιστούν διάφορες απειλές: αποκάλυψη, καταστροφή, απώλεια, διαφθορά ή τροποποίηση των πληροφοριών ή άλλων πόρων.

Για παράδειγμα, συστήματα πολλαπλών εφαρμογών βασίζονται στη συνεργασία. Σε αυτούς τους τύπους συστημάτων υπολογίζεται μια συνολική φήμη με βάση τις πληροφορίες που συλλέγονται από πολλές οντότητες. Στο πλαίσιο αυτό, το επίπεδο εμπιστοσύνης κάθε οντότητας αντιμετωπίζεται προκειμένου να αποφευχθεί μια δόλια συμπεριφορά, παρέχοντας ψευδή στοιχεία που θα μπορούσαν να αυξήσουν ή να μειώσουν τη φήμη μιας οντότητας.

Στην έρευνα [35], εξέτασαν το πρόβλημα της επιλογής ενός πάροχου υπηρεσιών ασύρματου Internet (WISP) όταν υπάρχουν πολλοί πάροχοι υπηρεσιών. Οι συντάκτες προτείνουν την ενσωμάτωση μιας Trusted Central Authority (TCA) σε ένα περιβάλλον Wi-Fi. Όλες οι WISPs θα εγγραφούν στο TCA, το οποίο θα συλλέγει περιοδικά ανατροφοδότηση για κάθε WISP προκειμένου να ενημερώσει τα αρχεία καταχώρησης.

Οι συγγραφείς παρέχουν επίσης λεπτομερή ανάλυση κινδύνων. Έχουν εντοπίσει οκτώ συγκεκριμένες επιθέσεις όπως απόρριψη πακέτων και φιλτράρισμα και επανάληψη επιθέσεων. Καθώς η τεχνολογία προχωρά, οι πάροχοι δικτύων θέλουν να υιοθετήσουν νέες αρχιτεκτονικές που συμβάλλουν στην απλοποίηση των πραγμάτων, επιτρέποντας την ταχεία ανάπτυξη υπηρεσιών και εφαρμογών.

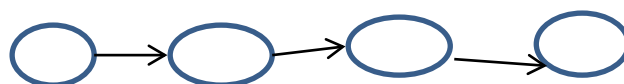
Τα δίκτυα επικοινωνίας δεδομένων εξελίσσονται, ακολουθώντας μια κοινή και παγκόσμια τάση: οι υπηρεσίες και τα σχετικά δεδομένα, τα οποία ήταν προηγουμένως μοναδικά διαθέσιμα στα κέντρα δεδομένων cloud, καθίστανται άμεσα προσβάσιμα από την άκρη του δικτύου [20]. Συνεπώς, υπάρχει μια ομαλή αλλαγή στο μοντέλο δικτύου: από τη συγκεντρωτική μορφή που βασίζεται στο cloud, σε ένα συμπληρωματικό που είναι πολύ πιο κατανεμημένο και βασίζεται σε Fog ή Mobile Edge Computing (FC ή MEC). Ορισμένα πλεονεκτήματα της υιοθέτησης ενός σχεδιασμού συστήματος που ενσωματώνει τις συσκευές FC αφορούν στη μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης των δεδομένων και στην τήρηση των σχετικών απαιτήσεων των υπηρεσιών. Η καθυστέρηση μειώνεται επειδή τόσο τα δεδομένα όσο και οι υπηρεσίες είναι πολύ πλησιέστερα στους τελικούς χρήστες, δηλαδή το πεδίο εφαρμογής του συστήματος αλλάζει από συνολική σε τοπική διαχείριση και επομένως μειώνεται ο χρόνος της μετάδοσης (round trip time - RTT). Επιπλέον, μπορεί να μειωθεί ο φόρτος της οπίσθιας ζεύξης.

Ταυτόχρονα, λόγω της εμφάνισης του IoT, το οποίο επιτρέπει ουσιαστικά σε κάθε συσκευή με επεξεργαστή να επικοινωνεί με την υπόλοιπη υποδομή δικτύου, καθίσταται δυνατή η σταδιακή ενσωμάτωση του IoT στην υποδομή του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί κανείς να προβλέψει ότι, πολύ σύντομα, νέες τερματικές συσκευές θα εμφανίζονται σε κάθε τομέα δικτύου εκτός από τις υπάρχουσες. Αυτές οι νέες τερματικές συσκευές θα είναι διαφορετικού τύπου, όπως: κινητές συσκευές (π.χ. αισθητήρες), μη επανδρωμένα αεροσκάφη (unmanned aerial vehicle - UAV) ή οικιακές συσκευές.

4.2 Εφαρμογή μη συνεργατικού παίγνιου

Υποθέτουμε ότι χρειάζεται να εξεταστεί η συσχέτιση τιμών και προσφοράς ποιότητας των ασύρματων δικτύων. Η συσχέτιση αυτή είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την διαχείριση των πόρων επικοινωνίας. Για την πραγματοποίηση της προαναφερόμενης διαδικασίας εξετάζονται τα επίπεδα ισχύος των ασύρματων δικτύων.

Μοντελοποιείται η χρήση αναζητώντας το επίπεδο ικανοποίησης που έχει ο καθένας που χρησιμοποιεί το δίκτυο. Υποτίθεται ότι υπάρχει πρόβλημα ισχύος σε CDMA σύστημα μιας κυψέλης με n χρήστες, σχήμα 1, όπου φυσικά, επιθυμία του εκάστοτε χρήστη είναι φθάσει στα ανώτερα επίπεδα της χρήσης του συστήματος. Εισάγοντας την έννοια της τιμής με στόχο την καλυτέρευση της απόδοσης, χρησιμοποιώντας μη συνεργατικό παίγνιο για τον έλεγχο της ισχύος, διαφαίνονται ισοζύγια [74] .



Σχήμα 1: Κόμβοι στο μη συνεργατικό παίγνιο

Υποτίθεται ότι υπάρχει, μία κυψέλη, στην οποία ο εκάστοτε χρήστης στέλνει Λ bits πληροφορίας σε πακέτα $M\Lambda$ με ρυθμό Rb/s κάνοντας χρήση W ισχύος, ο ρυθμός είναι σταθερός για όλες τις τερματικές συσκευές. Με Π συμβολίζεται η πιθανότητα λήψης χωρίς λάθη (ρυθμός πακέτων χωρίς λάθη). Η Π είναι συνάρτηση σήματος-θορύβου που χαρακτηρίζει την τερματική συσκευή στο σταθμό βάσης και σχετίζεται με χαρακτηριστικά του συστήματος όπως τη διαμόρφωση και τις απώλειες διάδοσης. Η συνάρτηση χρησιμότητας ορίζεται ως εξής:

$$U = \frac{\Lambda \cdot R \cdot \Pi}{W} \quad \text{bits/joule}$$

Αν υποθεθεί ότι τα λάθη εντοπίστηκαν εξολοκλήρου και δεν υπήρξε καμία διόρθωση τότε, μπορεί να εκφραστεί ο ρυθμός πακέτων χωρίς λάθη με $M \Pi \Pi_1 = 0$ όπου, Π_1 είναι ο ρυθμός των λανθασμένων bits. Ανεξάρτητα από την διαμόρφωση, ο ρυθμός των λανθασμένων bits είναι μονότονη φθίνουσα ως προς το SIR, ή ο ρυθμός των πακέτων χωρίς λάθη είναι μονότονα αύξουσα ως προς το SIR, άρα, η Π μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση χρήσης του γ και αυτό διότι, η συνάρτηση απόδοσης η οποία ακολουθεί τον τρόπο συμπεριφοράς της πιθανότητας για σωστή λήψη, δίνει $\Pi=0$ και κάνοντας αντικατάσταση παίρνουμε την συνάρτηση της απόδοσης:

$$\Phi(\gamma) = (1 - 2\Pi_1)^2$$

Τέλος, η συνάρτηση χρήσης γίνεται ως εξής:

$$U = \frac{\Lambda * R * \Phi(\gamma)}{W} \text{ bits/joule}$$

Η συνάρτηση χρήσης είναι ο αριθμός των σωστών bits που λήφθηκαν ανά Joule ενέργειας που καταναλώνεται. Κάθε τερματική συσκευή παραμετροποιώντας την ισχύ της σκοπεύει, στην μέγιστη χρήση, αδιαφορώντας τι μπορεί να προκαλέσει στις άλλες συσκευές δια μέσω των παρεμβολών, αυτό, στον οικονομικό τομέα ονομάζεται αλληλεπίδραση παραγωγής, και ως αποτελεσματικό τρόπο αντιμετώπισης του γεγονότος αυτού, θεωρείται η θέσπιση τιμών [75] .

Η θέσπιση τιμών που βασίζεται στη χρήση, δηλαδή, την τιμή που πληρώνει κάθε τερματική συσκευή είναι ανάλογη της ποσότητας πόρων που δαπανά ο εκάστοτε χρήστης, για να βελτιωθούν οι τιμές στη συνάρτηση χρησιμότητας οδηγούμαστε, στο σύστημα θέσπισης τιμών με βάση τη χρήση. Δια μέσω της θέσπισης τιμών βελτιώνεται το σύστημα προκαλώντας, τη συνεργασία, διατηρώντας ταυτόχρονα, την όχι συνεργατική λύση του ελέγχου ισχύος [76] .

Προσδιορίζοντας το σημείο ισορροπίας για κάθε διαφορετική περίπτωση θέσπισης τιμών, ο αλγόριθμος επιλέγει την ισορροπία που είναι πιο αποτελεσματική βασιζόμενος στις τιμές χρήσης που προκύπτουν και συνολική χρήση των εκάστοτε χρηστών. Χρειάζεται, να δοθεί σημασία στους περιορισμούς της μεγαλύτερης ισχύος εκπομπής και στις αναγκαίες συνθήκες προστασίας των πιο μακρινών τερματικών συσκευών διότι αυτές είναι πρώτες υποψήφιες που μπορεί να χάσουν το μικρότερο κατώφλι του λόγου σήματος προς θόρυβο.

Για να γίνουν γνωστές οι τιμές ισορροπίας, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της διχοτόμησης που κάνει αριθμητική ανάλυση, στην ουσία, βρίσκεται το επίπεδο ισχύος που επιθυμούμε, και γίνεται εξίσωση της πρώτης παραγώγου της συνάρτησης χρήσης με το μηδέν. Η διχοτόμηση ως μέθοδος, κάνει αλληπάλληλες δοκιμές για να βρει τις ρίζες των μη γραμμικών εξισώσεων, αν βρεθούν δύο σημεία στο διάστημα, τότε, ισχύει το θεώρημα Boltzano, και εντοπίζεται το διάστημα που βρίσκεται η ρίζα της εξίσωσης αφού προηγουμένως, προηγηθούν συνεχείς επαναλήψεις. Για να εφαρμοστεί η μέθοδος της διχοτόμησης χρειάζεται να ελεγχθεί, η συνέχεια της γραμμικής εξίσωσης της ρίζας στο επιθυμητό πεδίο ορισμού. Στην πορεία βρίσκονται δύο σημεία για παράδειγμα α, β

μέσα από το πεδίο ορισμού της συνεχής μη γραμμικής συνάρτησης, για τα οποία οι τιμές της Φ δεν είναι ομόσημες, ($\Phi(\alpha), \Phi(\beta) < 0$), άρα ισχύει το θεώρημα Boltzono, οπότε η ρίζα της εξίσωσης είναι στο διάστημα αυτό.

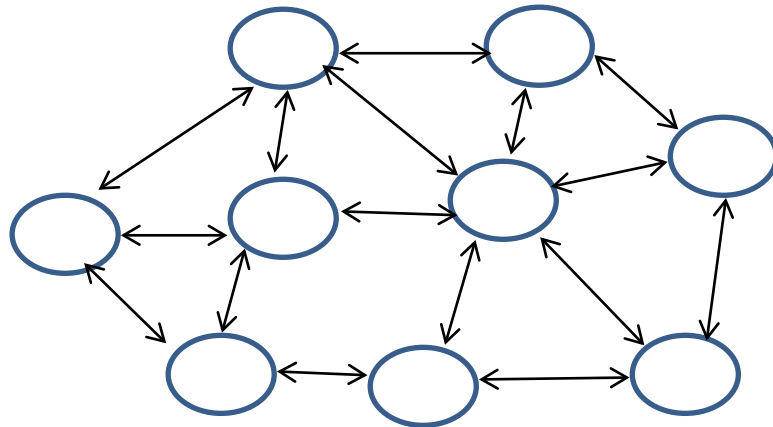
Έπειτα, υπολογίστηκε το μέσο των σημείων α, β , $\mu = (\alpha + \beta) / 2$, κατόπιν, υπολογίστηκε το $\Phi(\mu)$ και σε συνάρτηση με το πρόσημο της εντοπίζεται η νέα περιοχή του διαστήματος στην οποία ήταν η ρίζα και ήταν (α, μ) αν $\Phi(\alpha), \Phi(\mu) < 0$ ή το (μ, β) αν $\Phi(\mu), \Phi(\beta) < 0$. Κατόπιν επαναλαμβάνεται η διαδικασία για τον εντοπισμό της ρίζας σε ολοένα και πιο μικρό τμήμα διαστήματος που να ανταποκρίνεται στην επίλυση του θέματος.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ισορροπία με θέσπιση τιμών αυξάνοντας τον παράγοντα τιμών κ κατά μία θετική τιμή $\Delta \kappa$ και η οποία καθορίστηκε βάσει της επιθυμητής ακρίβειας. Με βάση τον αλγόριθμο επιστρέφεται στην ισορροπία ένα σύνολο από τιμές ισχύος, αν τώρα οι χρήσεις βελτιωθούν τότε ο παράγοντας τιμών θα αυξηθεί και θα υπάρξει επαναληπτική διαδικασία μέχρι η νέα διαδικασία δώσει χρήσεις κατώτερες τουλάχιστον για ένα χρήστη [77].

Δηλώνεται η τελική τιμή του κ ως η πιο βέλτιστη τιμή της θέσπισης τιμών και ο τρόπος που θεσπίζεται ο βέλτιστος κ είναι ο εξής: α) τίθεται το $\kappa = 0$ και ανακοινώνεται σε όλες τις τερματικές συσκευές, β) λαμβάνεται η συνάρτηση χρήσης και αυξάνεται το $\kappa = \kappa + \Delta$ και ανακοινώνεται σε όλες τις τερματικές συσκευές, γ) αν η συνάρτηση χρήσης κ είναι μικρότερη της συνάρτησης χρήσης $\kappa + \Delta$ τότε ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα β.

4.3 Δεύτερη εφαρμογή της Θεωρίας Παιγνίων

Τα ad-hoc δίκτυα, σχήμα 2, χρησιμοποιούν την μέθοδο της εκπομπής πολλαπλών αναπηδήσεων, διότι διαθέτει καλύτερη ενεργειακή απόδοση, και μπορεί να στέλνει ένας κόμβος μηνύματα ακόμη και σε κόμβους που βρίσκονται εκτός της εμβέλειας του, η καλύτερη ενεργειακή απόδοση οφείλεται στο γεγονός της μετάδοσης των μηνυμάτων σε περισσότερες μικρές διαδρομές παρά σε μεγάλες, ακόμη, οι ενδιάμεσοι κόμβοι που κάνουν αναμετάδοση και επαναπροώθηση του πακέτου μπορεί να θεωρηθεί ότι η παραπάνω ενέργεια είναι δεδομένη, αυτό όμως στην πραγματικότητα δεν συμβαίνει λόγω των περιορισμένων κόμβων οπότε συνεπάγεται απώλεια απόδοσης δικτύου [78].



Σχήμα 2: ad - hoc δίκτυο

Η Θεωρία Παιγνίων συμβάλει στο να γίνει κατανοητή η αλληλεπίδραση, αλλά και ο βαθμός με τον οποίο επιδρά ένας κόμβος στην απόδοση του δικτύου, η παρακάτω εφαρμογή μελετήθηκε από την πλευρά του δικτύου έχοντας ως προϋποθέσεις την σταθερότητα της ισχύς κατά την μετάδοση ενός μηνύματος από τους κόμβους αλλά λαμβάνοντας υπόψιν ότι ένα μήνυμα θεωρείται ως μη υπάρχων από τη στιγμή που ένα σταθμός αρνηθεί να το αναμεταδώσει.

Στην εφαρμογή υποθέτουμε ότι έχουμε δύο κόμβους και δύο πηγές, γίνεται αποστολή μηνύματος από τον καθέναν κόμβο στον επιθυμητό του δέκτη δείχνοντας εμπιστοσύνη στον ενδιάμεσο κόμβο ότι θα αναμεταδώσει τα μηνύματά τους, αν δεν υπάρξει συνεργασία μεταξύ των κόμβων κανένας κόμβος δεν θα μπορέσει να στείλει μηνύματα [79].

Ο κόμβος χ_1 επιθυμεί να στείλει μηνύματα στον ψ_1 δια μέσου του α_2 και ο κόμβος α_2 στον κόμβο β_2 δια μέσου του χ_1 , ως επιλογές διαθέτουν την αποστολή ή τη μη αποστολή των μηνυμάτων, ωφέλεια ονομάζεται η διαφορά του κόστους αποστολής από την ανταμοιβή η οποία ορίζεται ως το κέρδος της επιτυχημένης μετάδοσης του μηνύματος, το κόστος προώθησης είναι σταθερό για όλους τους σταθμούς και συμβολίζεται με σ έχοντας ως εύρος τιμών $(0-1)$, η ανταμοιβή έχει τιμή 1.

Οι κόμβοι θέλουν να βελτιώσουν την ωφέλεια τους, επειδή όμως ισχύει $0 < \sigma < 1$ η πιο λογική απόφαση και για τους δύο σταθμούς είναι η μη προώθηση των μηνυμάτων, διότι η ωφέλεια για τον κόμβο χ_1 είναι σε όλες τις περιπτώσεις πιο καλή, άρα ισχύει:

$Y1 = (\Delta EN \text{ ΠΡΟΩΘΕΙ}, \Delta EN \text{ ΠΡΟΩΘΕΙ}) = 0 > -\sigma = Y1 (\text{ΠΡΟΩΘΕΙ}, \Delta EN \text{ ΠΡΟΩΘΕΙ})$
και

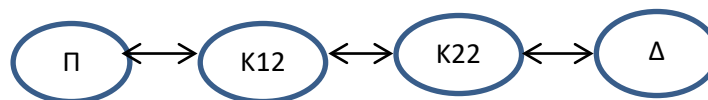
$Y1 = (\Delta EN \text{ ΠΡΟΩΘΕΙ}, \text{ΠΡΟΩΘΕΙ}) = 1 > 1 - \sigma = (\text{ΠΡΟΩΘΕΙ}, \text{ΠΡΟΩΘΕΙ})$.

Λόγω συμμετρίας τα προαναφερόμενα ισχύουν και για τον σταθμό α₂.

Έχει τονιστεί και σε άλλα σημεία της παρούσας διπλωματικής ότι το σύνολο επιλογών το οποίο δεν δίνει περιθώρια σε κανένα κόμβο να αλλάξει στρατηγική ονομάζεται ισορροπία Nash. Το ζεύγος κίνησης (ΔΕΝ ΠΡΟΩΘΕΙ, ΔΕΝ ΠΡΟΩΘΕΙ) αποτελεί το μοναδικό σημείο ισορροπίας, παρά το γεγονός ότι αν οι σταθμοί προτιμούσαν το (ΠΡΟΩΘΕΙ, ΠΡΟΩΘΕΙ) η οποία είναι η ισορροπία κατά Pareto θα αποκόμιζαν καλύτερα αποτελέσματα [80]. Η ισορροπία Pareto μας λέει ότι δεν υπάρχει κανένα άλλο σύνολο προτιμήσεων για την αύξηση της ωφέλειας χωρίς να επηρεάζεται η ωφέλεια του άλλου, επομένως οποιοδήποτε ζευγάρι εκτός του (ΔΕΝ ΠΡΟΩΘΕΙ, ΔΕΝ ΠΡΟΩΘΕΙ) είναι βέλτιστο κατά Pareto.

4.4 Τρίτη εφαρμογή της Θεωρίας Παιγνίων

Στην πολλαπλή πρόσβαση, σχήμα 3, οι δύο κόμβοι επιθυμούν την αποστολή μηνύματος ταυτόχρονα μέσω του ίδιου καναλιού το οποίο όμως επιτρέπει μόνο μία αποστολή.



Σχήμα 3: κόμβοι στο παίγνιο προώθησης πακέτων

Αν υποτεθεί ότι οι δύο κόμβοι είναι πομποί, το σύνολο των επιλογών τους αποτελείται από την αποστολή του μηνύματος και την παραμονή τους σε κατάσταση αδράνειας και έτσι, συμβολίζοντας το κόστος μετάδοσης ως σ με τιμές από 0-1 και η ωφέλεια είναι ίση με το 1, η επιτυχία μια μετάδοσης ισούται με την επιτυχημένη αποστολή αλλά και την παραμονή του άλλου κόμβου σε κατάσταση αδράνειας, ο παρακάτω πίνακας δείχνει τα αποτελέσματα.

Κόμβος2 Κόμβος 1	Εκπομπή	Αδράνεια
Εκπομπή	-σ, -σ	1-σ, 0
Αδράνεια	0,1-σ	0,0

Πίνακας 5: ωφέλεια δύο χρηστών

Το σύνολο ενεργειών 0,1-σ και 1-σ, 0 είναι και οι ισορροπίες Nash, αν και δεν αποτελούν καλύτερες λύσεις και πιο δίκαιες. Η ισορροπία Nash είναι ένα πλαίσιο από επιλογές τέτοιο ώστε κανένας παίκτης να μη υιοθετεί άλλη στρατηγική εκτός από την αρχική. Η πιο δίκαιη λύση θα ήταν η λύση Pareto η οποία μας λέει ότι δεν υφίσταται άλλο σύνολο επιλογών με το οποίο μπορεί ένας παίκτης να αυξήσει το όφελος του χωρίς όμως να μειώσει το όφελος του άλλου παίκτη [81].

4.5 Θεωρία Παιγνίων και D2D τεχνολογία σε 4G δίκτυα

Η ευρεία διάδοση των κινητών συσκευών έχει ως αποτέλεσμα την αυξανόμενη μετάδοση δεδομένων, τις νέες τεχνικές ακύρωσης παρεμβολών, καθώς και τις δυνατότητες υποστήριξης δικτύου. Όλα τα προηγούμενα τονίζουν την ανάγκη για νέα πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης MAC(Medium Access Control), ειδικά στο σεναρίο μετάδοσης δεδομένων όπου όλοι οι κόμβοι έχουν τον ίδιο στόχο. Παρακάτω γίνεται μελέτη της καταλληλότητας της τεχνολογίας Wi-Fi με σενάρια πολλαπλών διαθέσιμων πηγών-κόμβων και προτείνονται δύο παίγνια με στρατηγικές MAC ως πιθανές εναλλακτικές λύσεις.

Τα περισσότερα σημαντικά πλεονεκτήματα της ανταλλαγής δεδομένων στο μη αδειοδοτούμενο φάσμα είναι η αμελητέα παρέμβαση στις κυψελοειδείς συνδέσεις και η μη κατανάλωση των ράδιο-πόρων από τις συνδέσεις D2D. Αυτά τα χαρακτηριστικά, μαζί με την δημοτικότητα του προτύπου IEEE 802.11, έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη του Wi-Fi Direct, που επιτρέπει στις συσκευές να επικοινωνούν με τυπικές Wi-Fi ταχύτητες χωρίς να απαιτείται σημείο ασύρματης πρόσβασης για τη σύνδεσή τους. Ωστόσο, η τοπολογία των σημερινών δικτύων τονίζει την ανάγκη για νέα πρωτόκολλα που επιτρέπουν την

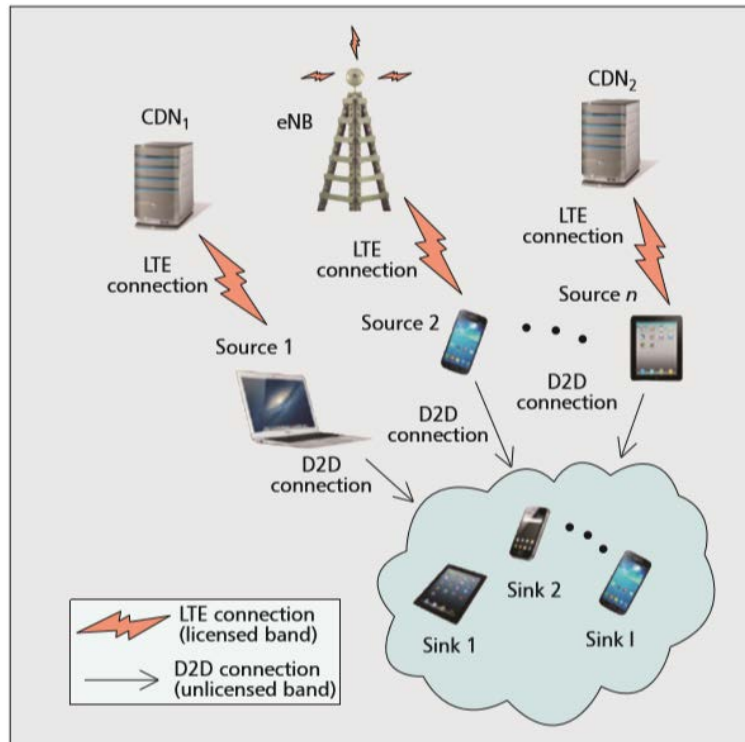
αποτελεσματική και δίκαιη χρήση του εύρους ζώνης του συστήματος στο επίπεδο του ελέγχου πρόσβασης (MAC).

Στην συνέχεια θα γίνει αναφορά σε σενάρια ασύρματης μετάδοσης δεδομένων D2D, όπου ένα σύνολο κόμβων(πηγές) έχουν ήδη λάβει τις πληροφορίες δεδομένων μέσω απευθείας συνδέσεων LTE-A και είναι υπεύθυνοι για την περαιτέρω μετάδοση στους υπόλοιπους ενδιαφερόμενους χρήστες(προορισμοί) μέσω D2D συνδέσεων. Σε τέτοια σενάρια, η ύπαρξη πολλαπλών κόμβων προέλευσης δημιουργούν αντιφατικές καταστάσεις, λαμβάνοντας υπόψιν την εγωιστική συμπεριφορά των ασύρματων συσκευών που θέλουν να εξοικονομήσουν ενέργεια και να μεγιστοποιήσουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας τους. Με βάση τη σημασία της ενεργειακής απόδοσης, θα προταθούν δύο στρατηγικές πρόσβασης Θεωρίας Παιγνίων, ανάλογα με την κατανάλωση ενέργειας:

- Μια κατανεμημένη προσέγγιση για τις επικοινωνίες D2D όπου οι κόμβοι ενεργούν ξεχωριστά.
- Μια συντονισμένη προσέγγιση, όπου ο Σταθμός Βάσης ή εξελεγμένος κόμβος NodeB(eNB) παρεμβαίνει περιστασιακά για να διευκολύνει την διαδικασία μετάδοσης.

4.5.1 Μετάδοση D2D: Σενάρια και προκλήσεις

Η ασύρματη μετάδοση δεδομένων[85] γίνεται όλο και πιο δημοφιλής με την αυξανόμενη διείσδυση των φορητών συσκευών στις ζωές μας. Αυτό αποτελεί το κύριο κίνητρο για την ανάπτυξη των δικτύων CDN(Content Delivery Networks) τα οποία χρησιμοποιούν πολλαπλούς διακομιστές για τη βελτίωση της μετάδοσης δεδομένων. Ως εκ τούτου, οι χρήστες ασύρματων δικτύων μπορούν να επιταχύνουν την πρόσβασή τους στα συγκεκριμένα δεδομένα, με μικρότερη απώλεια πακέτων. Εκτός από τα CDNs, η μετάδοση δεδομένων μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με την εκμετάλλευση της εγγύτητας μεταξύ των χρηστών ειδικά σε πυκνές περιοχές όπως χώροι εργασίας ή μεγάλα κοινωνικά γεγονότα.



Εικόνα 9. Σενάριο διάδοσης περιεχομένου D2D (Πηγή:[92])

Στην Εικόνα 9 απεικονίζεται μια ρεαλιστική ρύθμιση για τη μετάδοση δεδομένων σε κυψελοειδή δίκτυα με τη βοήθεια της τεχνολογίας D2D μεταξύ παρακείμενων χρηστών. Σε αυτό το συγκεκριμένο σενάριο, υπάρχει μια ομάδα χρηστών που ενδιαφέρεται για τη λήψη των ίδιων αρχείων, είτε από το κεντρικό eNB είτε από κατανεμημένα CDNs. Η μετάδοση των δεδομένων πραγματοποιείται σε δύο στάδια: κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου υπάρχουν n χρήστες(πηγές) που κάνουν λήψη των δεδομένων απευθείας από συνδέσεις LTE στο eNB ή στο πλησιέστερο CDN ενώ στο δεύτερο στάδιο οι χρήστες αυτοί μεταδίδουν τις πληροφορίες για τους υπόλοιπους χρήστες i στο δίκτυο, χρησιμοποιώντας τις D2D συνδέσεις.

Παρά τα προφανή πλεονεκτήματα της χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας για τα τερματικά, πολλά ζητήματα προκύπτουν στη δεύτερη φάση της μετάδοσης λόγω της λειτουργίας πολλαπλών πομπών D2D στο μη εξουσιοδοτημένο φάσμα. Συγκεκριμένα, η παρέμβαση μεταξύ της εκπομπής ράδιο-σημάτων επιτρέπει μόνο μία μετάδοση σε κάθε time-slot εμποδίζοντας έτσι την πραγματοποίηση πολλαπλών παράλληλων μεταδόσεων. Για το σκοπό αυτό, η εφαρμογή ενός μηχανισμού MAC είναι απαραίτητη για τον συντονισμό των μεταδόσεων από κόμβους πολλαπλών πηγών στο δίκτυο. Πρόσφατες μελέτες έχουν προσδιορίσει

υπηρεσίες διάγνωσης ως βασικές λειτουργίες στις επικοινωνίες D2D[86]. Αυτή η πληροφορία πλαισίου είναι ακόμα πιο σημαντική σε σενάρια μετάδοσης δεδομένων, όπου πρέπει να γνωρίζουν οι ασύρματες συσκευές την εγγύτητα άλλων συσκευών που είτε μεταδίδουν είτε λαμβάνουν τα ίδια δεδομένα.

Οι προαναφερόμενες βασικές λειτουργίες είναι ένα σημαντικό ζήτημα στα κατανεμημένα δίκτυα, λαμβάνοντας υπόψιν την πολύπλοκη διαδικασία επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών ομότιμων χρηστών. Ειδικότερα, η ανακάλυψη ομότιμων χρηστών χωρίς κεντρική υποστήριξη είναι γενικά πολύ δύσκολη και ενεργειακά απαιτητική διαδικασία, που μπορεί να συνεπάγεται αλληλεπίδραση με τον τελικό χρήστη. Από την άλλη πλευρά, η ύπαρξη μίας κεντρικής οντότητας, όπως το eNB στην τεχνολογία LTE, μπορεί να διευκολύνει σημαντικά την ανακάλυψη ομότιμων χρηστών και την εκμετάλλευση των πληροφοριών πλαισίου[87]. Ως εκ τούτου, η ίδια διαδικασία που υποστηρίζεται από το δίκτυο μπορεί να είναι πιο αποδοτική ενεργειακά και φιλική προς τον χρήστη, ενώ η παρέμβαση ενός κεντρικού ελεγκτή θα μπορούσε επίσης να είναι επωφελής στο επίπεδο MAC της επικοινωνίας D2D.

4.5.2 MAC στρατηγικές για D2D μετάδοση

Η επικράτηση του προτύπου IEEE 802.11 έχει κάνει τα δίκτυα Wi-Fi πρώτη επιλογή για την αποσυμφόρηση της κυκλοφορίας σε κυψελοειδή δίκτυα. Λειτουργεί και στη μη εξουσιοδοτημένη ζώνη με σημαντικά πλεονεκτήματα ασφάλειας, δεδομένου ότι στο D2D οι συνδέσεις ούτε δεσμεύουν τους πόρους του συστήματος ούτε παρεμβαίνουν στις μεταδόσεις LTE. Παρ'όλα αυτά, η συνύπαρξη πολλαπλών κόμβων(πηγών) σε σενάρια μετάδοσης δεδομένων μπορεί να προκαλεί συμφόρηση δικτύου που πρέπει να επιλύεται μέσω κατάλληλων και αποτελεσματικών μηχανισμών MAC. Στη συνέχεια αναφέρονται εν συντομία το πρόσφατα εισαγόμενο Wi-Fi Direct μαζί με το πολύ γνωστό DCF του IEEE 802.11, και προτείνονται δύο MAC στρατηγικές θεωρίας Παιγνίων για γρήγορη και ενεργειακά αποδοτική μετάδοση, εφαρμοσμένη σε κατανεμημένα δίκτυα.

4.5.3 Εξέλιξη WI-FI

Η πιστοποίηση Wi-Fi που εκδίδεται από το Wi-Fi Alliance, εγγυάται τη

συμβατότητα προς τα πίσω και διαλειτουργικότητα μεταξύ των συσκευών χρησιμοποιώντας το πρότυπο IEEE 802.11[88]. Το DCF είναι η βασική τεχνική MAC του IEEE 802.11, με βάση την πολλαπλή πρόσβαση Sense Carrier με μέθοδο αποφυγής σύγκρουσης(Collision Avoidance-CSMA/CA). Σύμφωνα με το DCF απαιτείται ένας σταθμός για να αναγνωρίζει το αδρανές κανάλι για ένα DIFS (DCF Inter-Space-Frame) πριν από την έναρξη μιας μετάδοσης δεδομένων. Εάν το κανάλι είναι απασχολημένο κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος, η μετάδοση αναβάλλεται έως ότου το μέσο ελευθερωθεί. Επιπλέον, όταν τα DIFS περάσουν, ο σταθμός σταματάει την μετάδοση για πρόσθετο τυχαίο χρονικό διάστημα, επιλεγμένο από ένα προκαθορισμένο CW(Contention-Window) προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα σύγκρουσης. Όσον αφορά τον έλεγχο πακέτων, η μετάδοση πραγματοποιείται από τους σταθμούς μετά την ανιχνεύση της αδράνειας του καναλιού για μια SIFS(Short-Inter-Space-Space) χρονική περίοδο, προκειμένου να γίνει διάκριση των προτεραιοτήτων μεταξύ των δεδομένων και του επιπέδου ελέγχου.

Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι τα πακέτα ελέγχου μεταδίδονται συνήθως με χαμηλότερο ρυθμό σε σύγκριση με τα πακέτα δεδομένων, για να μειωθεί η πιθανότητα απώλειας στο ασύρματο μέσο.

Το Wi-Fi Direct επιτρέπει άμεση σύνδεση μεταξύ συσκευών Wi-Fi και διευκολύνει τη μεταφορά περιεχομένου ή την κοινή χρήση σε τυπικές Wi-Fi ταχύτητες[89]. Στην πραγματικότητα, μόνο μία από τις συσκευές πρέπει να υποστηρίζει το Wi-Fi Direct για να αναλάβει το ρόλο ενός σημείου πρόσβασης και τη μετάδοση δεδομένων είτε σε μια άλλη συσκευή είτε σε μια ολόκληρη ομάδα συσκευών(λειτουργία πολλαπλής διανομής). Με αυτόν τον τρόπο, η επικοινωνία διατηρεί όλα τα πλεονεκτήματα του Wi-Fi(ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, εύρος κ.λπ.) και καθίσταται πιο ευέλικτη παρακάμπτοντας την πολυπλοκότητα της κεντρικής λειτουργίας.

Ωστόσο, εξακολουθεί να είναι αμφισβητήσιμο εάν το Wi-Fi Direct είναι κατάλληλο για ασύρματη μετάδοση περιεχομένου D2D πολλαπλών πηγών κυρίως λόγω των πιθανών απρόβλεπτων σεναρίων. Συγκεκριμένα:

- Μόνο ένας από τους κόμβους προέλευσης γίνεται σημείο πρόσβασης και αναλαμβάνει την ευθύνη της μετάδοσης των πληροφοριών στους υπόλοιπους ενδιαφερόμενους χρήστες.

- Όλοι οι κόμβοι προέλευσης συμμετέχουν στη διάδοση του περιεχομένου ακολουθώντας τους κανόνες DCF.

Η πρώτη υπόθεση εγείρει θέματα δικαιοσύνης, δεδομένου ότι ο ρόλος του αποστολέα συνεπάγεται σπατάλη ενέργειας και, ως εκ τούτου, θα ήταν άδικο να έχει ένας κόμβος μετάδοσης τις συνολικές πληροφορίες. Από την άλλη πλευρά, η συμμετοχή όλων των πηγών στη διάδοση φέρει όλα τα μειονεκτήματα του DCF όπως τα αδρανή slots λόγω των μετρητών backoff στο δίκτυο. Επιπλέον, η αποφυγή σύγκρουσης, η οποία είναι το μεγάλο πλεονέκτημα του DCF, τείνει να εξαλειφθεί όσο η τεχνολογία εξελίσσεται, καθιστώντας τις επιπτώσεις των συγκρούσεων αμελητέες για την απόδοση του δικτύου. Για το σκοπό αυτό, τα παρακάτω τμήματα εισάγουν δύο νέες στρατηγικές MAC της Θεωρίας Παιγνίων που ξεπερνούν τον περιορισμό των υφιστάμενων λύσεων.

4.5.4 Μετάδοση D2D με χρήση Θεωρίας Παιγνίων

Την τελευταία δεκαετία έχει προταθεί να ερευνηθεί και να μοντελοποιηθεί το πρόβλημα διαμάχης μέσης πρόσβασης σε ασύρματα δίκτυα. Η συντριπτική πλειοψηφία αυτών των ερευνών επικεντρώνεται στην εκτίμηση του σημείου ισορροπίας Nash (NE) ενός συγκεκριμένου παιγνίου [90], η οποία μπορεί να οριστεί ως η αμοιβαία καλύτερη απάντηση όλων των παικτών. Ως εκ τούτου ένας συνδυασμός στρατηγικής επιτυγχάνεται με την ισορροπία Nash, όπου εάν κανένας παίκτης δεν μπορεί να βελτιώσει την χρησιμότητά του μονομερώς αποκλίνει από την στρατηγική.

Στο σενάριο που ακολουθεί ο στόχος όλων των κόμβων είναι επιτυχής και γίνεται έγκαιρη διάδοση του περιεχομένου. Ωστόσο, όπως έχουμε ήδη αναφέρει ο ρόλος του αποστολέα συνεπάγεται επιπλέον κατανάλωση ενέργειας επομένως πρέπει να παρέχονται ειδικά κίνητρα σε έναν συγκεκριμένο χρήστη προκειμένου να αναλάβει αυτό το ρόλο.

Αντίθετα, αν κανείς δεν μεταδίδει, οι κόμβοι θα σπαταλήσουν όλη τους την ενέργεια σε αδρανή κατάσταση, εμποδίζοντας έτσι την μετάδοση των δεδομένων. Για να γίνει ανάλυση αυτής της αντιφατικής κατάστασης που εκμεταλλεύεται τις πληροφορίες πλαισίου, γίνεται μοντελοποίηση του σεναρίου πρόσβασης ως ένα στατικό μη συνεργατικό παίγνιο με πλήρη πληροφόρηση όπου κάθε χρήστης επιλέγει τη στρατηγική που μεγιστοποιεί τη δική του

χρησιμότητα.

Στην Θεωρία Παιγνίων, ένα παίγνιο Γ αντιπροσωπεύεται από μια πλειάδα

$$\Gamma = (N, (A_i)_{i \in N}, (U_i)_{i \in N})$$

Όπου $N = \{1, \dots, n\}$ είναι το σύνολο των παικτών. Για κάθε παίκτη $i \in N$, A_i είναι ένα πεπερασμένο σύνολο ενεργειών, ενώ το U_i είναι μια συνάρτηση χρησιμότητας δεδομένου ενός συνόλου ενεργειών. Το παίγνιο αποτελείται από n παίκτες (κόμβοι-πηγές) που αποφασίζουν εάν μεταδίδουν ή όχι σε κάθε slot. Επομένως χρησιμοποιούμε τις παρακάτω σημειώσεις για να είναι συμβατές με τους κανόνες της Θεωρίας Παιγνίων:

$$N = \{1, \dots, n\} \text{ και } A_i = \{ \text{Transmit}(T), \text{Wait}(W) \}$$

Επιπλέον, προκειμένου να επικεντρωθεί στην ενεργειακή πτυχή του προβλήματος, η λειτουργία χρησιμότητας έχει επιλεγεί έτσι ώστε να ποσοτικοποιήσει τη διάρκεια ζωής των κόμβων. Ορίζουμε ϵ_{TOTAL} το σύνολο της διαθέσιμης ενέργειας σε κάθε κόμβο και $E[\epsilon_i]$ ως τη μέση ποσότητα ενέργειας που καταναλώνει η ασύρματη διασύνδεση του κόμβου i για κάθε slot. Η συνάρτηση χρησιμότητας του παίκτη i δίνεται από $U_i = (\epsilon_{TOTAL})/(E[\epsilon_i])$.

Η στρατηγική μορφή του προτεινόμενου παιγνίου παρουσιάζεται στον πίνακα 6.

		Player 2 (all the other $n - 1$ nodes)		
Player 1 (node i)	T	T		W
		$\epsilon_T + \epsilon_C$		ϵ_T
	W	Successful transmission	Failed transmission	$\epsilon_W + \epsilon_C$
		ϵ_W	$\epsilon_W + \epsilon_C$	

Πίνακας 6. Στρατηγική μορφή του προτεινόμενου παιγνίου

Η φύση του δικτύου peer-to-peer και η συμμετρία του προβλήματος, μας επιτρέπουν να το διατυπώσουμε ως παίγνιο n -παικτών λαμβάνοντας υπόψιν δύο παίκτες: Ο Παίκτης 1 αντιπροσωπεύει τον κόμβο i , ενώ ο Παίκτης 2 περιλαμβάνει το υπόλοιπο $n - 1$ κόμβων εκτός από τον κόμβο i . Τα περιεχόμενα του πίνακα 6 αντιστοιχούν στο ενεργειακό κόστος του Παίκτη 1 σε σχέση με τα διαφορετικά ενδεχόμενα στο σύνολο του Παίκτη 2. Ειδικότερα, οι τιμές ϵ_t και ϵ_w

αντιπροσωπεύουν τα ποσά ενέργειας που δαπανήθηκαν κατά τη μεταφορά και την αναμονή αντίστοιχα, ενώ το ϵ_c αντιστοιχεί στο κόστος σε περίπτωση που η διάδοση δεν γίνεται να προχωρήσει είτε λόγω σύγκρουσης είτε λόγω αδράνειας. Παρόλο που το ϵ_c δεν υποδηλώνει την πραγματική κατανάλωση ενέργειας, είναι θεμελιώδους σημασίας στην διαμόρφωση του παιγνίου, δεδομένου ότι δείχνει μακροπρόθεσμο κόστος για τους κόμβους, σε περίπτωση που η διάδοση δεν έχει ολοκληρωθεί.

Δεδομένου του μοντέλου συστήματος, έρχονται πέντε πιθανά αποτελέσματα από τον πίνακα 6 για κάθε slot. Δύο από αυτά οδηγούν σε επιτυχείς μεταδόσεις ενώ τρία από αυτά οδηγούν σε ανεπιτυχείς, είτε σε αδράνεια είτε σε σύγκρουση. Συγκεκριμένα:

s1: Ο Παικτης 1 μεταδίδει - Όλοι οι κόμβοι στον Παικτη 2 περιμένουν =>

Επιτυχής μετάδοση.

s2: Ο Παικτης 1 περιμένει - Ακριβώς ένας κόμβος του Παικτη 2 μεταδίδει =>

Επιτυχής μετάδοση.

f1: Ο Παικτης 1 μεταδίδει - Τουλάχιστον ένας κόμβος του Παικτη 2 μεταδίδει =>

Σύγκρουση.

f2: Ο Παικτης 1 περιμένει - Τουλάχιστον δύο κόμβοι του Παικτη 2 μεταδίδουν =>

Σύγκρουση.

f3: Ο Παικτης 1 περιμένει - Όλοι οι κόμβοι στον Παικτη 2 περιμένουν =>Υποδοχή αναμονής.

Τη διατύπωση του προβλήματός σε μια στρατηγική μορφή αποκαλύπτουν τα *NE* σε καθαρές στρατηγικές. Αυτά τα *NE*, συνήθως είναι κοινά στα παίγνια μέσης πρόσβασης και αντιστοιχούν στις επιτυχημένες μεταδόσεις. Ωστόσο, η αδικία των καθαρών στρατηγικών *NE*, μαζί με την απαίτηση για κεντρικό συντονισμό για την επίτευξη ενός δικτύου χωρίς συγκρούσεις, ώθησαν για μελέτη του προβλήματος στον τομέα μεικτών στρατηγικών, με σκοπό εφικτές και εφαρμόσιμες λύσεις για κατανεμημένα συστήματα. Παρακάτω γίνεται αναφορά σε δύο πολιτικές πρόσβασης της Θεωρίας Παιγνίων:

- Μια κατανεμημένη προσέγγιση όπου οι ασύρματοι κόμβοι υπολογίζουν ξεχωριστά τις πιθανότητες πρόσβασης του καναλιού *NE* σύμφωνα με την υιοθετημένη λειτουργία χρησιμότητας ενέργειας.
- Μια συντονισμένη προσέγγιση για τις υποδομές δικτύων, όπου οι κόμβοι

ενεργούν ξεχωριστά για να επιτευχθεί το NE , ενώ ένας κεντρικός ελεγκτής χρησιμοποιείται περιστασιακά για τη διευκόλυνση της διαδικασίας μετάδοσης.

4.5.5 Οργανωμένη στρατηγική πρόσβασης

Η εφαρμογή της προτεινόμενης κατανομής πρόσβασης καναλιού στο σύστημα ενδέχεται να προκαλέσει ανεπιτυχή λειτουργία ή κενά slots στο δίκτυο λόγω είτε συγκρούσεων είτε αδρανών slots όταν οι κόμβοι μεταδίδουν αμοιβαία ή περιμένουν, αντίστοιχα. Ως εκ τούτου, για να δεσμευτεί ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διάδοσης του περιεχομένου, χρησιμοποιείται μια κεντρική οντότητα (eNB) στο δίκτυο, και προτείνεται μια παραλλαγή της στρατηγικής κατανεμημένης πρόσβασης, η λεγόμενη συντονισμένη στρατηγική πρόσβασης καναλιού, που εφαρμόζεται σε δίκτυα υποδομής. Συγκεκριμένα, με τη συντονισμένη προσέγγιση υιοθετείται η χρήση ενός κεντρικού ελεγκτή ο οποίος παρέχει καθοριστικά τους κόμβους προέλευσης με κανάλι πρόσβασης σε περίπτωση k_f διαδοχικά ανεπιτυχών slots. Πιο συγκεκριμένα, ο ελεγκτής είναι σε θέση να διακρίνει τις αδρανείς, τις επιτυχείς μεταδόσεις και τις συγκρούσεις ανιχνεύοντας το ενεργειακό επίπεδο στο κανάλι [91] και κατά συνέπεια, να επιλέξει τον κόμβο για μετάδοση σε περίπτωση k_f διαδοχικά ανεπιτυχών slots στο δίκτυο.

Στη συνέχεια θα εξεταστεί μια συγκεκριμένη μελέτη του $k_f=2$ που ερευνά τις αλλαγές που η ύπαρξη κεντρικού ελεγκτή μπορεί να φέρει στη διαμόρφωση του παιγνίου και κατά συνέπεια, στο σχεδιασμό του πρωτοκόλλου. Ως εκ τούτου θεωρώντας $k_f=2$ και δεδομένης της λειτουργίας της συντονισμένης στρατηγικής μέσης πρόσβασης, υπάρχουν τρεις πιθανές περιπτώσεις:

- 1ο slot: είτε επιτυχημένη είτε ανεπιτυχής μετάδοση.
- 2ο slot: ανεπιτυχής μετάδοση στο πρώτο slot ακολουθούμενη είτε από επιτυχημένη είτε από ανεπιτυχή μετάδοση.
- 3ο slot: ανεπιτυχείς μεταδόσεις στα δύο πρώτα slot και ο κεντρικός ελεγκτής ορίζει τον κόμβο που πρόκειται να μεταδώσει.

Προφανώς, η διαφοροποίηση στην στρατηγική πρόσβασης αντανακλάται άμεσα στη λειτουργία χρησιμότητας. Σε αυτή τη συγκεκριμένη περίπτωση, η

αναμενόμενη ενέργεια μπορεί να υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψιν έναν ορίζοντα τριών slots.

4.5.6 NE αριθμητικά αποτελέσματα

Ανεξάρτητα από την υιοθετημένη στρατηγική πρόσβασης, οι πιθανότητες NE (s^*) προέρχονται από τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας των κόμβων (δηλ. Ρύθμιση $(\partial U_i)/(\partial s_i)=0$ ή ισοδύναμα $(\partial(E[e_i]))/(\partial s_i) = 0$). Επιπλέον έχοντας ως σημείο αναφοράς το πρότυπο IEEE 802.11g[88], όπου το επίπεδο της ισχύς λήψης(P_R) και η κατάσταση αδράνειας(P_I) είναι το 70% της ισχύος μετάδοσης(P_T) [92], ορίσαμε $a=0,7$. Όσον αφορά το b , το οποίο είναι ο σημαντικός παράγοντας του ενεργειακού κόστους σε περίπτωση που η διάδοση δεν προχωρήσει, υποθέτουμε τρεις διαφορετικές τιμές ($b=0,8$, $b=1,0$ και $b=1,2$) σε σχέση με τον αντίκτυπο που έχει η αιτία της ακινητοποίησης διάδοσης στο δίκτυο. Σε αυτό τελικά, οι πιθανότητες μετάδοσης NE για έναν διαφορετικό αριθμό κόμβων προέλευσης στο δίκτυο παρουσιάζονται στον πίνακα 7, όπου παρατηρούμε ότι η πιθανότητα μετάδοσης NE αυξάνεται με b , καθώς οι κόμβοι υιοθετούν μια "επιθετική" στάση για να ολοκληρωθεί η διαδικασία. Αντιστρόφως, για σταθερές τιμές του b , η πιθανότητα μετάδοσης μειώνεται όσο ο αριθμός ανταγωνιστικών κόμβων προέλευσης αυξάνεται στο δίκτυο.

Όσον αφορά τη συντονισμένη στρατηγική, οι εκτιμώμενες τιμές της NE είναι υψηλότερες σε σύγκριση με τις πιθανότητες NE στην κατανομημένη στρατηγική υπό τις ίδιες συνθήκες και μεταβλητές. Αυτή η τάση μπορεί να δικαιολογηθεί από την παρουσία του κεντρικού ελεγκτή που λειτουργεί ως εγγύηση για την εξασφάλιση της σωστής μετάδοσης μετά από διαδοχικές ανεπιτυχείς χρονοθυρίδες. Ως εκ τούτου, οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να εκτιμούν υψηλότερες πιθανότητες μετάδοσης χωρίς να λαμβάνουν υπόψιν την απειλή συγκρούσεων.

	Distributed			Coordinated		
n	$s^*(b = 0.8)$	$s^*(b = 1.0)$	$s^*(b = 1.2)$	$s^*(b = 0.8)$	$s^*(b = 1.0)$	$s^*(b = 1.2)$
2	0.312	0.350	0.375	0.423	0.432	0.439
3	0.180	0.207	0.225	0.259	0.268	0.275
4	0.127	0.147	0.161	0.185	0.193	0.199
5	0.097	0.113	0.125	0.144	0.150	0.156
6	0.080	0.092	0.102	0.117	0.123	0.128

7	0.067	0.078	0.086	0.099	0.104	0.108
15	0.030	0.035	0.038	0.044	0.046	0.048
17	0.026	0.030	0.034	0.039	0.041	0.043
19	0.023	0.027	0.030	0.034	0.036	0.038

Πίνακας 7. Πιθανότητες μετάδοσης NE

4.5.7 Σενάριο προσομοίωσης

Έχει πραγματοποιηθεί προσομοίωση για αξιολόγηση των επιδόσεων των προτεινόμενων στρατηγικών στην οποία η τοπολογία του δικτύου είναι παρόμοια με εκείνη της Εικόνας 9, και εστιάζει στο δεύτερο στάδιο της διάδοσης, όπου η προτεινόμενη τεχνική πρόσβασης εφαρμόζεται για την επίλυση συγκρούσεων μεταξύ των κόμβων προέλευσης. Επιπλέον, οι κόμβοι είναι σε θέση να εφαρμόσουν τυχαία γραμμική κωδικοποίηση δικτύου στα πακέτα προς μετάδοση, πριν την διαβίβασή τους. Το αρχείο που ανταλλάσσεται μεταξύ των κόμβων είναι μια εικόνα RGB με διαστάσεις 256×256 pixels. Η ανάλυση της εικόνας και κατά συνέπεια, το "βάθος" χρώματος των εικονοστοιχείων καθορίζουν το μέγεθος του πακέτου. Συγκεκριμένα, ένα 4-bit "βάθος" (16 χρώματα) έχει ως αποτέλεσμα 128bytes, ενώ μία εικόνα RGBA (βάθος 32 bits) έχει ως αποτέλεσμα μια ανάλυση 1024byte ωφέλιμο φορτίο. Στην προσομοίωση θεωρείται μήκος πακέτων PHY+MAC+NCH+ωφέλιμο φορτίο όπου τα PHY και MAC είναι οι κεφαλίδες, με PHY=192bits και MAC=224bits. Η NCH είναι η κεφαλίδα κωδικοποίησης δικτύου, ενώ το φορτίο είναι το ωφέλιμο φορτίο πακέτων, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 128 και 1024byte σε σχέση με την ανάλυση εικόνας.

Η κωδικοποίηση των πακέτων πραγματοποιείται πάνω σε ένα πεπερασμένο Galois Field-GF (2^8), που αποδεικνύεται επαρκής για γραμμική ανεξαρτησία μεταξύ των πακέτων[91]. Το συγκεκριμένο πεδίο συνεπάγεται ότι ο αριθμός των πακέτων κωδικοποίησης αντανάκλαται στον αριθμό των bytes στον φορέα κωδικοποίησης. Εάν χρησιμοποιηθεί μία γενιά 256 πακέτων, η πρόσθετη επιβάρυνση σε κάθε πακέτο θα είναι 256byte, η οποία είναι τεράστια, ειδικά για μικρά ωφέλιμα φορτία. Ως εκ τούτου, έχει επιλεγεί να δημιουργηθούν 16 γενεές από 16 πακέτα το καθένα, με αποτέλεσμα το NCH των 17bytes συνολικά (16bytes για τον φορέα κωδικοποίησης, 4bits για το μέγεθος της γενιάς και 4bits για το αναγνωριστικό γενιάς).

Η χρονική περίοδος στο σύστημα είναι ίση με 20msec σύμφωνα με το φυσικό στρώμα του IEEE 802.11g[88], ενώ οι τιμές στάθμης ισχύος έχουν επιλεγεί σύμφωνα με τις μετρήσεις κατανάλωσης ενέργειας της ασύρματη διασύνδεση[92]: $P_T=1900\text{mW}$, $^2P_R=P_I=1340\text{mW}$.

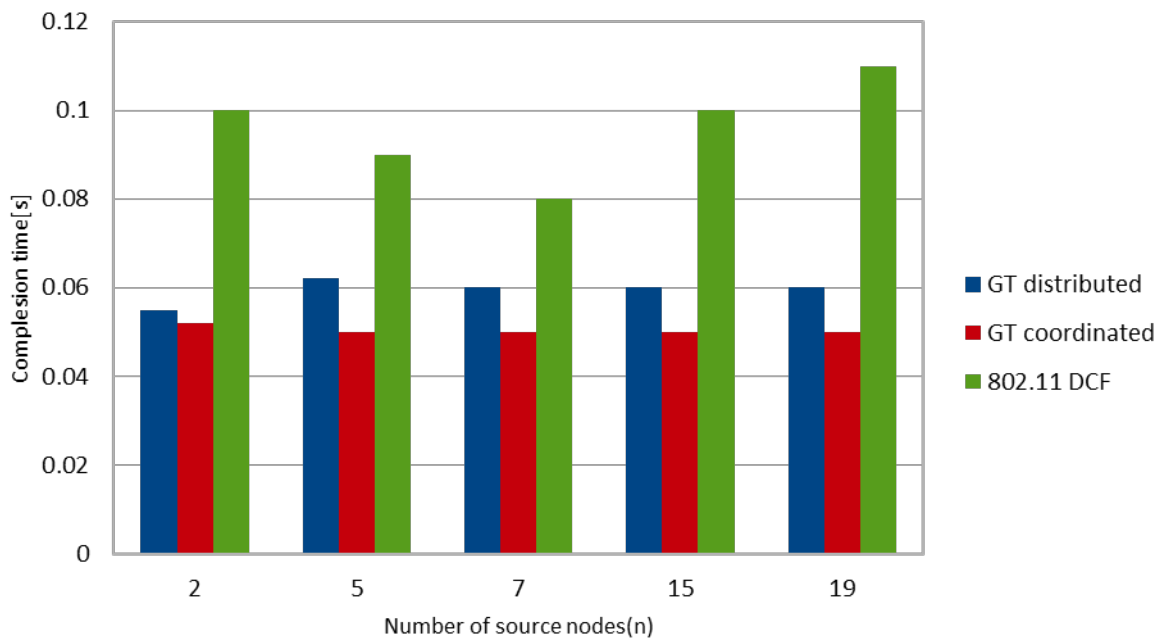
Η λειτουργία πολλαπλής διαδρομής του IEEE 802.11g, θεωρείται δεδομένη καθώς δεν υπάρχει ανάγκη για μετάδοση σαφούς ACK πακέτων, ενώ υιοθετείται ένα ελάχιστο παράθυρο διένεξης($CW_{\min}$) ίσο με 32. Οι παράμετροι προσομοίωση συνοψίζονται στον Πίνακα 8.

Parameter	Value	Parameter	Value
Packet payload	128-1024 bytes	σ	20 μs
MAC+PHY header	52 bytes	NC header	17 bytes
Data Tx.Rate	54 Mb/s	Generation size	16
$CW_{\min}$	32	DIFS	50 μs
P_T	1900 mW	P_I, P_R	1340 mW

Πίνακας 8. Παράμετροι Προσομοίωσης

4.5.8 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Το σχήμα 4 απεικονίζει τα αποτελέσματα προσομοίωσης όσον αφορά τον χρόνο ολοκλήρωσης της μετάδοσης των δεδομένων των προτεινόμενων μέσων πρόσβασης, έναντι του παλαιού IEEE 802.11 DCF. Σε αυτό το συγκεκριμένο πείραμα, ο αριθμός των κόμβων προέλευσης κυμαίνεται μεταξύ 2 και 19 υποθέτοντας ότι $b=0,8$ και ωφέλιμο φορτίο=1024byte.

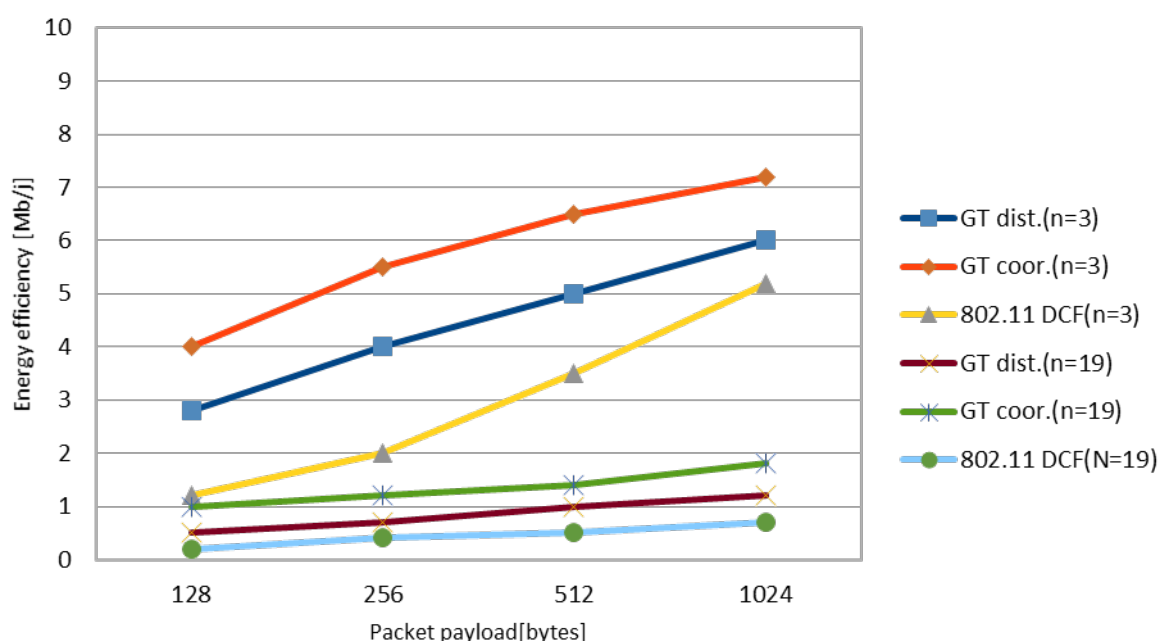


Σχήμα 4. Χρόνος ολοκλήρωσης της διάδοσης δεδομένων έναντι του αριθμού των κόμβων προέλευσης (b = 0.8, Payload = 1024 bytes).

Στο σχήμα 4 παρατηρούμε τη μεγάλη μείωση καθυστέρησης που προσφέρουν οι προσεγγίσεις της Θεωρίας Παιγνίων σε σύγκριση με το πρότυπο IEEE 802.11. Ειδικότερα, η στρατηγική κατανεμημένης πρόσβασης βελτιώνει τον χρόνο ολοκλήρωσης μέχρι 80% (n=2) ενώ η βελτίωση στο πλαίσιο της συντονισμένης προσέγγισης υπερβαίνει το 100%. Σε σχέση με τον ελάχιστο χρόνο ολοκλήρωσης της διάδοσης για το DCF (n=7), η κατανεμημένη και η συντεταγμένη προσέγγιση επιτυγχάνει κέρδη 32% και 65% αντίστοιχα. Η δεύτερη παρατήρηση αφορά την εξάρτηση μεταξύ του χρόνου ολοκλήρωσης της διάδοσης και του αριθμού των κόμβων προέλευσης στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, η ευελιξία της στρατηγικής πρόσβασης επιτρέπει την πιο ομαλή προσαρμογή στα δίκτυα με πολλές πηγές. Ως εκ τούτου, ο χρόνος ολοκλήρωσης της διάδοσης δεν επηρεάζεται σημαντικά από τον αριθμό των κόμβων προέλευσης. Από την άλλη πλευρά, βλέπουμε ότι οι δυναμικές CW στο IEEE 802.11 δεν είναι σε θέση να δεσμεύσουν τον χρόνο ολοκλήρωσης της μετάδοσης, ένα γεγονός που μπορεί να σχεδιαστεί εξετάζοντας τη λειτουργία του μηχανισμού εκτροπής.

Ειδικότερα, στην περίπτωση μερικών (π.χ. n=2) ή πολλών (π.χ. n=19) κόμβων (πηγές) στο δίκτυο ο χρόνος ολοκλήρωσης αυξάνεται είτε λόγω των

αδρανών slots είτε λόγω των συγκρούσεων δημιουργώντας μια διακύμανση περίπου 34%.



Σχήμα 5. Ενεργειακή απόδοση των στρατηγικών πρόσβασης της Θεωρίας Παιγνίων έναντι του IEEE 802,11 DCF ($b=1,0$, $l=1$)).

Στο σχήμα 5 παρουσιάζονται τα στοιχεία ενεργειακής αποδοτικότητας των προτεινόμενων στρατηγικών, υποθέτοντας $n=3$ και $n=19$ πηγές στο δίκτυο για να γίνει μελέτη της επεκτασιμότητας. Όσον αφορά την περίπτωση όπου $n=19$ βλέπουμε ότι το κέρδος που επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας τη στρατηγική πρόσβασης της Θεωρίας Παιγνίων, παραμένει σταθερά πάνω από 100% σε σύγκριση με το DCF. Από την άλλη πλευρά, παρατηρούμε μία ελαφρώς διαφορετική τάση στην περίπτωση λίγων κόμβων(πηγές) στο δίκτυο ($n=3$). Σε αυτή την περίπτωση, το κέρδος της στρατηγικής κατανομημένης πρόσβασης μέσω του IEEE 802.11 μειώνεται, καθώς το ωφέλιμο φορτίο του πακέτου αυξάνεται, αν και το αρχικό κέρδος για το ωφέλιμο φορτίο των 128 byte φτάνει το 100%. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την εκ νέου εξέταση των εφαρμογών DCF η οποία έχει σχεδιαστεί για να αποφεύγει τις συγκρούσεις. Αυτός ο σχεδιασμός είναι ευεργετικός για πακέτα υψηλού ωφέλιμου φορτίου αλλά, δημιουργεί αδρανείς slots στο δίκτυο, επηρεάζοντας έτσι την ενεργειακή απόδοση για μικρό πακέτο ωφέλιμων φορτίων. Οι στρατηγικές της Θεωρίας Παιγνίων χειρίζονται αυτά τα σημεία αποτελεσματικά, ως εκ τούτου την

αποτελεσματική αντιμετώπιση των θεμάτων ενεργειακής απόδοσης[92].

Μεταξύ των δύο στρατηγικών της Θεωρίας Παιγνίων (κατανεμημένες και συντονισμένες) που εκτιμούν τις πιθανότητες μετάδοσης NE σε δίκτυα με πολλαπλές πηγές τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έχουν δείξει ότι η προτεινόμενη στρατηγική MAC υπερβαίνει σημαντικά την απόδοση IEEE 802.11 DCF, μειώνοντας το χρόνο διάδοσης και αυξάνοντας ταυτόχρονα την ενεργειακή απόδοση στο δίκτυο.

4.6 Διαχείριση πόρων σε δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης για 5G

Οι μη ορθογώνιες τεχνικές πολλαπλής προσπέλασης έχουν προταθεί πρόσφατα για ασύρματα συστήματα 5G και πέραν αυτών για να βελτιώσουν την αποδοτικότητα της πρόσβασης, επιτρέποντας σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται το ίδιο φάσμα. Λόγω της ισχυρής παρεμβολής γειτονικών καναλιών μεταξύ των χρηστών κινητής τηλεφωνίας που εισήγαγε η NOMA δημιουργούνται σημαντικές προκλήσεις για το σχεδιασμό του συστήματος και τη διαχείριση των πόρων. Στην συνέχεια θα εξεταστούν ζητήματα διαχείρισης πόρων που αφορούν τα συστήματα NOMA. Η κύρια ταξινόμηση του NOMA εστιάζει στις δύο κύριες κατηγορίες επαναχρησιμοποίησης πόρων: power-domain και code-domain NOMA. Τέλος προτείνεται ένα νέο πλαίσιο διαχείρισης ραδιοφωνικών πόρων με βάση μοντέλα Θεωρίας Παιγνίων για μεταδόσεις uplink και downlink.

Σε υπάρχοντα ασύρματα συστήματα, όπως η τέταρτη γενιά(4G) Long Term Evolution(LTE), η ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal -Frequency-Division-Multiple-Access-OFDMA) έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για τον προγραμματισμό των μεταδόσεων διαφορετικών χρηστών σε ορθογώνιους τομείς χρόνου και συχνότητας[94]. Λόγω της εκρηκτικής αύξησης της ασύρματης επικοινωνίας, τα μελλοντικά ασύρματα συστήματα 5ης γενιάς (5G) και πέραν αυτής θα αντιμετωπίσουν μεγαλύτερες προκλήσεις και θα απαιτήσουν πολύ καλύτερη φασματική απόδοση, μαζική συνδεσιμότητα και χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση [95]. Ωστόσο, στα συμβατικά συστήματα ορθογώνιας πολλαπλής προσπέλασης(OMA), οι κινητές συσκευές μοιράζονται τους πόρους με ορθογώνιο τρόπο και αυτά τα συστήματα OMA θα αντιμετωπίσουν σοβαρά προβλήματα συμφόρησης όταν υπάρχει μεγάλος

αριθμός συσκευών λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης μετάδοσης.

Για να αντιμετωπιστούν τα ζητήματα για μαζική συνδεσιμότητα και ευρυζωνικές υπηρεσίες, τεχνικές μη ορθογώνιας πολλαπλής προσπέλασης (NOMA), οι οποίες επιτρέπουν στους χρήστες να έχουν πρόσβαση στο κανάλι χωρίς ορθογώνιο τρόπο είτε με power-domain πολυπλεξία [96],[97] είτε με code-domain πολυπλεξία [98] , έχουν πρόσφατα εισαχθεί για χρήση σε δίκτυα μικρών κυψελών.

Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα OMA στα οποία ένας φορέας έχει εκχωρηθεί σε ένα μόνο χρήστη, το NOMA επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται τον ίδιο φορέα, ο οποίος εισάγει παρεμβολές πολλαπλών χρηστών. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, πρέπει να εφαρμοστούν τεχνικές ανίχνευσης πολλαπλών χρηστών (Multi-User Detection-MUD), όπως η διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (Successive-Interference-Cancellation-SIC) στην πλευρά του δέκτη για την αποκωδικοποίηση των ληφθέντων σημάτων με κόστος την αυξημένη πολυπλοκότητα.

Η ανώτερη φασματική απόδοση του NOMA έγκειται στο γεγονός ότι το NOMA εκμεταλλεύεται την έξυπνη επαναχρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου μέσω της πολυπλεξίας μηνυμάτων πολλαπλών χρηστών στο ίδιο υπο-κανάλι στον πομπό και την κατασκευή αποτελεσματικών αλγόριθμων ανίχνευσης σημάτων στους δέκτες. Ως εκ τούτου, το NOMA απαιτεί ένα νέο σχεδιασμό μετάδοσης φυσικού στρώματος, έλεγχο μέσης πρόσβασης (Medium-Access-Control-MAC) και αλγόριθμους κατανομής πόρων δικτύου.

Στην συνέχεια θα γίνει αναφορά σε διάφορα τεχνικά ζητήματα στο σχεδιασμό πρωτοκόλλου πρόσβασης NOMA και αλγορίθμων κατανομής πόρων εστιάζοντας κυρίως στις δύο ακόλουθες κατηγορίες:

- Power-Domain(PD) NOMA: Το PD-NOMA πολυπλέκει πολλούς χρήστες στον ίδιο φορέα παροχής ταυτόχρονα με διαφορετικά επίπεδα ισχύος στον πομπό και το SIC εφαρμόζεται στην πλευρά του δέκτη για να αποκωδικοποιήσει τα ληφθέντα σήματα [96].
- Code-Domain(CD) NOMA: Το CD-NOMA χρησιμοποιεί χαμηλής συσχέτισης ακολουθίες για τη διάδοση των δεδομένων κάθε χρήστη σε πολλαπλούς υποφορείς για να πραγματοποιήσουν υπερφόρτωση [98].

Προφανώς, σε διάφορα πρωτόκολλα NOMA, οι δικτυακοί πόροι όπως η ισχύς, η

συχνότητα και ο χρόνος, πρέπει να βελτιστοποιηθούν με τη διερεύνηση των σωστών αλγόριθμων[99]. Η Θεωρία Παιγνίων επιτρέπει τη μελέτη σύνθετων αλληλεπιδράσεων μεταξύ αλληλοεξαρτώμενων παικτών και προβλέπει τις επιλογές των στρατηγικών. Τα μοντέλα της Θεωρίας Παιγνίων χρησιμοποιούνται για να μελετήσουν τέτοια προβλήματα κατανομής πόρων σε ασύρματα δίκτυα.

4.6.1. Σχεδίαση πομποδέκτη NOMA σε PD και CD

Το NOMA αυξάνει τη φασματική απόδοση πρόσβασης της μετάδοσης uplink και downlink σε ασύρματα δίκτυα, εκμεταλλευόμενο τα νέα πρωτόκολλα πολυπλεξίας σε διάφορους τομείς, όπως η ισχύς και η συχνότητα. Ως νέο πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης πέρα από τον συμβατικό μηχανισμό OMA το NOMA απαιτεί νέα σχέδια για πρωτόκολλα πρόσβασης, βελτιστοποίηση πομποδέκτη και κατανομή πόρων.

Σε ένα κυψελοειδές σύστημα PD-NOMA με έναν σταθμό βάσης(BS) και ένα σύνολο χρηστών, πολλαπλοί χρήστες πολυπλέκονται στον ίδιο φορέα ταυτόχρονα. Συγκεκριμένα, στη μετάδοση downlink, ο σταθμός βάσης μεταδίδει μια υπέρθεση σημάτων πολλαπλών χρηστών, επιλέγοντας σωστά τους συντελεστές ισχύος εκπομπής για τα σήματα αυτών των χρηστών, που υπόκεινται σε συνολικό περιορισμό ισχύος [98]. Γενικά, τα χαμηλότερα επίπεδα ισχύος θα διατεθούν στους χρήστες με καλύτερα κέρδη καναλιού, ενώ θα διατεθούν μεγαλύτερα ποσοστά εκχώρησης ισχύος σε χρήστες με χαμηλότερα κέρδη καναλιού. Δεδομένου ότι ένας φορέας μπορεί να καταλαμβάνεται από πολλούς χρήστες, το σήμα ενός χρήστη θα προκαλέσει παρεμβολές στους άλλους.

Προκειμένου ένας χρήστης να ανακτήσει το σήμα του, το SIC εφαρμόζεται στα λαμβανόμενα σήματα. Για το SIC, τα σήματα των χρηστών, με κέρδος καναλιού χαμηλότερο από αυτό που οι χρήστες επιθυμούν, θα ανακτηθούν διαδοχικά με αυξανόμενη σειρά των κερδών του καναλιού και αυτός ο χρήστης θα αντιμετωπίσει τα σήματα των χρηστών με κέρδος καναλιού υψηλότερο από το κέρδος του καναλιού ως θόρυβο.

Στα κανάλια πολλαπλής πρόσβασης uplink, πολλοί χρήστες κινητών μεταδίδουν τα δικά τους σήματα στο σταθμό βάσης. Τα σήματα πολλαπλών χρηστών στη

συνέχεια ανακτώνται στο σταθμό βάσης με τη χρήση SIC. Η συνολική απόδοση του NOMA εξαρτάται από την πολιτική ελέγχου ισχύος που χρησιμοποιείται στους χρήστες. Με βάση την ανατροφοδότηση από το σταθμό βάσης, ο κατανεμημένος έλεγχος ισχύος στην πλευρά του χρήστη πρέπει να εκτελεστεί με την επιφύλαξη των επιμέρους περιορισμών ισχύος. Από μια θεωρητική άποψη το PD-NOMA με ένα δέκτη SIC μπορεί να προσεγγίσει την περιοχή χωρητικότητας πολλαπλών χρηστών στο κανάλι downlink. Αυτό γίνεται μια ιδιαίτερα σημαντική εφαρμογή για τα κυψελοειδή συστήματα όπου η ποιότητα του καναλιού ποικίλλει σημαντικά μεταξύ των χρηστών στο κέντρο των κυψελών και των χρηστών στην άκρη των κυψελών.

Το CD-NOMA μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα σχήμα ανοιχτού βρόχου για να φιλοξενήσει πολλούς χρήστες σε κοινόχρηστη συχνότητα, που εξαπλώνει ροές δεδομένων κάθε χρήστη σε πολλαπλούς υποφορείς από χαμηλής συσχέτισης αλληλεπιδράσεις. Έτσι, τα μεταδιδόμενα σήματα πολυπλεξίας(OFDM) μπορεί να βελτιώσουν σημαντικά την ποιότητα μιας διαδικασίας μετάδοσης λόγω του μέσου όρου παρεμβολής.

Στον δέκτη, μπορούν να υιοθετηθούν αλγόριθμοι ανίχνευσης πολλαπλών χρηστών όπως ο σχεδόν βέλτιστος αλγόριθμος διέλευσης μηνυμάτων (Message-Passing-Algorithm-MPA) για την ανάκτηση των αρχικών σημάτων. Για να διευκολυνθεί αυτή η διαδικασία, μπορούν να εφαρμοστούν προκαθορισμένες μέθοδοι κωδικοποίησης κατά τις οποίες οι κωδικές λέξεις παράγονται μέσω διασποράς συμβόλων με διαφορετικά επίπεδα ισχύος όπως διαμόρφωση εύρους τετραγωνικής διατομής (Quadrature-Amplitude-Modulation-QAM).

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο σενάριο downlink, η επιλογή λέξεων-κλειδιών και η ρύθμιση στάθμης ισχύος μπορούν να εκτελεστούν με κεντρικό τρόπο. Για το CD-NOMA uplink, τα βασισμένα σε διαμάχες συστήματα μετάδοσης μπορούν να θεωρηθούν ότι μειώνουν την καθυστέρηση λανθάνουσας κατάστασης και σηματοδότησης. Οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας στέλνουν δεδομένα με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να αντιμετωπίζουν πολλαπλούς φυσικούς πόρους όπως είναι ο χρόνος και η συχνότητα, χωρίς να βασίζονται σε μια κεντρική διαδικασία αιτήσεων. Συγκεκριμένα, οι καθορισμένοι πόροι χρόνου και συχνότητας μοιράζονται από διάφορους χρήστες που μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα συγκεκριμένο σύνολο πόρων στη μετάδοση δεδομένων.

Όταν ένας χρήστης έχει δεδομένα για αποστολή, επιχειρεί να παραδώσει ένα πακέτο μέσω του ράδιο-πόρου που προορίζεται για τη μετάδοση των δεδομένων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές κρίσιμης σημασίας με εξαιρετικά χαμηλές απαιτήσεις καθυστέρησης. Παρόμοια με το CDMA, το CD-NOMA μπορεί να θεωρηθεί ως ένας τύπος κωδικοποίησης επανάληψης στην οποία τα μεταδιδόμενα σύμβολα διαμορφώνονται με αλληλουχίες διασποράς. Ωστόσο, σε αντίθεση με το συμβατικό συστήματα CDMA, το CD-NOMA μεταδίδει σήματα με τη μορφή συμβόλων OFDM μέσω του μετασχηματισμού Fourier προκειμένου να είναι συμβατό με τα τρέχοντα συστήματα LTE.

4.6.2 Μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος για uplink PD-NOMA

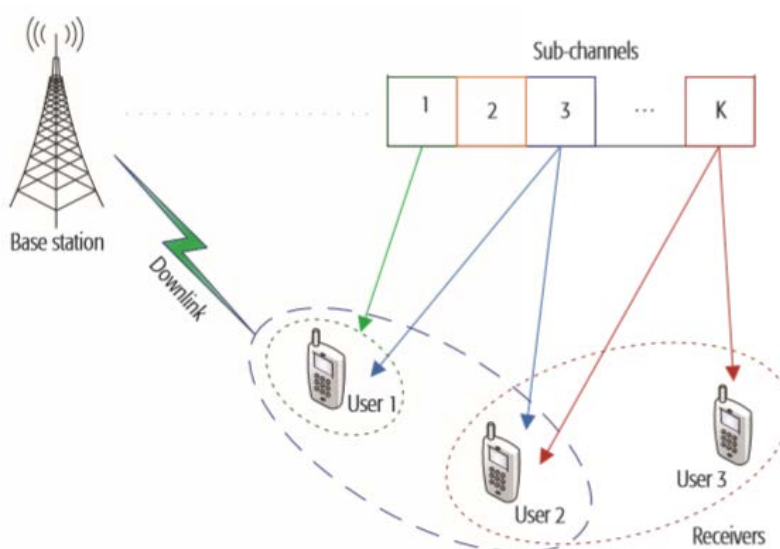
Οι τεχνικές ελέγχου ισχύος έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε συστήματα κινητής επικοινωνίας για να ελαχιστοποιηθεί η παρεμβολή και να βελτιστοποιηθεί ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων. Ο έλεγχος ισχύος είναι ιδιαίτερα σημαντικός για το PD-NOMA uplink, επειδή η ισχύς μετάδοσης των χρηστών κινητής τηλεφωνίας πρέπει να βελτιστοποιηθεί κατάλληλα για να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές μεταξύ των χρηστών του καναλιού. Οι αλληλεπιδράσεις και ο έλεγχος ισχύος μεταξύ των χρηστών του PD-NOMA που μοιράζονται τα ίδια κανάλια μπορούν να μοντελοποιηθούν ως παίγνιο που δεν συνεργάζεται με καταναμημένο τρόπο. Συγκεκριμένα, οι παίκτες του παιγνίου είναι οι χρήστες κινητών συσκευών, η δράση είναι να ελέγχει τη δύναμη μετάδοσης σε κάθε κανάλι που υπόκειται στον περιορισμό ισχύος και η λειτουργία πληρωμής ορίζεται ως ο ρυθμός μείον το κόστος της ισχύος που χρησιμοποιείται από τη μετάδοση του χρήστη. Έτσι, ένας αλγόριθμος καταναμημένης ισχύος μπορεί να σχεδιαστεί με την επαναληπτική ενημέρωση της ισχύος μετάδοσης κάθε χρήστη λαμβάνοντας υπόψιν τον ατομικό περιορισμό ισχύος. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ αυτή της κατάστασης και του παραδοσιακού καταναμημένου ελέγχου ισχύος βρίσκεται στο γεγονός ότι κάθε χρήστης μπορεί να καταλαμβάνει διαφορετικό αριθμό υποφορέων και μπορεί να μην ευθυγραμμίζονται μεταξύ τους στο πεδίο συχνοτήτων, έτσι ώστε ένας χρήστης να μπορεί να συγκρουστεί εν μέρει στη ζώνη συχνοτήτων με άλλους[98].

4.6.3 Παίγνιο συνασπισμού για downlink PD-NOMA

Σε ένα παίγνιο συνασπισμού, τα σύνολα παικτών που σχηματίζουν συνεταιριστικές ομάδες ονομάζονται συμμαχίες. Ο λόγος για τον οποίο οι χρήστες θα συμμετάσχουν σε συνασπισμό είναι ότι αυτοί οι χρήστες μπορούν να κερδίσουν υψηλότερες απολαβές. Τυπικά, το άθροισμα αυτών των απολαβών θεωρείται ότι είναι η αξία του συνασπισμού. Τα παίγνια συνασπισμού μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο τύπους:

- στρατηγικής μορφής: η αξία του συνασπισμού εξαρτάται μόνο από τις απολαβές των μελών του ίδιου συνασπισμού
- διαχωριστικής μορφής: η αξία ενός συνασπισμού εμπλέκεται αρκετά και εξαρτάται από τις ενέργειες των παικτών εκτός του συνασπισμού.

Παίγνιο συνασπισμού για το downlink PD-NOMA: Εξετάζεται ένα δίκτυο NOMA downlink με μόνο μία κυψέλη και έναν αριθμό χρηστών κινητής τηλεφωνίας όπως φαίνεται στην εικόνα 10 στο οποίο ο σταθμός βάσης μεταδίδει τα σήματα για να εξυπηρετήσει ένα σύνολο χρηστών κινητής τηλεφωνίας που δηλώνεται με $N = \{1, \dots, N\}$.



Εικόνα 10. Μοντέλο συστήματος PD-NOMA (Πηγή:[100])

Ο σταθμός βάσης χωρίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε ένα σύνολο υποφορέων $K = \{1, \dots, K\}$, όπου το N είναι πολύ μεγαλύτερο από το K . Άλλοι τύποι πόρων

δικτύου, όπως πολλαπλές κεραίες και κωδικοποίηση διάδοσης, μπορούν επίσης να εφαρμοστούν για την αποφυγή παρεμβολών. Όταν ο σταθμός βάσης έχει πλήρη γνώση της πληροφορίας κατάστασης καναλιού (Channel-State-Information-CSI), εκχωρεί ένα σύνολο υποφορέων στους χρήστες και κατανέμει διαφορετικά επίπεδα ισχύος στους χρήστες που υπόκεινται σε συνολικό περιορισμό ισχύος. Σύμφωνα με το προαναφερθέν πρωτόκολλο PD-NOMA, ένας υποφορέας μπορεί να προγραμματιστεί με πολλαπλούς χρήστες, ενώ ένας χρήστης μπορεί να λάβει τα ίδια μεταδιδόμενα σήματα από τον σταθμό βάσης μέσω πολλαπλών υποφορέων. Αυτή η κατάσταση μπορεί να διατυπωθεί ως παίγνιο συνασπισμού. Στο σύστημα NOMA[100] και υποθέτοντας ότι τα λαμβανόμενα σήματα είναι αλλοιωμένα από το θόρυβο Gaussian (Additive-White-Gaussian-Noise-AWGN), ο χρήστης i στο συνασπισμό K έχει ένα ρυθμό:

$$\frac{1}{N} \log(1 + \text{SINR}_{i,k})$$

όπου N ο συνολικός αριθμός χρησιμοποιηθέντων υποφορέων και $\text{SINR}_{i,k}$ ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Interference-Plus-Noise-Ratio-SINR) αυτού του χρήστη. Επομένως, η ενέργεια του χρήστη στο $S1$ που μετακινείται στο $S2$ έχει αντίκτυπο στα ποσοστά όχι μόνο για τους χρήστες $S1$ και $S2$ αλλά και για τους άλλους συνασπισμούς.

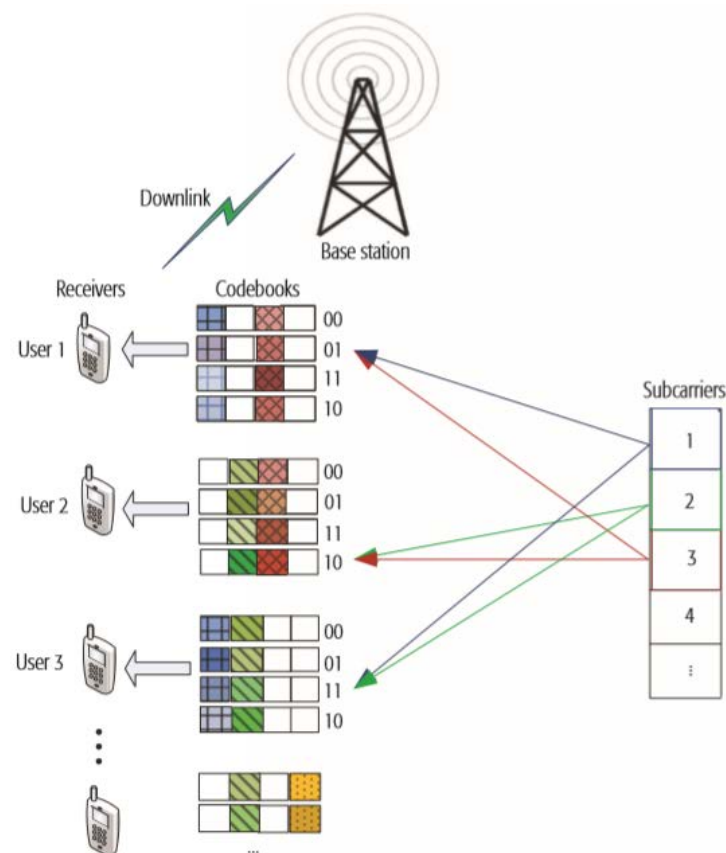
4.6.4 Μοντέλα παιγνίων για κατανομή πόρων στο CD-NOMA

Μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου συγκρούσεων στο CD-NOMA uplink: Σε CD-NOMA uplink, οι χρήστες κινητών συσκευών μπορούν να υποστηρίξουν έναν ή περισσότερους πόρους, οι οποίοι μπορεί να είναι σημαντικές προκλήσεις σε ένα κατανεμημένο περιβάλλον. Συγκεκριμένα, για να μειωθεί η συμφόρηση και να μειωθούν οι συγκρούσεις, είναι απαραίτητο ένα αποτελεσματικό πρωτόκολλο κατανομής μέσω πρόσβασης για την αποτελεσματική κατανομή των πόρων. Για το σκοπό αυτό, η Θεωρία Παιγνίων είναι ένα κατάλληλο εργαλείο για το σχεδιασμό κατανεμημένων πρωτοκόλλων για δίκτυα CD-NOMA. Το MAC μπορεί να διατυπωθεί ως παίγνιο τυχαίας προσπέλασης στο οποίο πολλοί χρήστες κινητής τηλεφωνίας θέλουν να μεγιστοποιήσουν τις εφαρμογές τους μεμονωμένα, χρησιμοποιώντας ένα κοινό κανάλι. Ένας εγωιστής χρήστης

περιμένει συνήθως ένα μικρότερο διάστημα για να αυξήσει τις ευκαιρίες πρόσβασης στο μέσο, γεγονός που μπορεί να μειώσει τις ευκαιρίες πρόσβασης καναλιού για χρήστες που συμπεριφέρονται καλύτερα.

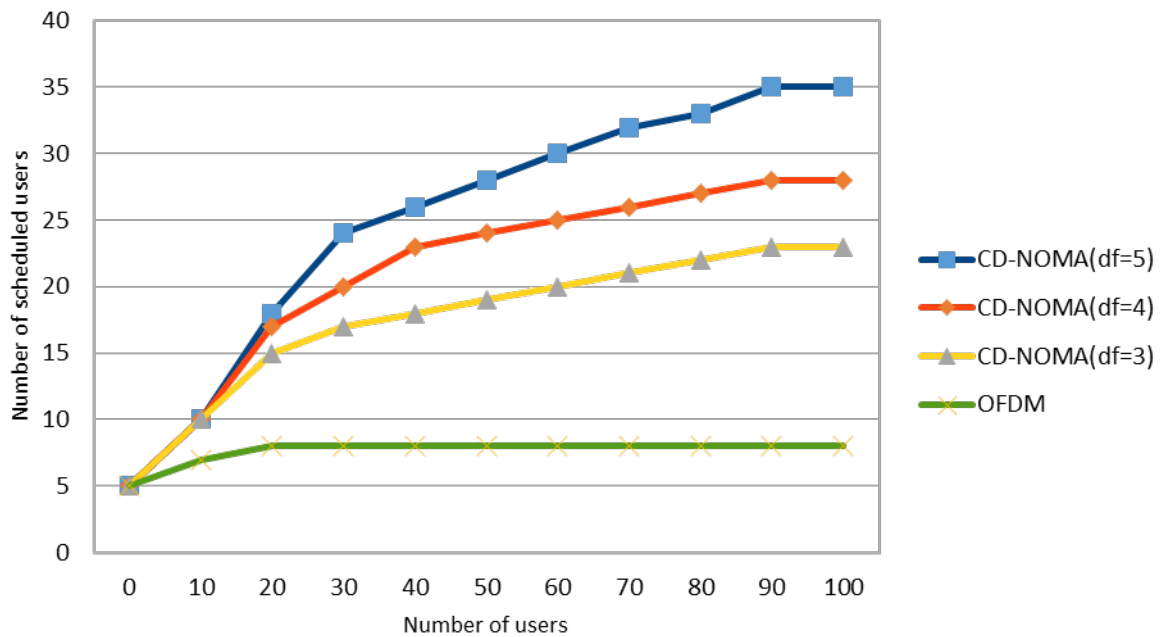
Σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται η επιλογή του κατάλληλου τμήματος συχνότητας, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει τη συνολική συνδεσιμότητα. Τα προβλήματα κατανομής των πόρων σε αυτή την κατάσταση σχετίζονται με τεχνικές όπως η προσαρμογή μήκους παραθύρου σύγκρουσης και ο έλεγχος ισχύος.

Ένα μοντέλο παιγνίου που αντιστοιχεί στο CD-NOMA για Downlink παρουσιάζεται στην εικόνα 11. Ένα σύνολο κινητών χρηστών επικοινωνούν με ένα ενιαίο σταθμό βάσης, ο οποίος διαιρεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε υποφορείς K . Υπάρχουν J κωδικοποιητές που έχουν εκχωρηθεί από το σταθμό βάσης και κάθε χρήστης χαρακτηρίζεται από M κωδικές λέξεις μήκους K . Στον πομπό, τα ρεύματα δυαδικών ψηφίων μήκους $\log_2 M$ κάθε χρήστη χαρτογραφούνται απευθείας σε κωδικές λέξεις.



Εικόνα 11. Μοντέλο συστήματος ενός δικτύου CD-NOMA(Πηγή:[101])

Μετά την χαρτογράφηση της ροής δεδομένων κάθε χρήστη σε μια κωδική λέξη διαφορετικές κωδικές λέξεις CD-NOMA πολυπλέκονται πάνω από κοινόχρηστους υποφορείς K . Ο στόχος του σχεδιασμού του συστήματος μπορεί να διατυπωθεί ως η μεγιστοποίηση της συνολικής παρουσίας του συστήματος μέσω της βέλτιστης κατανομής των υποφορέων στους χρήστες. Αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να αντιμετωπιστεί ως πρόβλημα αντιστοίχισης πολλαπλών πλευρών και μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας αντίστοιχους αλγόριθμους αντιστοίχισης. Για περαιτέρω απεικόνιση των δυναμικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των χρηστών πάνω σε κοινόχρηστους υποφορείς, στο παίγνιο αντιστοίχισης, το σύνολο των χρηστών και το σύνολο των υποφορέων μπορούν να θεωρηθούν ως δύο διαφορετικά σύνολα εγωιστικών παραγόντων που επιθυμούν να μεγιστοποιήσουν τα δικά τους οφέλη. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να περιγραφεί σε τρία στάδια. Στο πρώτο, οι λίστες αντιστοίχισης κάθε παίκτη παράγονται για να καταγράψουν τις προτιμήσεις του. Στο δεύτερο υλοποιείται ο παραδοσιακός αλγόριθμος αποδοχής, τον οποίο κάθε χρήστης προτείνει στον υποφορέα που δεν το έχει απορρίψει ακόμα και ο κάθε υποφορέας διατηρεί τις επιθυμητές του προσφορές και απορρίπτει τους άλλους. Η όλη διαδικασία σταματά όταν κανένας χρήστης δεν είναι πρόθυμος να κάνει νέες προσφορές. Στο τρίτο στάδιο κάθε αντιστοιχισμένος χρήστης ψάχνει για έναν άλλο για να σχηματίσει ένα ζεύγος αποκλεισμού και στη συνέχεια το ζεύγος ανταλλάσσει την τρέχουσα αντιστοίχιση. Η διαδικασία θα συνεχιστεί επανειλημμένα μέχρις ότου κανένας χρήστης δεν μπορεί να βρει νέα ζεύγη αποκλεισμού, οπότε καθορίζεται η τελική αντιστοίχιση [101].



Σχήμα 6. Αριθμός προγραμματισμένων χρηστών έναντι αριθμού χρηστών σε CD-NOMA

Το σχήμα 6 δείχνει τον αριθμό των προγραμματισμένων χρηστών σε σχέση με τον αριθμό των χρηστών σε μια χρονική θυρίδα, όπου d_f αντιπροσωπεύει τον αριθμό των χρηστών υπερφόρτωσης ενός δικτύου CD-NOMA. Για το σχήμα NOMA, έχει οριστεί ο αριθμός των 10 υπο-καναλιών. Υποθέτουμε ότι η απώλεια διαδρομής επιτυγχάνεται με ένα τροποποιημένο μοντέλο αστικής διάδοσης Hata, και ότι οι χρήστες κατανέμονται ομοιόμορφα σε περιοχή 350m². Κάθε υπο-κανάλι μπορεί να αντιστοιχιστεί μόνο στους περισσότερους χρήστες d_f και κάθε χρήστης μπορεί να καταλαμβάνει μόνο τα πέντε υπο-κανάλια από την άποψη της δικαιοσύνης των χρηστών. Το σχήμα 6 δείχνει ότι ο αριθμός των προγραμματισμένων χρηστών αυξάνεται με τον αριθμό των χρηστών και είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των υποφορέων. Στο σύστημα OFDM περισσότεροι από οκτώ χρήστες έχουν πρόσβαση στους υποφορείς, αφού ένας υποφορέας μπορεί να εκχωρηθεί μόνο σε ένα χρήστη. Όταν ο παράγοντας υπερφόρτωσης αυξάνεται από 1 σε 1,67, ο αριθμός των προγραμματισμένων χρηστών αυξάνεται καθώς περισσότεροι χρήστες μπορούν να μοιράζονται τον ίδιο φορέα. Ο πίνακας 9 συνοψίζει τα θεωρητικά μοντέλα παιγνίων που χρησιμοποιούνται για την κατανομή ραδιο-πόρων σε διάφορα συστήματα NOMA. Τυπικά, οι προσεγγίσεις παιγνίων, όπως ο έλεγχος ισχύος, οδηγούν σε υποβέλτιστες λύσεις, αλλά απαιτούν μικρότερη ανταλλαγή πληροφοριών σε

σύγκριση με τις προσεγγίσεις συνεταιριστικών παιγνίων.

Applications	Downlink game models	Uplink game models
PD-NOMA	Coalition formation game: Mobile users are categorized according to their QoS requirements, and distributed coalition formation algorithms based on the strategic form can then be applied.	Noncooperative power control game: The players are the mobiles, and a utility function is the negative of the individual transmit power of the mobile user transmission.
CD-NOMA	Matching game: The set of users and subcarriers can be considered as two disjoint sets of selfish and rational agents that aim to maximize their own benefits.	Noncooperative contention control game: Players are mobile users, pricing is used to introduce cooperation, and contention window length of mobile users can be adjusted by iteratively updating algorithm.

Πίνακας 9. Σύνοψη μοντέλων παιγνίων εκχώρησης πόρων για συστήματα NOMA

4.6.7 Πιθανές εφαρμογές και προκλήσεις έρευνας

Υβριδικό NOMA: Το NOMA ενθαρρύνει πολλούς χρήστες να μοιράζονται τα ίδια κανάλια ταυτόχρονα με βάση τις συνθήκες του καναλιού τους. Έτσι, στην περίπτωση κατά την οποία οι συνθήκες καναλιού των χρηστών είναι παρόμοιες το κέρδος απόδοσης του NOMA έναντι του OMA μπορεί να μειωθεί. Αυτό παρακίνησε στον σχεδιασμό του υβριδικού NOMA το οποίο χρησιμοποιεί διαφορετικούς τρόπους πολλαπλής πρόσβασης ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού. Αυτή η διαδικασία μπορεί να διαμορφωθεί από εξελικτικά παίγνια όπου κάθε χρήστης κινητής τηλεφωνίας είναι ένας παίκτης, και η στρατηγική που σχετίζεται με κάθε παίκτη είναι ο αλγόριθμος που αποφασίζει τη λειτουργία που πρέπει να χρησιμοποιήσει ο χρήστης. Ένας παίκτης μπορεί να αποφασίσει να αλλάξει σε διαφορετικό τρόπο εάν μπορεί να κερδίσει υψηλότερη απόδοση. Η λύση του παιγνίου είναι η εξελικτική ισορροπία όπου, οι παίκτες δεν έχουν

κίνητρο να επιλέξουν διαφορετικές στρατηγικές.

Συνεργατικά NOMA: Η αναμετάδοση έχει ήδη αναπτυχθεί σε πολλά συστήματα επικοινωνιών, όπως τα δίκτυα LTE, όπου πολλοί κόμβοι πηγής επικοινωνούν με έναν προορισμό, με τη βοήθεια ενός ή πολλαπλών ρελέ. Με την εφαρμογή του NOMA στο ρελέ, ο ηλεκτρονόμος μπορεί πρώτα να λάβει και στη συνέχεια να προωθήσει τα σήματα ταυτόχρονα, βελτιώνοντας τη φασματική απόδοση [102]. Η διαδικασία επικοινωνίας μπορεί να περιγραφεί σύντομα ως εξής:

- Οι πηγές μεταδίδουν πρώτα τα σήματα και στα δύο ρελέ NOMA σε έναν δεδομένο φορέα.
- Στη συνέχεια, ο ηλεκτρονόμος NOMA προωθεί το ληφθέν σήμα στον προορισμό με μια κατάλληλη ισχύ εκπομπής στον δεδομένο υποφορέα.

Ως εκ τούτου, τα προβλήματα κατανομής πόρων βρίσκονται σε ένα κοινό σχεδιασμό για την ομαδοποίηση των κόμβων προέλευσης και προορισμού και την κατανομή ισχύος, τα οποία μπορούν να μοντελοποιηθούν και να λυθούν με τη χρήση παιγνίων δημοπρασιών, όπου ο αναμεταδότης είναι ο δημοπράτης που παρέχει πηγές ενέργειας και ράδιο-φάσματος και οι κόμβοι προέλευσης είναι οι υποψήφιοι που έχουν απαιτήσεις επικοινωνίας.

MIMO NOMA: Η βασική ιδέα του NOMA μπορεί εύκολα να επεκταθεί στην περίπτωση όπου όλοι οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με πολλαπλές κεραίες, με αποτέλεσμα το MIMO PD/CD-NOMA [103]. Για μεταδόσεις downlink, ο σταθμός βάσης μπορεί να χρησιμοποιήσει τις πολλαπλές κεραίες του, είτε για σχηματισμό δέσμης είτε για να αυξήσει το SINR λήψης, είτε για να αυξήσει την χωρική πολυπλεξία, ενώ στο uplink, ο στόχος του NOMA είναι να αυξήσει το κέρδος χωρικής πολυπλεξίας χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες. Στην περίπτωση αυτή, το πρόβλημα βελτιστοποίησης μεταξύ των επιπέδων των εφαρμογών MIMO γίνεται πιο περίπλοκο. Τα μοντέλα παιγνίων πολλαπλών επιπέδων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση της κοινής κατανομής πόρων σε διαφορετικούς τομείς.

Γνωσιακά συστήματα NOMA: Τα συστήματα NOMA μπορούν να αντιμετωπιστούν ως μια ειδική περίπτωση γνωσιακών ράδιο-δικτύων, όπου οι χρήστες με κακές συνθήκες καναλιών μπορούν να αντιμετωπίζονται ως πρωτογενείς χρήστες. Προκειμένου να καταστείλουν τη θερμοκρασία

παρεμβολής που παρατηρείται στους πρωτεύοντες χρήστες, οι αλγόριθμοι κατανομής μπορούν να σχεδιαστούν εφαρμόζοντας ένα παίγνιο Stackelberg, στο οποίο οι χρήστες NOMA μπορούν να κατηγοριοποιηθούν είτε ως ηγέτες είτε ως οπαδοί ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού τους ή τις απαιτήσεις QoS. Αντίστροφα, η έννοια του NOMA μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης των γνωστικών ράδιο-δικτύων. Για παράδειγμα η πολιτική ανταμοιβής μπορεί να εφαρμοστεί για να παρακινήσει τη συνεργασία μεταξύ των πρωτογενών και δευτερογενών χρηστών, που αποδίδουν μια ιδανική εφαρμογή για ένα συμβατικό παίγνιο.

D2D NOMA: Η επικοινωνία D2D επιτρέπει την τοπική μετάδοση από ομότιμους χρήστες μεταξύ κινητών συσκευών που παρακάμπτουν τους σταθμούς βάσης[104]. Πολλές εφαρμογές, όπως οι επικοινωνίες V2V, απαιτούν αυστηρά χαμηλή καθυστέρηση γεγονός που δημιουργεί προκλήσεις για τα δίκτυα D2D[105]. Έτσι, πολλοί χρήστες με διαφορετικούς τύπους αιτημάτων κυκλοφορίας μπορούν να μεταδίδουν ταυτόχρονα στο ίδιο κανάλι για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης και την ανακούφιση της συμφόρησης μειώνοντας έτσι την λανθάνουσα κατάσταση. Τα παίγνια πολλαπλών επιπέδων όπως τα συνεργατικά και τα μη συνεργατικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του προβλήματος ελέγχου ισχύος.

4.7 MFG Παίγνια για παρεμβολές και έλεγχο ενεργειακής απόδοσης στα 5G

Τα δίκτυα κινητής επικοινωνίας 5G θα αντιμετωπίσουν την κρίση της χωρητικότητας του δικτύου, της έλλειψης ενέργειας και της αύξησης του κόστους, κυρίως από τον πολλαπλασιασμό των κινητών χρηστών του διαδικτύου και του IOT, σε συνδυασμό με τις πλούσιες απαιτήσεις υπηρεσιών πολυμέσων σε δισεκατομμύρια έξυπνες συσκευές. Για παράδειγμα, οι επικοινωνίες M2M και D2D απαιτούν υψηλότερες απαιτήσεις ικανοτήτων και διαφορετικών επιδόσεων, οι οποίες επιβαρύνουν τις τρέχουσες αρχιτεκτονικές δικτύων και την τεχνολογία διαχείρισης πόρων [107-113].

Οι εξαιρετικά πυκνές μικροκυψέλες στις επικοινωνίες D2D μπορούν να παρέχουν πλούσιες υπηρεσίες πολυμέσων για δισεκατομμύρια έξυπνες συσκευές. Η Θεωρία Παιγνίων βοηθά να χαρακτηριστούν ως ορθολογικές

συμπεριφορές, μοντέλα αλληλεπιδράσεων και να σχεδιαστούν καταναεμημένοι αλγόριθμοι. Τα δίκτυα 5G απαιτούν ένα προηγμένο πλαίσιο Θεωρίας Παιγνίων το οποίο θα διευκολύνει την ανάλυση του καταναεμημένου ελέγχου, ακόμη και όταν συνδυάζεται με τεράστιες και πολύπλοκες παρεμβολές. Στην συνέχεια θα γίνει συνοπτική περιγραφή των τελευταίων εφαρμογών προηγμένων παιγνίων καθώς και μίας εφαρμογής MFG(Mean-Field-Game Theory) σε επικοινωνίες D2D για την ικανοποίηση των απαιτήσεων σε παρεμβολές και δυναμική διατήρηση ενέργειας.

Στην εποχή 5G, ο αριθμός των κόμβων και των συσκευών θα είναι τεράστιος οδηγώντας έτσι στην υπολογιστική δυσκολία των συμβατικών παιγνίων. Αυτό καθορίζεται κυρίως από τη στρατηγική του συγκεκριμένου παίκτη ως απάντηση στις στρατηγικές όλων των άλλων παικτών. Υπάρχει τεράστια σήμανση και υπάρχουν εκτεταμένες πληροφορίες με τη δυναμική χωροχρόνου όταν ο αριθμός των παικτών είναι τεράστιος. Από την άλλη πλευρά, η βέλτιστη πολιτική θα πρέπει να γίνει, σύμφωνα με τη δυναμική χωροχρονικών συνθηκών σε 5G δίκτυα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο αναπτύχθηκε το MFG. Στο MFG η έννοια του μέσου πεδίου μπορεί να χαρακτηρίσει τη χωροχρονική δυναμική του πλαισίου, για παράδειγμα, τις δισδιάστατες παρεμβολές και τις ενεργειακές καταστάσεις, που βοηθά τον παίκτη να λάβει τη βέλτιστη απόφαση που ανταποκρίνεται μόνο στο μέσο πεδίο, αντί των στρατηγικών για όλους τους παίκτες. Είναι μεγάλη διαφορά από όλα τα συμβατικά παίγνια. Επομένως, η λήψη αποφάσεων βασισμένη σε MFG διανέμεται με λιγότερα γενικά έξοδα [114-119].

Οι εξαιρετικά πυκνές μικροκυψέλες είναι ένας ισχυρός τρόπος για να ικανοποιηθεί η πρόκληση δυναμικότητας. Οι μικροκυψέλες επαναχρησιμοποιούν φάσμα αδειοδοτημένων μακροκυψελών. Χρησιμοποιούν τα κέρδη κεραίας για την κάλυψη ποικίλης κυκλοφορίας, οδηγώντας έτσι σε διαφορετικά σενάρια κάλυψης και εφαρμογής. Εν τω μεταξύ, τα σχηματισθέντα εξαιρετικά πυκνά δίκτυα μικροκυψελών έχουν άλλα πολλά υποσχόμενα χαρακτηριστικά, όπως, αρχιτεκτονική κεντρικής διαχείρισης και συντήρησης και αυτόνομο καταναεμημένο έλεγχο βασισμένο στην περιβαλλοντική γνώση. Ωστόσο, τα οφέλη αυτά παρουσιάζουν τεχνικές προκλήσεις όπως η μείωση παρεμβολών με υπερβολική πυκνότητα ανάπτυξης, τόσο για ενδοεπίπεδα όσο

και για διαστρωματική παρεμβολή, οι οποίες μειώνουν την απόδοση, που προκύπτει από την επαναχρησιμοποίηση πλήρους συχνότητας μεταξύ διαφορετικών κόμβων.

Αυτές οι προκλήσεις θα είναι πιο σοβαρές σε υπερπυκνά δίκτυα με μεγάλο πληθυσμό κόμβων και μεταβλητές. Αυτό απαιτεί μεθόδους βελτιστοποίησης μεγάλης κλίμακας για την αντιμετώπιση προβλημάτων σχεδιασμού με διακριτές και συνεχείς μεταβλητές. Με ένα τεράστιο αριθμό μικροκυψελών, η κεντρική διαχείριση παρεμβολών αντιμετωπίζει βαριά σηματοδότηση, επεκτασιμότητα και ευελιξία, σε συνδυασμό με την τυχαία ανάπτυξη. Επομένως, η κατανεμημένη διαχείριση παρεμβολών πρέπει να μελετηθεί με αυτο-οργανωτικά χαρακτηριστικά και γι'αυτό η Θεωρία Παιγνίων έχει βρει εκτεταμένες εφαρμογές πρόσφατα [111-113].

4.7.1 Πρόσφατες εφαρμογές Θεωρίας Παιγνίων

Οι πιο πρόσφατες εφαρμογές παιγνίων παρέχουν μια ποικιλία μαθηματικών εργαλείων για την αποτελεσματική μοντελοποίηση και ανάλυση των ατομικών ή ομαδικών συμπεριφορών των χρηστών του D2D. Οι συγγραφείς στο [113] παρουσίασαν ένα νέο σχήμα κατανομής φάσματος για τις επικοινωνίες D2D επιτρέποντας δύο ή περισσότερες συνδέσεις D2D να μοιράζονται το φάσμα τους. Τα μοντέλα παιγνίων μπορούν να παρέχουν κατανεμημένες λύσεις στα προβλήματα κατανομής πόρων για την επικοινωνία D2D. Συγκεκριμένα, η πυκνή και τυχαία ανάπτυξη των γνωσιακών μικρών κυψελών δημιουργεί νέες προκλήσεις όσον αφορά την επεκτασιμότητα και την προσαρμογή. Τα περισσότερα από τα παίγνια που εξετάστηκαν στα δίκτυα D2D [112] και στα γνωσιακά δίκτυα μικροκυψελών[111] είναι με τις λειτουργίες χρησιμότητας που σχετίζονται με την αποτελεσματικότητα του φάσματος. Στην πράξη, το φάσμα η ενέργεια και η αποδοτικότητα κόστους θα πρέπει να εξετάζονται από κοινού σε δίκτυα 5G. Η ενεργειακή απόδοση είναι μια κρίσιμη απαίτηση απόδοσης για τις επικοινωνίες, ειδικά όταν οι μικροκυψέλες αναπτύσσονται πυκνά για να βελτιώσουν την ποιότητα της εμπειρίας των χρηστών. Ένα νέο πλαίσιο διαπραγμάτευσης συνεργατικού παιγνίου διατυπώθηκε για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης σε ένα πυκνό δίκτυο μικροκυψελών [120]. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε μια νέα λειτουργία κοινής ωφέλειας στο πλαίσιο συνεργασίας

για την αντιμετώπιση τόσο της φασματικής απόδοσης όσο και της ενεργειακής απόδοσης.

4.7.2 Mean Field Games εφαρμογές

Τα MFG παίγνια χαρακτηρίζουν τις συμπεριφορές πολλών παραγόντων και βελτιστοποιούν δυναμικά τη στρατηγική των παικτών σε χώρο και χρόνο. Έχουν βρει εφαρμογές σε διάφορους τομείς για να διατυπώσουν ορθολογικά και διαδραστικά προβλήματα με τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Ορθότητα των παικτών, η οποία εφαρμόζεται γενικά σε οποιοδήποτε είδος παιγνίου για να διασφαλιστεί ότι οι παίκτες μπορούν να παίρνουν λογικές αποφάσεις.
2. Ύπαρξη μιας συνέχειας των παικτών και γενική εφαρμογή για να διασφαλιστεί ότι οι παίκτες μπορούν να πάρουν λογικές αποφάσεις.
3. Μεταβλητότητα των καταστάσεων μεταξύ των παικτών, κάθε παίκτης είναι απειροελάχιστος. Κατά συνέπεια, η συμβολή του κάθε παίκτη στο παίγνιο είναι μικρή.
4. Αλληλεπίδραση των παικτών με το μέσο πεδίο. Κάθε παίκτης επιλέγει τη δράση του σύμφωνα με το δικό του συμφέρον και την κατάσταση των άλλων παικτών που επιλέγουν ταυτόχρονα τη δική τους με τον ίδιο τρόπο. Κατά την ανάλυση του παιγνίου και την εξεύρεση ισορροπίας είναι αρκετή η μελέτη ενός τυπικού παίκτη.

Σε ένα παίγνιο μέσου πεδίου, η τυπική έννοια του μέσου πεδίου, είναι η κατανομή της στατιστικής πυκνότητας της δυναμικής κατάστασης των παικτών. Ένα παίγνιο μέσου πεδίου έχει πάντα μια λειτουργία γραμμικού κόστους και μια Brownian γραμμική δυναμική λειτουργία. Στην πραγματικότητα, το μέσο πεδίο είναι μια γνωστή έννοια στη φυσική και την οικονομία, και περιγράφει τις μαζικές συμπεριφορές πολλών σωματιδίων. Το μέσο πεδίο είναι ένας μέσος όρος που αφορά την έρευνα του γενικού παίκτη από άλλους παίκτες. Στην πραγματικότητα, ο γενικός παίκτης δεν ενδιαφέρεται για διαδραστικές επιπτώσεις από άλλους, αλλά για τη μαζική συμπεριφορά. Μαθηματικά, το $s_i(t)$ είναι ο χώρος ενός γενικού παίκτη i κατά τη χρονική στιγμή t , που μπορεί να είναι μονοδιάστατος ή πολυδιάστατος. Για παράδειγμα, τόσο η

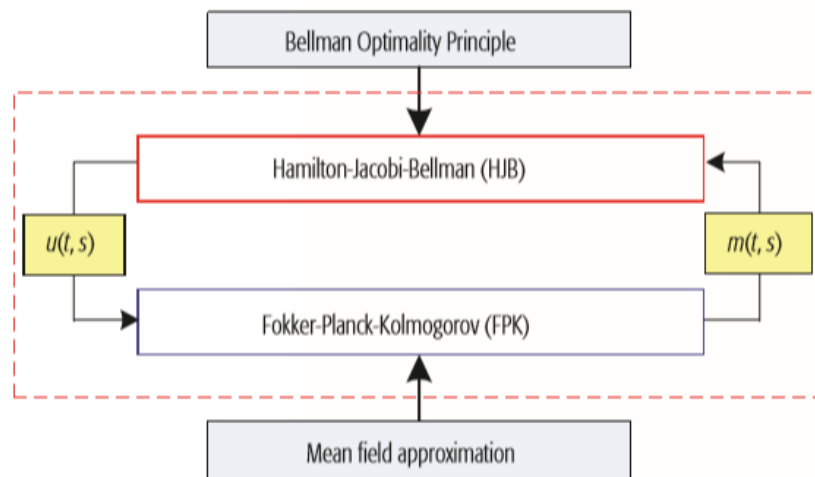
αντιληπτή παρέμβαση όσο και η υπολειπόμενη ενέργεια θα πρέπει να διερευνηθούν κατά το σχεδιασμό μιας βέλτιστης πολιτικής ελέγχου ισχύος για μια γενική σύνδεση D2D.

Ορίζουμε το μέσο πεδίο $m(t,s)$ ως:

$$m(t,s) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I)\{s_i(t) = s\}$$

όπου I δηλώνει μια συνάρτηση δείκτη που επιστρέφει 1 εάν η δεδομένη συνθήκη είναι αληθής και 0 αν δεν είναι. Σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, το μέσο πεδίο είναι η κατανομή πιθανότητας των καταστάσεων πάνω από το σύνολο των παικτών.

Τα βασικά παίγνια πεδίου εκφράζονται ως συζευγμένο σύστημα δύο εξισώσεων Hamilton-Jacobi-Bellman(HJB) και Fokker-Planck-Kolmogorov(FPK), όπως φαίνεται στο σχήμα 7.



Σχήμα 7. Βασικά στοιχεία για τα παίγνια μέσου πεδίου.

Μια εξίσωση τύπου FPK εξελίσσεται προς τα εμπρός σε χρόνο που διέπει την εξέλιξη της συνάρτησης πυκνότητας των παραγόντων. Μια εξίσωση τύπου HJB εξελίσσεται προς τα πίσω με τον χρόνο που διέπει τον υπολογισμό της βέλτιστης διαδρομής για κάθε παράγοντα. Έστω $c(t,x,p)$ η στιγμιαία συνάρτηση κόστους του γενικού παίκτη κατά το χρόνο t χρησιμοποιώντας την πολιτική p στην κατάσταση x . Ο στόχος είναι να σχεδιαστεί η πολιτική p για την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους σε μια περίοδο $[0,T]$. Ως εκ τούτου

μπορεί να συνοψιστεί ως ένα βέλτιστο πρόβλημα ελέγχου με τη δυναμική κατάσταση. Σύμφωνα με την αρχή της βελτιστοποίησης του Bellman, μια βέλτιστη πολιτική ελέγχου θα πρέπει να έχει το κύρος ότι ανεξάρτητα από την αρχική κατάσταση ή την αρχική απόφαση, οι υπόλοιπες αποφάσεις πρέπει να αποτελούν τη βέλτιστη πολιτική έναντι των καταστάσεων που προκύπτουν από την πρώτη απόφαση. Αυτή η συνάρτηση τιμής πρέπει να ικανοποιεί μια μερική διαφορική εξίσωση που είναι μια εξίσωση HJB. Η λύση της εξίσωσης HJB είναι η συνάρτηση τιμών, η οποία δίνει το ελάχιστο κόστος για ένα δεδομένο δυναμικό σύστημα με μια συναφή συνάρτηση κόστους. Η συνάρτηση τιμών και το μέσο πεδίο αλληλεπιδρούν μεταξύ τους όπως φαίνεται στο σχήμα 7, όπου η συνάρτηση τιμών είναι η λύση της εξίσωσης HJB, ενώ η μέση τιμή πεδίου είναι η λύση της εξίσωσης FPK. Τόσο η εξίσωση FPK όσο και η εξίσωση HJB είναι μερικές διαφορικές λειτουργίες, οι οποίες μπορούν να προκύψουν από την τυποποιημένη μέθοδο [114].

Συνοψίζοντας, η κλασική έννοια της λύσης στο παίγνιο μέσου πεδίου δίνεται από ένα ζεύγος χαρτών (u, m) , όπου $u = u(t, x)$ είναι η συνάρτηση τιμών ενός τυπικού παίκτη ενώ το $m = m(t, x)$ δηλώνει την πυκνότητα στο χρόνο t και στη θέση x του πληθυσμού. Η συνάρτηση τιμών u ικανοποιεί ένα HJB, στο οποίο είναι παράμετρος και περιγράφει την επίδραση του πληθυσμού στο κόστος κάθε παράγοντα ενώ η πυκνότητα m εξελίσσεται στο χρόνο σύμφωνα με την εξίσωση FPK στην οποία το u εισάγεται ως μετατόπιση. Πιο συγκεκριμένα, το ζεύγος (u, m) είναι μια λύση του παιγνίου μέσου πεδίου. Η εξίσωση HJB ρυθμίζει τον υπολογισμό της βέλτιστης διαδρομής ελέγχου του παίκτη, ενώ η εξίσωση FPK ρυθμίζει την εξέλιξη της μέσης συνάρτησης πεδίου των παικτών.

4.7.3 Εφαρμογές MFG

Hyper-Dense Heterogeneous Networks: Η διαχείριση των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών διαμορφώθηκε ως δύο συνδεδεμένα προβλήματα στο [114], όπου η θεωρία μέσου πεδίου χρησιμοποιήθηκε για να αποσυνδέσει ένα περίπλοκο πρόβλημα μεγάλης κλίμακας βελτιστοποίησης από μια οικογένεια τοπικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Έτσι, κάθε σταθμός βάσης μιας κυψέλης μπορεί να εφαρμόσει την πολιτική του, χρησιμοποιώντας τις τοπικές πληροφορίες και ορισμένες μακροσκοπικές πληροφορίες. Οι συγγραφείς στο [114] ανέλυσαν την

απόδοση δύο διαφορετικών λειτουργιών κόστους για τη διαμόρφωση παιγνίου μέσου πεδίου. Και οι δύο αυτές λειτουργίες κόστους σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας ανάλυση στοχαστικής γεωμετρίας με τέτοιο τρόπο ώστε οι λειτουργίες κόστους να ισχύουν για τη ρύθμιση του παιγνίου. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος πεπερασμένων διαφορών με βάση το σχήμα Lax-Friedrichs και τη χαλάρωση Lagrange για την επίλυση του αντίστοιχου παιγνίου μέσου πεδίου.

Πράσινες επικοινωνίες και γνωσιακά δίκτυα ραδιοσυχνοτήτων: Οι συγγραφείς στο [116] μελέτησαν τα βασικά μοντέλα πεδίων για γνωσιακά δίκτυα ραδιοσυχνοτήτων με κινητικότητα και περιορισμούς ενέργειας. Οι χρήστες είναι περιορισμένοι σε ενέργεια και κάθε δευτερεύον χρήστης αποφασίζει την ισχύ της μετάδοσης ανάλογα με την πρωτεύουσα ισχύ του σήματος και την κατάσταση της μπαταρίας που απομένει. Οι πιθανότητες πρόσβασης δευτερευόντων χρηστών υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τον τύπο του Ito. Αποδεικνύεται πως όταν ο αριθμός των πομπών είναι υψηλός, το στοχαστικό διαφορικό παίγνιο συγκλίνει σε ένα παίγνιο μέσου πεδίου όπου η ισορροπία είναι η λύση ενός συστήματος δύο μερικών διαφορικών εξισώσεων όπου η ισχύς που καταναλώνεται για τη μετάδοση και οι συντελεστές διαύλου αυτών εξελίσσονται με στοχαστικό τρόπο.

Άλλες εφαρμογές: Οι συγγραφείς στο [117] εξέτασαν τα προβλήματα προσωρινής μνήμης σε μεγάλα cloud δίκτυα, όπου παρείχαν την βέλτιστη τιμολόγηση που δίνει μια αποτελεσματική πολιτική κατανομής πόρων. Τα περισσότερα δημοσιευμένα έργα συγκεντρώνονται στον έλεγχο της ισχύος με γραμμική υπολειπόμενη ενεργειακή κατάσταση [114-116]. Υπάρχουν και άλλες εφαρμογές παιγνίων μέσου πεδίου με διαφορετική δυναμική κατάσταση σε πρακτικά σενάρια επικοινωνίας [117-118].

4.7.4 Σενάρια δικτύου και τυπικά προβλήματα

Οι παραδοσιακές συσκευές D2D τροφοδοτούνται με μπαταρίες. Συνεπώς, η επέκταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας και η εξοικονόμηση ενέργειας είναι σημαντική για τη βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών. Ωστόσο, τόσο η δυναμική των παρεμβολών όσο και η υπολειπόμενη ενέργεια πρέπει να λαμβάνονται πλήρως υπόψη κατά τον έλεγχο ισχύος της συσκευής. Στην

συνέχεια γίνεται μελέτη του ελέγχου ισχύος για παρεμβολές και ενεργειακούς αισθητήρες για μια γενική συσκευή σε υπερσύγχρονα δίκτυα D2D στο πλαίσιο του παιγνίου μέσου πεδίου. Στις επικοινωνίες D2D, κάθε παίκτης βελτιστοποιεί την πολιτική ελέγχου ισχύος για να ελαχιστοποιήσει τη συνάρτηση κόστους λαμβάνοντας υπόψιν τη δισδιάστατη δυναμική παρεμβολών και τις υπόλοιπες καταστάσεις ενέργειας. Στο [114], διερευνώνται από κοινού οι επιπτώσεις της δυναμικής παρεμβολής και της παραμένουσας ενέργειας στον έλεγχο ισχύος ενός γενικού παίκτη D2D και χρησιμοποιείται μια μέθοδος πεπερασμένων διαφορών για την απευθείας επίλυση της εξίσωσης FPK, καθώς και την έμμεση επίλυση της HJB.

4.7.5 Προτεινόμενος Αλγόριθμος

Ο προτεινόμενος έλεγχος ισχύος και παρεμβολής ενέργειας σε εξαιρετικά πυκνά δίκτυα D2D έχει ως εξής:

Αρχικοποίηση: Τυχαία αρχικοποίηση των δυνατοτήτων μετάδοσης των ζευγών D2D και των συναφών παραμέτρων της δυναμικής κατάστασης, όπου έχουμε δισδιάστατες καταστάσεις ενέργειας και παρεμβολές. Εδώ, η δυναμική ενεργειακή κατάσταση είναι μια γραμμική συνάρτηση της ισχύος και του χρονικού διαστήματος, ενώ η δυναμική της κατάστασης παρεμβολής μπορεί να προσεγγιστεί από τη γραμμική συνάρτηση της διαφορικής λειτουργίας του κέρδους του καναλιού ισχύος και των παρεμβολών.

Υπολογισμός μέσου πεδίου: Με προκαθορισμένα όρια κατάστασης, πρώτα υπολογίστηκαν οι τιμές παρεμβολής και ενεργειακής κατάστασης, οδηγώντας έτσι στις συμπεριφορές μέσου πεδίου.

Εξισώσεις HJB και FPK: Εφαρμόζουμε τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για την ενημέρωση τόσο των εξισώσεων HJB όσο και των FPK, όπου γνωρίζουμε την πολιτική ελέγχου ισχύος:

$$p^{t+1} = \min_p f(u(t, m, p))$$

και μέσο πεδίο σύμφωνα με το:

$$m^{t+1} = g(m, p, t)$$

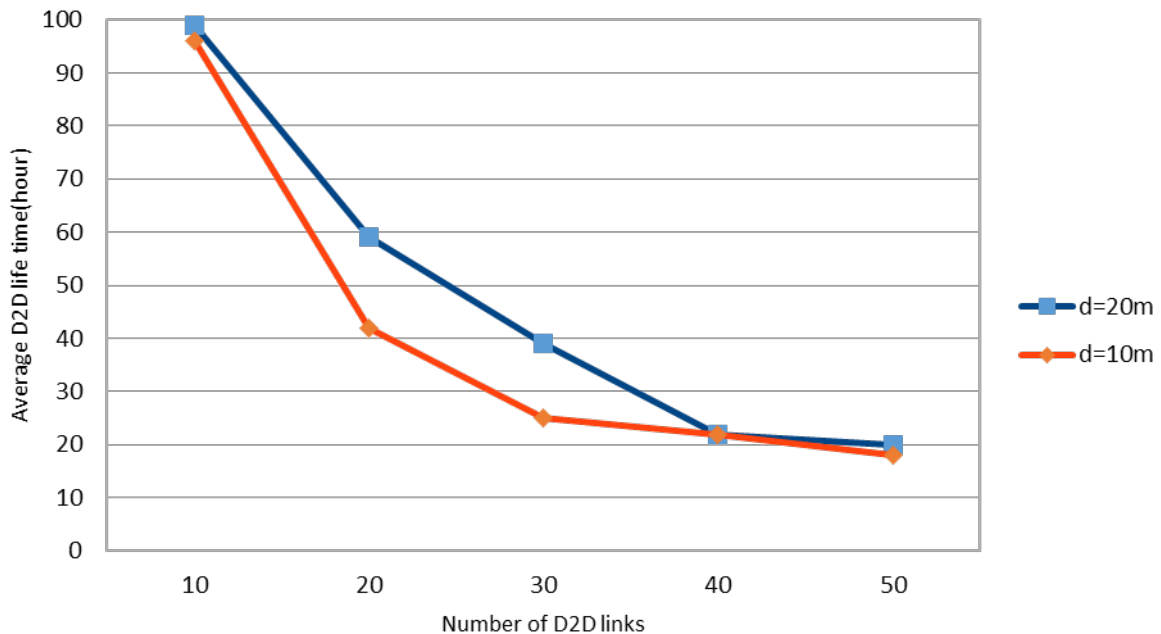
Εδώ, f και g είναι οι παράγωγες εξισώσεις HJB και FPK.

4.7.6 Προσομοίωση και αποτελέσματα

Για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης[106], χρησιμοποιείται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας ως μέτρηση της απόδοσης. Οι σύνδεσμοι D2D κατανέμονται ομοιόμορφα με τον μέσο όρο απόστασης επικοινωνίας $d=20m$ και $d=10m$. Όλες οι συσκευές έχουν την ίδια σταθερή κατανάλωση ισχύος. Για να ληφθεί υπόψη η μη γραμμική πρόσκρουση, διαμορφώνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας χρησιμοποιώντας το νόμο της Peukert, όπου η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι:

$$i = \frac{Cv^{13}}{T(p + p_0)^{13}}$$

όπου $C=800mAh$ είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας, p η μέση δύναμη μετάδοσης του γενικού παίκτη, $p_0=2,5 W$ είναι η σταθερή ισχύς κυκλώματος, ο όρος T είναι η περίοδος ελέγχου και $u=4V$ είναι η τάση λειτουργίας.



Σχήμα 8. Μέση διάρκεια ζωής της μπαταρίας με παρεμβολές και έλεγχο ενεργειακής επίγνωσης.

Στο σχήμα 8 φαίνεται η μέση διάρκεια ζωής κάθε συσκευής σε σχέση με τον αυξανόμενο αριθμό συνδέσεων D2D, ο οποίος λαμβάνεται από το προτεινόμενο μέσο πεδίο βασισμένο σε παίγνιο πεδίου.

Τα συμπεράσματα είναι τα εξής: Πρώτα ο μέσος χρόνος ζωής κάθε συσκευής μειώνεται με τον αυξανόμενο αριθμό συνδέσεων D2D, ο οποίος οφείλεται κυρίως στην άθροιση παρεμβολών στην περίπτωση επαναχρησιμοποίησης πλήρους συχνότητας. Στη συνέχεια, ο μέσος χρόνος ζωής με μακρινή απόσταση επικοινωνίας θα είναι μεγαλύτερος, πράγμα που είναι ενδιαφέρον. Όσο μεγαλύτερες είναι οι αποστάσεις επικοινωνίας, τόσο μικρότερη είναι η διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

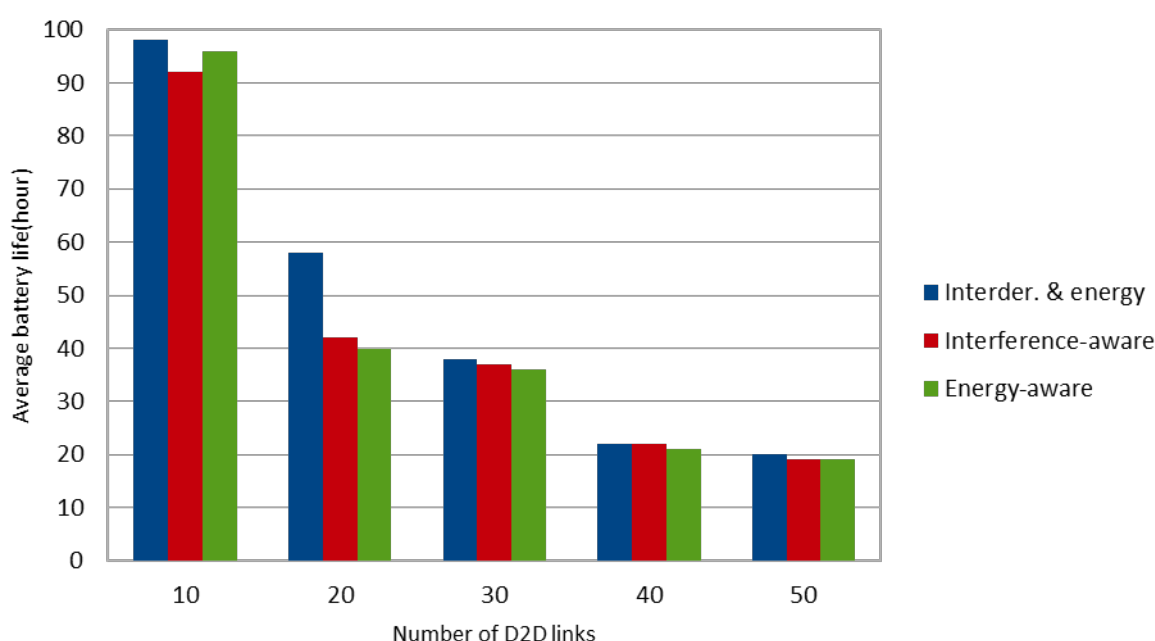
Οι κύριοι λόγοι συνοψίζονται ως εξής:

- Ο λόγος σήματος προς παρεμβολή συν το θόρυβο (SINR) ορίζεται ως ο λόγος της αποτελεσματικά ληφθείσας ισχύος και της αθροιστικής ισχύος παρεμβολής όλων των πηγών παρεμβολής συν την ισχύ θορύβου. Επομένως, υψηλότερη ισχύς μετάδοσης ή μικρότερη απόσταση σημαίνει μεγαλύτερο SINR. Έτσι, με τον παραδοσιακό τρόπο, μεγαλύτερη απόσταση σημαίνει ότι η ισχύς σήματος που λαμβάνεται από τον χρήστη-στόχο θα είναι χαμηλότερη και το SINR θα είναι χαμηλότερο. Το χαμηλό SINR έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο αριθμό σφαλμάτων που θα προκαλέσουν επαναλαμβανόμενες μεταδόσεις και θα καταναλώσουν πρόσθετη ισχύ.

- Η παρούσα πολιτική ελέγχου ισχύος λαμβάνει πλήρως υπόψιν τόσο την εναπομένουσα ενέργεια όσο και τις αντιληπτές καταστάσεις παρεμβολής. Έτσι μια μεγαλύτερη απόσταση σημαίνει μικρότερη αθροιστική συσχέτιση. Με τον αριθμό των συνδέσεων D2D να αυξάνεται σε περισσότερες από 35 μπορούμε να δούμε ότι μια παρόμοια διάρκεια ζωής της μπαταρίας επιτυγχάνεται και στις δύο περιπτώσεις, η οποία είναι το αποτέλεσμα του κενού παρεμβολής που έχει γεμίσει πλήρως. Επομένως είναι ασφαλές να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι το πλαίσιο που βασίζεται στο παίγνιο μπορεί να εφαρμόσει την γνώση των παρεμβολών, τον έλεγχο ισχύος και την καλύτερη αντίδραση στην αθροιστική παρεμβολή που παρατηρείται. Το παίγνιο μέσου πεδίου είναι χαρακτηριστικό σε εξαιρετικά πυκνά δίκτυα 5G λόγω του δυναμικού μοντέλου, του υπολογισμού μέσου πεδίου και των παραγόμενων HJB και FPK. Η λήψη αποφάσεων

βασισμένη στο παίγνιο είναι μια βέλτιστη πολιτική off-line για μια χρονική περίοδο, σύμφωνα με τη δυναμική χωροχρονικών συνθηκών στα 5G δίκτυα. Επομένως, η πολιτική λαμβάνει πλήρως υπόψιν την εξέλιξη κατάστασης που καθοδηγείται από την εξίσωση FPK.

Στο σχήμα 9 παρουσιάζεται η βελτιωμένη απόδοση τόσο των παρεμβολών όσο και του ελέγχου της κατανάλωσης ενέργειας. Ως συμπέρασμα προκύπτει ότι το προτεινόμενο σχέδιο μπορεί να εξοικονομήσει ενέργεια και να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας σε σύγκριση με τον έλεγχο παρεμβολών ή ενεργειακής δυναμικής.



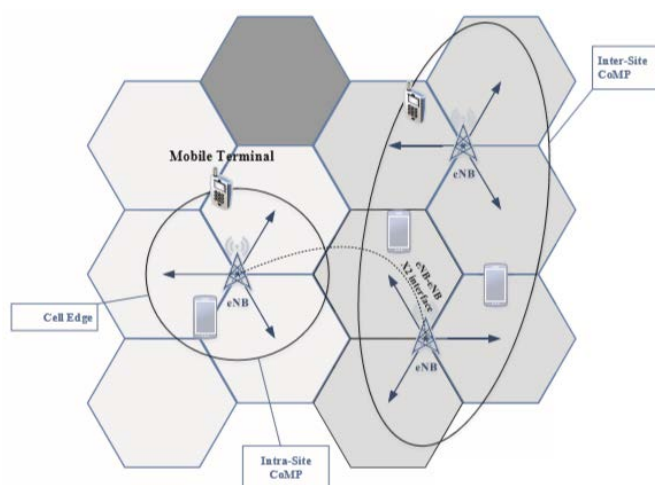
Σχήμα 9. Βελτιωμένη απόδοση σε σύγκριση με τις παρεμβολές ή τον δυναμικό έλεγχο ενέργειας.

4.8 Σύντομη παρουσίαση του COMP

Η εποχή 5G επιβάλλει ένα σύνολο αυστηρών απαιτήσεων για την επίτευξη εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης, υψηλής αξιοπιστίας και υψηλής απόδοσης σε ασύρματες κινητές συσκευές. Τέτοιες απαιτήσεις είναι πιο δύσκολο να επιτευχθούν στα πυκνά συνδεδεμένα δίκτυα. Το COMP θεωρείται υποψήφιο για τη διασφάλιση της μετάβασης από τα παλαιότερα δίκτυα στις μελλοντικές αρχιτεκτονικές ασύρματης πρόσβασης. Τα οφέλη του JT COMP στην αύξηση της αποτελεσματικότητας του φάσματος και της διαχείρισης παρεμβολών ενισχύονται με την προσαρμογή ενός παιγνίου συνασπισμού μεταξύ των

παρεμβαλλόμενων RRHs. Παρακάτω γίνεται παρουσίαση προσομοίωσης σε επίπεδο συστήματος που υποδεικνύει ένα προφανές πλεονέκτημα της προτεινόμενης COMP με βάση την Θεωρία Παιγνίων όσον αφορά την απόδοση και το SINR που επιτυγχάνεται για τους χρήστες που βρίσκονται στην άκρη της κυψέλης.

Το COMP επιτρέπει τη χρήση παρεμβολών μεταξύ κυψελών ως χρήσιμο σήμα. Ως εκ τούτου, οι χρήστες στην άκρη των κυψελών λαμβάνουν υψηλότερη απόδοση και αυξάνουν το συνολικό κέρδος απόδοσης δικτύου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση αποτελεσματικού συντονισμού μεταξύ πολλαπλών σημείων μετάδοσης (δηλαδή κεραιών), τα οποία σχηματίζουν μία περιοχή COMP. Ένα βασικό στοιχείο για τον συντονισμό στην περιοχή του COMP καθώς και την βάση για τις αποφάσεις μετάδοσης, είναι οι πληροφορίες κατάστασης καναλιών (Channel-State-Information, CSI) που αναφέρονται από τον εξοπλισμό χρήστη (User-Equipment, UE). Κάθε αναφορά που μεταδίδεται από ένα χρήστη αποτελεί τη βάση για διαφορετικές αποφάσεις μετάδοσης των συνεργαζόμενων σταθμών βάσης (BS) στην περιοχή του COMP. Τέτοιες αναφορές περιλαμβάνουν μία ποικιλία μετρήσεων (δηλ., Channel-Quality-Indicator, CQI, Rank-Indicator, RI, Precoder-Matrix-Indicator, PMI), οι οποίες χρησιμοποιούνται από τα συνεργαζόμενα στοιχεία δικτύου. Σύμφωνα με το 3GPP[106], το COMP μπορεί να ταξινομηθεί ως κόμβος COMP και εντός της περιοχής του COMP, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.



Σχήμα 10. Οπτικοποίηση του COMP[πηγή:110]

Ο συντονισμός πραγματοποιείται μεταξύ σταθμών βάσης που βρίσκονται σε ξεχωριστές γεωγραφικές περιοχές, ενώ το COMP εντός της περιοχής επιτρέπει τον συντονισμό μεταξύ τομέων του ίδιου σταθμού βάσης, χρησιμοποιώντας πολλαπλές μονάδες κεραίας. Υπάρχουν τρία διαφορετικά σενάρια όπου μπορεί να εφαρμοστεί το COMP.

Ομοιογενές Δίκτυο με Intra-Site CoMP: Σε αυτό το σενάριο, ο χώρος συντονισμού περιορίζεται στους τομείς(κυψέλες) μιας ενιαίας τοποθεσίας που ελέγχεται από ένα eNB(eNodeB-Σταθμός βάσης που ελέγχει τις κινητές συσκευές σε μια κυψέλη). Αυτό το σενάριο έχει το πλεονέκτημα ότι δεν υπάρχει ανάγκη για εξωτερικές συνδέσεις μεταξύ διαφορετικών τοποθεσιών και δεν υπάρχει ανάγκη για σύνδεση οπτικών ινών.

Ομογενές Δίκτυο με Inter-Site CoMP: Σε σύγκριση με το πρώτο σενάριο, ο χώρος συντονισμού επεκτείνεται ώστε να περιλαμβάνει τις κυψέλες διαφόρων ιστοτόπων. Αυτό το σενάριο μπορεί να πραγματοποιηθεί με την ύπαρξη μίας ενιαίας συνάρτησης eNB με πολλαπλές RRHs(Remote-Radio-Head) υψηλής ισχύος μετάδοσης σε διαφορετικές κυψέλες ή πολλαπλών eNBs σε διαφορετικές τοποθεσίες που συντονίζονται μεταξύ τους. Το επίπεδο απόδοσης σε αυτό το σενάριο εξαρτάται από τον αριθμό των κυψελών που εμπλέκονται και από την καθυστέρηση των συνδέσεων του ιστότοπου.

HetNets με χαμηλής ισχύος πικοκυψέλες: Σε αυτό το σενάριο, ο συντονισμός συμβαίνει μεταξύ μίας μακροκυψέλης και πολλαπλών RHH χαμηλής μετάδοσης ισχύος. Τα σημεία μετάδοσης/λήψης που δημιουργούνται από τα RHH έχουν διαφορετικά αναγνωριστικά(IDs) κυψελών από τα αναγνωριστικά μακροκυψελών. Αν και το COMP εφαρμόζεται τόσο στις διαδρομές επικοινωνίας uplink όσο και προς το downlink των κινητών δικτύων, στην συνέχεια εστιάζουμε κυρίως στο σενάριο κοινής μετάδοσης (JT). Το JT-CoMP είναι ένα προηγμένο σενάριο εφαρμογής του COMP, σύμφωνα με το οποίο κάθε χρήστης που δραστηριοποιείται στην περιοχή COMP είναι σε θέση να λαμβάνει τα ίδια δεδομένα από πολλαπλά σημεία μετάδοσης χρησιμοποιώντας τους ίδιους ράδιο-πόρους(δηλαδή χρόνο, συχνότητα) βελτιώνοντας συνολικά την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος και την απόδοση. Τα δεδομένα που ζητούνται από τον χρήστη είναι ταυτόχρονα διαθέσιμα σε όλα τα σημεία μετάδοσης στο σύνολο

COMP και κάθε σημείο μετάδοσης μεταδίδει το ίδιο μπλοκ πόρων, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα λήψης του χρήστη.

4.8.1 Παίγνιο με βάση το COMP

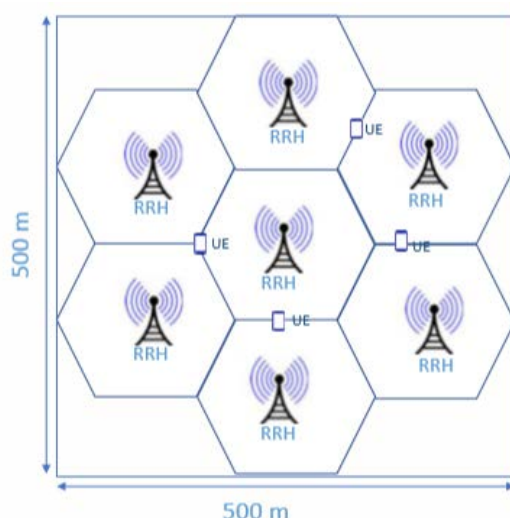
Η εμφάνιση του 5G επέτρεψε την συνεργασία μεταξύ των δικτύων και των στοιχείων δικτύωσης ως μια πιθανή λύση για τη βελτιστοποίηση της φασματικής αποτελεσματικότητας σε ένα πολύ πυκνό περιβάλλον ασύρματου δικτύου[107]. Προς το σκοπό αυτό, η Θεωρία Παιγνίων και τα παίγνια σχηματισμού συνασπισμού παρέχουν μια πλατφόρμα για την επίλυση σύνθετων σεναρίων συνεργασίας ασύρματων δικτύων με τη δημιουργία συνασπισμών μεταξύ κόμβων μετάδοσης που συνεργάζονται για τη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης των παικτών[108]. Έχουν διεξαχθεί σημαντικές έρευνες τα τελευταία χρόνια σχετικά με το πώς τέτοιες θεωρητικές προσεγγίσεις παιγνίων μπορούν να συνδυαστούν με το C-RAN. Ένα πρόβλημα διαχείρισης της συνεταιριστικής παρεμβολής αντιμετωπίζεται στο [109], όπου οι RRH σχηματίζουν συμμαχίες για να μεγιστοποιήσουν τον ρυθμό μετάδοσης των χρηστών. Επιπλέον, σε δίκτυα ad hoc ή σε επικοινωνίες D2D, τα παίγνια με βάση το συνασπισμό χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση πλαισίων για την επίλυση προβλημάτων προώθησης πακέτων μεταξύ κόμβων και για τη βελτίωση του συνολικού κέρδους απόδοσης του συστήματος.

Το προτεινόμενο JT COMP με βάση το παίγνιο συνασπισμού[110] περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια: τον σχηματισμό του καταλόγου των παρεμβαλλόμενων RRH, το σχηματισμό συνασπισμών των παρεμβαλλόμενων RRH και το παίγνιο συνασπισμού. Πιο συγκεκριμένα:

- Αρχικά, το δίκτυο μικρών κυψελών περιλαμβάνει όλες τις μη συνεργαζόμενες RRHs (K), οι οποίες αναφέρονται ως μοναδικές συμμαχίες.
- Η αναζήτηση πιθανών μοντέλων συμμαχίας μεταξύ των RRH αρχίζει μόλις προγραμματιστούν όλοι οι χρήστες(U) και λαμβάνουν παρεμβολές από τα γειτονικά RRHs. Κάθε χρήστης στην άκρη κάθε κυψέλης RRH υπολογίζει τις τιμές παρεμβολής μεταξύ των υπηρεσιών RRH. Οι συμβολισμοί RRH έχουν ένα μοναδικό αναγνωριστικό από κάθε χρήστη και αυτό το αναγνωριστικό διαβιβάζεται στο C-RAN.

- Στο τρίτο στάδιο, εξετάζονται όλες οι πιθανές συμμαχίες για μια χρονική διάρκεια 10 χρονικών διαστημάτων μετάδοσης (Transmission-time-Intervals, TTIs) και τα μέλη τους συντονίζονται βάσει της τεχνικής JT COMP. Ένας συνασπισμός μεταξύ δύο ή περισσότερων παρεμβαλλόμενων RRH σχηματίζεται εάν ικανοποιηθεί ένα σύνολο περιορισμών. Πρώτον, ο δοκιμασμένος συνασπισμός αυξάνει την απόδοση του χρήστη που βρίσκεται στην άκρη της κυψέλης(δηλαδή την πληρωμή του παιγνίου). Δεύτερον, η απόδοση των χρηστών στο κέντρο της κυψέλης δεν μειώνεται κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου. Τρίτον, ο συνασπισμός που διαμορφώνεται παραμένει αναλλοίωτος μέχρι την ολοκλήρωση του παιγνίου. Αν ένας συνασπισμός έχει ήδη δοκιμαστεί εξετάζεται ο επόμενος με βάση τον κατάλογο προτεραιοτήτων. Επίσης, εάν ένα RRH είναι ήδη μέλος ενός συνασπισμού και η σειρά του βασίζεται στον κατάλογο προτεραιοτήτων, δοκιμάζεται ο συνολικός συνασπισμός μεταξύ του νέου υποψηφίου και όλων των υπαρχόντων μελών του συνασπισμού. Ένας σχηματιζόμενος συνασπισμός θα χωριστεί μόνο όταν αυτός ο διαχωρισμός έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης τουλάχιστον ενός χρήστη στο άκρο της κυψέλης. Στην συνέχεια, εξετάζονται οι επόμενες σειρές των πινάκων παρεμβολής καθώς και ο νέος κατάλογος προτεραιοτήτων. Αυτό το στάδιο θα επαναληφθεί έως ότου όλες οι θεωρούμενες τιμές των πινάκων παρεμβολής υπερβούν το προκαθορισμένο κατώφλι(δηλαδή 10 dB στην περίπτωση αυτή), οπότε το παίγνιο τελειώνει. Το σχήμα 11 απεικονίζει τον αλγόριθμο του περιγραφόμενου παιγνίου σχηματισμού συνασπισμού που ενισχύει τη λειτουργικότητα JT-COMP παρέχοντας χαρακτηριστικά αυτο-οργάνωσης στα συμμετέχοντα RRH.

προκύψουν συγκρίσιμα αποτελέσματα, η προσομοίωση βασίστηκε στον προσομοιωτή συστήματος της Βιέννης[111]. Απαιτήθηκαν αρκετές τροποποιήσεις προκειμένου να διευκολυνθεί το COMP με βάση το παίγνιο συνασπισμού στο C-RAN. Επτά RRH σχηματίζουν ίσο αριθμό μικρών κυψελών που εξυπηρετούν τέσσερις σταθερούς χρήστες έκαστη. Έντεκα από τους 28 χρήστες τοποθετήθηκαν τυχαία στην άκρη των αντίστοιχων κυψελών. Τα RRHs τοποθετήθηκαν σε μια τοπολογία μιας περιοχής 500x500m όπως στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12. Τοπολογία προσομοίωσης.[πηγή:110]

Τα μπλοκ δεδομένων για κάθε χρήστη στο δίκτυο μεταφέρθηκαν από το BBU cloud στις αντίστοιχες RRH μέσω συνδέσμων fronthaul. Η ισχύς μετάδοσης όλων των RRH καθορίστηκε στα 20W, και η κάλυψή τους ήταν πανκατευθυντική. Θεωρήθηκε ότι κάθε RRH και κάθε συσκευή χρήστη, είναι εφοδιασμένα με δύο κεραίες το καθένα. Για τη ρύθμιση προσομοίωσης επιλέχθηκε το τυπικό μοντέλο καναλιών(Typical-Urban, TU) με συχνότητα φορέα 2.14GHz και εύρος ζώνης 20MHz που είναι διαθέσιμο σε κάθε RRH. Αυτές οι παράμετροι προσομοίωσης συνοψίζονται στον Πίνακα 9.

Parameter description	Value
Carrier frequency	2.14 GHz
Number of eNodeBs	7
Number of UEs per eNodeB	4

Transmit power	20 W
Transmitter height	32 m
Receiver height	1.5 m
Antenna gain pattern	Omnidirectional
Max Tx antenna gain	17 dBi
Number of Tx antennas	2
Number of Rx antennas	2
LTE transmission mode	CLSM
Channel model	Typical urban
Shadow fading type	Claussen
Receiver type	Zero-forcing
Feedback delay	1 TTI
Bandwidth	20 MHz
Receiver noise figure	9 dB
Thermal noise density	-174 dBm/Hz

Πίνακας 9. Παράμετροι προσομοίωσης.

Το αποτέλεσμα κάθε φάσης του προτεινόμενου παιχνιδιού συνασπισμού υπολογίστηκε σε διάρκεια 10 TTIs, όπου κάθε TTI έχει τη διάρκεια ενός υποπλαίσιου LTE. Για την υλοποίηση του JT COMP απαιτήθηκε ένας νέος χρονοπρογραμματιστής. Όταν το JT COMP δεν είναι ενεργοποιημένο, κάθε κεφαλή μικρών κυψελών (στην περίπτωση αυτή RRH) κατανέμει ορθογώνια μπλοκ πόρων(Resource-Blocks, RBs) στις προσαρτημένες συσκευές των χρηστών. Μόλις ενεργοποιηθεί ο JT COMP, όλοι οι χρήστες στην άκρη των κυψελών (δηλαδή, UEs με SINR μικρότερο από 4 dB) μπορούν να εξυπηρετηθούν από όλες τις RRH του συμπλέγματος. Ως εκ τούτου, μόλις προγραμματιστεί ένα UE στην άκρη, όλα τα μέλη του αντίστοιχου συμπλέγματος ορίζουν ένα RB σε αυτό το UE. Η ανάθεση του ίδιου RB στον ίδιο χρήστη από πολλαπλές RRHs έχει ως αποτέλεσμα βελτιωμένο SINR για τον συγκεκριμένο χρήστη, δεδομένου ότι δεν προκαλείται παρεμβολή από τα RRHs στο σύμπλεγμα. Επιπλέον, η απόδοση του χρήστη αυξάνεται καθώς τα ίδια δεδομένα λαμβάνονται από πολλαπλές πηγές και ο δείκτης ποιότητας καναλιού(Channel- Quality-Indicator, CQI) βελτιώνεται. Ως αποτέλεσμα, θα επιλεγεί ένα σχήμα κωδικοποίησης υψηλότερης

διαμόρφωσης και το μέγεθος του μπλοκ μεταφοράς θα αυξηθεί. Οι UE με SINR μεγαλύτερο ή ίσο με 4dB θεωρούνται κανονικοί χρήστες. Όταν έχει προγραμματιστεί ένας κανονικός χρήστης, όλες οι άλλες μονάδες RRH στο αντίστοιχο πρόγραμμα συμπλέγματος προσαρμόζονται επίσης σε κανονικούς χρήστες. Εάν ένα RRH δεν έχει κανονικούς χρήστες για να εξυπηρετήσει, δεν μεταδίδει σε αυτό το RB, και ως εκ τούτου δεν παρεμβαίνει στις άλλες προγραμματισμένες UEs. Ως αποτέλεσμα, μπορούν να επιτευχθούν λιγότερες παρεμβολές και καλύτερη απόδοση για τους κανονικούς χρήστες. Υποθέτοντας ότι το ποσοστό των χρηστών που βρίσκονται στην άκρη των κυψελών είναι μέτριο, ο αριθμός των RB που παρέχεται από τον προτεινόμενο χρονοπρογραμματιστή για τους κανονικούς χρήστες είναι επαρκής. Το JT COMP υπογραμμίζει το δίκτυο backhaul αφού απαιτεί από τα σημεία μετάδοσης να μεταδίδουν τα ίδια δεδομένα σε πολλαπλούς δέκτες. Επιπλέον, το προτεινόμενο θεωρητικό σχήμα παιγνίου χρησιμοποιεί το backhaul ακόμη περισσότερο αφού μία κυψέλη που εξυπηρετεί λαμβάνει όχι μόνο τοπικά δεδομένα αλλά και επιπλέον δεδομένα που ανήκουν σε όλες τις άλλες κυψέλες του συμπλέγματος. Προκειμένου να μοντελοποιηθεί η κυκλοφορία backhaul, χρησιμοποιείται ο τύπος από το [112], ο οποίος περιγράφει αυτή την κίνηση ως συνάρτηση του εύρους ζώνης, της φασματικής απόδοσης της συνδεδεμένης κυψέλης downlink του αθροίσματος των τιμών φασματικής απόδοσης από τα άλλα σημεία μετάδοσης του συμπλέγματος και την αναλογία μεταξύ των τοποθεσιών. Στο περιγραφόμενο σύστημα παιγνίου συνασπισμού, αυτή η κίνηση αντιπροσωπεύει τη συνάρτηση κόστους.

4.8.3 Αποτελέσματα και αναλύσεις

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης υποδεικνύουν ότι το προτεινόμενο παίγνιο με βάση το COMP επιτυγχάνει να σχηματίσει συνεργαζόμενους συνασπισμούς μικροκυψελών που βελτιώνουν σημαντικά την ποιότητα της υπηρεσίας του χρήστη στις άκρες των κυψελών από την άποψη του SINR και της απόδοσης. Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του JT COMP στο ρυθμό μετάδοσης του χρήστη χρησιμοποιείται ένα σενάριο αναφοράς για σύγκριση, στο οποίο δεν υπάρχει υποστήριξη COMP (δηλαδή σχηματίζεται ένας συνασπισμός singleton). Η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (Cumulative-Distribution-Function, CDF)

της προκύπτουσας απόδοσης των χρηστών στην άκρη της κυψέλης πριν και μετά τον συνασπισμό παρουσιάζεται στο Σχήμα 13.

Σχήμα 13. CDF of throughput with and without game-based CoMP

Προφανώς, η μέση απόδοση των χρηστών στην άκρη των κυψελών είναι περισσότερη από το διπλάσιο της no-COMP περίπτωσης λόγω πολλαπλών RRH που εξυπηρετούν τους χρήστες στην άκρη των κυψελών. Επιπλέον, το SINR των χρηστών στην άκρη των κυψελών απεικονίζεται στο Σχήμα 14. Το μέσο SINR των χρηστών στην άκρη των κυψελών είναι σημαντικά υψηλότερο από ό,τι όταν έχει τοποθετηθεί no-CoMP. Η διαμόρφωση των συμμαχιών μεταξύ των κεφαλίδων μικροκυψελών, ελαχιστοποιεί τον αριθμό των παρεμβαλλόμενων RRHs ανά χρήστη στην άκρη της κυψέλης, αυξάνοντας έτσι το SINR.

Σχήμα 14. CDF of SINR with and without proposed game-based CoMP.

Το προτεινόμενο παίγνιο συνασπισμού δίνει έμφαση στην αυτοοργάνωση του COMP και αναγνωρίζει τους χρήστες στην άκρη των κυψελών ως κριτήρια ενεργοποίησης του παιγνίου, το οποίο τελικά βελτιστοποιεί το συντονισμό του δικτύου για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις(SINR και απόδοση) αυτών των χρηστών. Το προτεινόμενο σχήμα ενεργοποιείται μόλις οι νέοι χρήστες εισέλθουν στο δίκτυο ή οι υπάρχοντες χρήστες μετακινηθούν προς την άκρη των αντίστοιχων κυψελών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα

5.1 Συμπεράσματα

Παρόλο που η πρώτη οπτική γωνία της Θεωρίας Παιγνίων εστίαζε στο γεγονός ότι ένας παίκτης κερδίζει έναντι όλων των υπολοίπων, στην πορεία, η θεώρηση αυτή αντικαταστάθηκε με την αντιμετώπιση ενός ευρέως φάσματος αλληλεπιδράσεων με διαφορετικά κριτήρια ταξινόμησής τους. Οι αλληλεπιδράσεις, δεν γίνονται μόνο, ανάμεσα σε ανθρώπους, αλλά και σε συσκευές.

Το βασικό ζητούμενο των εφαρμογών της Θεωρίας Παιγνίων είναι η εύρεση σημείων ισορροπίας κάτω από ορισμένες συνθήκες, στα οποία, οι παίκτες έχουν τη δική τους στρατηγική την οποία δεν την αλλάζουν. Στη Θεωρία Παιγνίων η πιο γνωστή ισορροπία, είναι η ισορροπία Nash. Ωστόσο, οι διαδικασίες εντοπισμού σημείων ισορροπίας είναι διαφορετικές και εξαρτώνται από το είδος των εφαρμογών, αν και αρκετά συχνά, μοιάζουν μεταξύ τους.

Η Θεωρία Παιγνίων διαθέτει ένα μαθηματικό υπόβαθρο με το οποίο αναλύει τις αλληλεπιδράσεις και τη λήψη απόφασης, με άλλα λόγια, δίνει τη δυνατότητα της πρόβλεψης αποτελέσματος από την αλληλεπίδραση χρηστών με συγκρουόμενα συμφέροντα, καθορίζοντας ποιες αποφάσεις χρειάζεται να ληφθούν, για να είναι ένα ασύρματο δίκτυο καλά σχεδιασμένο και οργανωτικά λειτουργικό [69] .

Όσο αφορά την προώθηση και την αναμετάδοση μηνυμάτων στα δίκτυα, τα παίγνια των δικτύων δεν διαφέρουν από τα κλασσικά παίγνια της Θεωρίας Παιγνίων. Ακόμη, διαφαίνεται ότι η συνεργασία των σταθμών ενός δικτύου είναι φυσιολογικό επακόλουθο χωρίς εξωτερική παρέμβαση. Η άλλη οπτική γωνία της Θεωρίας Παιγνίων είναι ότι οι συμπεριφορές των παικτών δεν

προβλέπονται αλλά υπαγορεύονται. Είτε οι συμπεριφορές προβλέπονται, είτε υπαγορεύονται, η Θεωρία Παιγνίων, εισάγει απλοποίηση και κάνει χρήση τρόπων επίλυσης των θεμάτων, οι οποίοι τρόποι ενδεχομένως να μην ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Τα ζητήματα που καλείται η Θεωρία Παιγνίων να προσπαθήσει να επιλύσει στο άμεσο και έμμεσο μέλλον είναι αυτά των δορυφορικών ζεύξεων, τα θέματα της αποθήκευσης και της διαχείρισης των αρχείων στο διαδίκτυο, της μείωσης της ενέργειας σύμφωνα με τον προκαθορισμένο συντελεστή, της αποφυγής της κρίσης του φάσματος και τον περιορισμό της λανθάνουσας κατάστασης στην τάξη του ενός ms.

Η σχεδίαση ενός δορυφορικού δικτύου στοχεύει, στην καλύτερη χρήση της χωρητικότητας, στην όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αύξηση του αριθμού των χρηστών, καθώς και στην ελαχιστοποίηση του κόστους. Το δίκτυο λαμβάνει αιτήσεις για εξυπηρέτηση από τους χρήστες και εφόσον προηγηθεί η εγκατάσταση της σύνδεσης μεταξύ των τερματικών και του κεντρικού σταθμού δημιουργούνται εκρήξεις κίνησης εξαιτίας της μεταφοράς των δεδομένων. Με την υιοθέτηση κατάλληλων τεχνολογιών το πρόβλημα μετατρέπεται σε πρόβλημα αριθμού ανάθεσης χρονοσχισμών ο οποίος αριθμός χρονοσχισμών χρειάζεται να ικανοποιεί το ποσοστό λαθών. Η παραπάνω περιγραφή αποτελεί μία από τις περιπτώσεις που η Θεωρία Παιγνίων μπορεί να δώσει λύση [82].

Τα θέματα της αποθήκευσης και της διαχείρισης των αρχείων στο διαδίκτυο είναι επίσης, ένα ζήτημα που μελλοντικά η Θεωρία Παιγνίων μπορεί να δώσει λύσεις. Η αποδοτική διαχείριση των εγγράφων είναι ιδιαίτερα κρίσιμη κυρίως για τις εταιρείες και για αυτό το λόγο κάθε εταιρεία πρέπει να εκμεταλλεύεται κάθε μορφή οργάνωσης. Μερικές από τις λειτουργίες της διαχείρισης των εγγράφων είναι η αποθήκευση, η ανάκτηση και η ασφάλεια. Η ανάκτηση για παράδειγμα είναι μια λειτουργία ιδιαίτερα δύσκολη και σύνθετη και η Θεωρία Παιγνίων μπορεί να συνδράμει στην εξεύρεση της καλύτερης λύσης για την ανάκτηση εγγραφών και για το τρόπο αποθήκευσης αυτών [83].

Το ζήτημα του φάσματος είναι ένα ακόμη πεδίο που η Θεωρία Παιγνίων μπορεί να δώσει λύσεις, τα πεδία στα οποία μπορεί να συνδράμει είναι οι τεχνικές διαμόρφωσης και η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης [84].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] D. Wang, M. Hu and H. Zhi, "A Survey of Secure Routing in Ad Hoc Networks," *2008 The Ninth International Conference on Web-Age Information Management*, Zhangjiajie Hunan, 2008, pp. 482-486.
- [2] Γ. Τσαπράνης, Α. Αρβανίτης and Μ. Θεολόγου, "Ασύρματα Δίκτυ Wimax Και Εφαρμογες Σε Στρατιωτικά Τακτικά Δίκτυα," Αθήνα, 2009.
- [3] Uckelmann, D., Harrison, M., & Michahelles, F. An Architectural Approach Towards the Future Internet of Things. In D. Uckelmann, M. Harrison, & F. Michahelles (Eds.), *Architecting the Internet of Things*. Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp.1-24.
- [4] S. Yi, C. Li, and Q. Li, "A Survey of Fog Computing: Concepts, Applications and Issues," in *Proceedings of the 2015 Workshop on Mobile Big Data - Mobidata '15*, 2015, pp. 37-42.
- [5] Seetharaman, A., Niranjana, N., Tandon, V., Devarajan, S., Moorthy, M. and Saravanan, A. (2017). What Do Customers Crave in Mobile 5G?: A survey spotlights four standout factors. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 6(3), pp.52-66.
- [6] Altman, E., Boulogne, T., El-Azouzi, R., Jiménez, T. and Wynter, L. (2006). A survey on networking games in telecommunications. *Computers & Operations Research*, 33(2), pp.286-311.
- [7] A. Goswami, N. Chaudhary and P. Malhiyan, "Review of game theoretical applications in communication systems," *Proceedings of 3rd International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization*, Noida, 2014, pp. 1-6.
- [8] Asu Ozdaglar; Ishaï Menache, "Network Games: Theory, Models, and Dynamics," in *Network Games: Theory, Models, and Dynamics*, , Morgan & Claypool, 2011, pp.1-26.
- [9] K. Akkarajitsakul, E. Hossain, D. Niyato and D. I. Kim, "Game Theoretic Approaches for Multiple Access in Wireless Networks: A Survey," in *IEEE*

Communications Surveys & Tutorials, vol. 13, no. 3, pp. 372-395, Third Quarter 2011.

[10] J. Lee, "Self-Interference Cancellation Using Phase Rotation in Full-Duplex Wireless," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 9, pp. 4421-4429, Nov. 2013.

[11] Heller-Wlensky, Abraham Ibn Ezra, *Encyclopaedia Judaica* 8 (197 I) 1163-1170.

[12] Imai, H., 1983. Individual monotonicity and lexicographic maximin solution. *Econometrica* 51, 389-401. [13] D. Niyato et al. "A Cooperative Game Framework for Bandwidth Allocation in 4G Heterogeneous Wireless Networks" *IEEE Int. Comm. Conf. (ICC)*, vol. 9, pp. 4357-4363, Jun 2006. Istanbul, Turkey.

[13] Zhu Han, Zhu Ji, and K. J. Ray Liu, "Non-Cooperative Resource Competition Game by Virtual Referee in Multi-Cell OFDMA Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Volume 25, Issue 6, August 2007 Page(s):1079 – 1090.

[14] S. Vassaki, A.D. Panagopoulos, and P. Constantinou, "Bandwidth allocation in wireless access networks: Bankruptcy game vs cooperative game," in *International Conference on Ultra Modern Telecommunications*.

[15] M. A. Khan et al., "Game-Theory Based User Centric Network Selection with Media Independent Handover Services and Flow Management," in *Eighth Annual Research Conference on Communication Networks and Services (CNSR)*, , 2010.

[16] D. Niyato and E. Hossain, "A Noncooperative Game-Theoretic Framework for Radio Resource Management in 4G Heterogeneous Wireless Access Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, no. 3, 2008.

[17] Martin J. Osborne, Ariel Rubinstein. *A Course in Game Theory*. Massachusetts Institute of Technology, Fifth printing 1998.

[18] Mung Chiang, Prashanth Hande, Tian Lan, Chee Wei Tan. *Power Control in Wireless Cellular Networks*. Now, 2008.

- [19] Μ. Ε. Θεολόγου. Δίκτυα κινητών & προσωπικών επικοινωνιών. Εκδόσεις Τζιόλα, 2007.
- [20] Francesco Renna, Joseph Doyle, Vasileios Giotsas, and Yiannis Andreopoulos. (2016). Query processing for the internet of things: Coupling of device energy consumption and cloud infrastructure billing. In *Proceedings of the 2016 IEEE First International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI'16)*. IEEE, 83–94. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/IoTDI.2015.37>
- [21] J. Zhang and Q. Zhang, “Stackelberg Game for Utility-based Cooperative Cognitive Radio Networks,” in *Proceedings of the Tenth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, 2009, pp. 23–32.
- [22] T. Luo, S. S. Kanhere, J. Huang, S. K. Das, and F. Wu, “Sustainable Incentives for Mobile Crowdsensing: Auctions, Lotteries, and Trust and Reputation Systems,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 3, pp. 68–74, Mar. 2017.
- [23] D. T. Hoang, X. Lu, D. Niyato, P. Wang, D. I. Kim, and Z. Han, “Applications of Repeated Games in Wireless Networks: A Survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2102–2135, Jan. 2015.
- [24] Bangerter, B., Talwar, S., Arefi, R. and Stewart, K. (2014). Networks and devices for the 5G era. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), pp.90-96.
- [25] H.-Y. Shi, W.-L. Wang, N.-M. Kwok, and S.-Y. Chen, “Game Theory for Wireless Sensor Networks: A Survey,” *Sensors*, vol. 12, no. 7, p. 9055, 2012.
- [26] Bor-Yaliniz, I. and Yanikomeroglu, H. (2016). The New Frontier in RAN Heterogeneity: Multi-Tier Drone-Cells. *IEEE Communications Magazine*, 54(11), pp.48-55.
- [27] Holma, H., & Toskala, A. (2007) “WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE” 4th edition, John Wiley & Sons.
- [28] Βαρβαρίγος, Ε., & Μπερμπερίδης, Κ. (2004). Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών.

- [29] V. Cardellini, V. De Nitto Personé, V. Di Valerio, F. Facchinei, V. Grassi, F. Lo Presti, and V. Piccialli, "A game-theoretic approach to computation offloading in mobile cloud computing," *Math. Program.*, vol. 157, no. 2, pp. 421–449, Jun. 2016.
- [30] Z. Han, D. Niyato, W. Saad, T. Baar, and A. Hjrungnes, *Game Theory in Wireless and Communication Networks: Theory, Models, and Applications*. Cambridge University Press, 2012.
- [31] Lescuyer, P., & Lucidarme, T. (2008). Evolved Packet System (EPS): The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS. John Wiley & Sons.
- [32] A. B. Mackenzie and S. B. Wicker, "Stability of multipacket slotted aloha with selfish users and perfect information," in Proc. of IEEE INFOCOM, vol. 3, Apr 2003, pp. 1583–90.
- [33] Y. Jin and G. Kesidis, "Equilibria of a non-cooperative game for heterogeneous users of an aloha network," *IEEE Commun. Letters*, vol. 6, no. 7, pp. 282–84, Jul 2002.
- [34] M. Cagalj, S. Ganeriwal, I. Aad, and J.-P. Hubaux, "On selfish behavior in csma/ca networks," in Proc. of IEEE INFOCOM, Mar 2005.
- [35] A. Orda, R. Rom, and N. Shimkin, "Competitive routing in multiuser communication networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 1, no. 5, pp. 510–521, Oct 1993.
- [36] J. Rodriguez, "Fundamentals of 5G Mobile Networks", 2015
- [37] Y. A. Korilis and A. A. Lazar, "On the existence of equilibria in noncooperative optimal flow control," *Journal of the Association for Computing Machinery*, vol. 42, no. 3, pp. 584–613, May 1995.
- [38] R. J. La and V. Anantharam, "Optimal routing control: game theoretic approach," in Proc. of the 36th IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, California, Dec 1997, pp. 2910–2915.
- [39] I. Zaikiuddin, T. Hawkins, and N. Moffat, "Towards a gametheoretic understanding of ad-hoc routing," in Proc. Wksp. Games in Design and

Verification, vol. 119, no. 1. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Jul 2004, pp. 67–92.

[40] M. Felegyhazi, J. P. Hubaux, and L. Buttyan, “Nash equilibria of packet forwarding strategies in wireless ad hoc networks,” *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 5, no. 5, pp. 463–475, May 2006.

[41] V. Srinivasan, P. Nuggehalli, C. F. Chiasserini, and R. R. Rao, “Cooperation in wireless ad hoc networks,” in *Proc. of IEEE INFOCOM*, vol. 2, Apr 2003, pp. 808–817.

[42] E. Altman, T. Boulogne, R. El-Azouzi, T. Jimenez, L. Wynter, A survey on networking games in telecommunications .

[43] Nabhendra Bisnik (ECSE Department RPI, Troy, NY), “Applying Game Theory to Study Communication Networks”.

[44] Tansu Alpcan (Deutsche Telekom Laboratories), “Application of Game Theory to Wireless Networking”.

[45] Allen B. MacKenzie and Luiz A. DaSilva, “Game Theory for Wireless Engineers”.

[46] Stefan Mangold (Chair of Communication Networks Aachen University of Technology, Germany), “Game Theoretical Approaches for Spectrum Sharing in Wireless Communication”.

[47] Mark Felegyhazi, Jean-Pierre Hubaux (EPFL – Switzerland), “Game Theory in Wireless Networks: A Tutorial”.

[48] Rekha Menon, Dr. Allen B. MacKenzie, Dr. R. Michael Buehrer “Game Theory and Interference Avoidance in Decentralized Networks”.

[49] William Hartman, “Soft Handoff and Power Control in IS-95 CDMA”

[50] Drew Fudenberg, Jean Tirole (The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England), “Game Theory”.

[51] David Goodman (Polytecnic University) and Narayan Mandayam (Rutgers University), Power Control for Wireless Data 103.

- [52] Cem U. Saraydar, Narayan B. Mandayam, Senior Member, IEEE, and David J. Goodman, Fellow, IEEE, "Efficient Power Control via Pricing in Wireless Data Networks".
- [53] C. H. Papadimitriou, "Game theory and mathematical economics: a theoretical computer scientist's introduction," *Proceedings 42nd IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, Newport Beach, CA, USA, 2001, pp. 4-8.
- [54] Virginia Polytechnic Institute and State University, "Game Theoretic Analysis of Radio Resource Management for Ad-hoc Networks".
- [55] Antoniou J., et al., "Cooperative user-network interactions in next generation communication networks," *Elsevier Computer Networks*, vol. 54, no. 3, pp. 2239-2255, 2010.
- [56] M.A. Khan et al., "Cooperative game theoretic approach to integrated bandwidth sharing and allocation," in *International Conference on Game Theory for Networks*, (GameNets), pp. 1-9, 2009.
- [57] Mung Chiang, Prashanth Hande, Tian Lan, Chee Wei Tan. *Power Control in Wireless Cellular Networks*. Nov, 2008.
- [58] Trestian R., Ormond O. and Muntean G-M., "Game Theory-based Network Selection: Solutions and Challenges", *IEEE Communication Survey and Tutorials*, accepted 2012.
- [59] Fahimullah K. and Hassan S., "Game-Theory based Wireless Access Point Selection scheme," in *IEEEEP Silver Jubilee International Multi-topic Symposium (SIMTS)*, 2010.
- [60] Fu F. and van der Schaar M, "Noncollaborative Resource Management for Wireless Multimedia Applications Using Mechanism Design," *IEEE Transactions on Multimedia*, 9, no. 4, pp. 851-868, 2007.
- [61] Frattasi S. and Fathi H and. Fitzek F.H.P , "4G: A User-Centric System ", 2006. *Kluwer - Wireless Personal Communications Journal (WPC) - Special Issue on Advances in Wireless Communications: Enabling Technologies for 4G*.

- [62] Antoniou J., et al., "Access network synthesis game in next generation networks," *Comput. Netw.* 53, no. 15, pp.2716-2726, 2009.
- [63] Gunnarsson F. "Power Control in Wireless Networks, Characteristics and Fundamentals". Dept. of Electrical Engineering, Linköping universitet (Sweden).
- [64] Koskie S., Gajic Z., "SIR – Based Power Control Algorithms for Wireless CDMA Networks: An Overview". Wireless Information Network Laboratory, Rutgers University.
- [65] Vassaki S., Panagopoulos A.D., and Constantinou P., "Bandwidth allocation in wireless access networks: Bankruptcy game vs cooperative game," in *International Conference on Ultra Modern Telecommunications*.
- [66] Chatterjee M., Lin H., and Das S. K., "Non-Cooperative Games for Service Differentiation in CDMA Systems," *Mobile Networks and Applications* 10, no. 6, 2005.
- [67] Khan M. A., et al., "Game-Theory Based User Centric Network Selection with Media Independent Handover Services and Flow Management," in *Eighth Annual Research Conference on Communication Networks and Services (CNSR)*, , 2010.
- [68] Pervaiz H. and Bigham J., "Game Theoretical Formulation of Network Selection in Competing Wireless Networks: An Analytic Hierarchy Process Model," in *Third International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, NGMAST*, 2009.
- [69] Niyato D. and Hossain E., "A Noncooperative Game-Theoretic Framework for Radio Resource Management in 4G Heterogeneous Wireless Access Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, no. 3, 2008.
- [70] Famolari D., Mandayam N., Goodman D., Shah V., "A New Framework For Power Control In Wireless Data Networks: Games, Utility", And Pricing 1999.
- [71] Famolari D., Mandayam N., Goodman D. and Shah V., "Wireless Multimedia Network Technologies The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science", 2002.
- [72] Alpcan T., Basar T., Srikant R., Altman E., "CDMA Uplink Power Control as a Noncooperative Game".

- [73] Osborne M. J., Rubinstein A., "A Course in Game Theory", (The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England)
- [74] Bhattacharya, S., "Imperfect information, dividend policy, and the "bird in the hand" fallacy, The Bell Journal of Economics 10, 259-270, 1979.
- [75] Cho, I-K., Kreps, D., "Signaling games and stable equilibria", Quarterly Journal of Economics 102, 179-221, 1987.
- [76] Fudenberg, D., Tirole J. Perfect bayesian equilibrium and sequential equilibrium, Journal of Economic Theory 53, 236-260, 1991,
- [77] Fudenberg, D., Tirole, J., "Game Theory". MIT Press, 1993.
- [78] Grossman, S., "The role of warranties and private disclosure about product quality", Journal of Law and Economics 24, 461-483, 1981.
- [79] Walrand J., " Δίκτυα Επικοινωνιών", Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1997.
- [80] Turban, McLean, Wetherbe. "Information Technology:Transforming business into digital".
- [81] Bellhouse, D., "The problem of Waldegrave", Electronic Journal for History of Probability and Statistics 3, 1-12, 2007.
- [82] Myerson, R.B., "Game Theory: Analysis of Conflict", Harvard University Press, 1997.
- [83] Osborne J.M, Rubinstein, A," A Course in Game Theory", 1994.
- [84] Gibbons, R. "Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων" , Εκδόσεις Gutenberg, 2009.
- [85] T. Han et al., "On Accelerating Content Delivery in Mobile Networks," IEEE Commun. Surveys & Tutorials, vol. 15, no. 3, Third Quarter 2013, pp. 1314–33.
- [86] M. S. Corson et al., "Toward Proximity-Aware Internetworking," IEEE Wireless Commun., vol. 17, no. 6, Dec. 2010, pp. 26–33.
- [87] L. Lei et al., "Operator Controlled Device-to-Device Communications in LTE-Advanced Networks," IEEE Wireless Commun., vol. 19, no. 3, June 2012, pp. 96–104.
- [88] IEEE 802.11g WG, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications — Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band, June 2003.
- [89] D. Camps-Mur, A. Garcia-Saavedra, and P. Serrano, "Device-to-Device Communications with Wi-Fi Direct: Overview and Experimentation," IEEE

Wireless Commun., vol. 20, no. 3, June 2013.

- [90] J. F. Nash, "Non-Cooperative Games," *Ann. Math.*, vol. 54, 1951, pp. 286–95.
- [91] J.-H. Yun and S.-W. Seo, "Collision Detection based on RE Energy Duration in IEEE 802.11 Wireless LAN," 1st Int'l. Conf. Commun. System Software and Middleware (Comsware), New Delhi, India, Jan. 2006, pp. 1–6.
- [92] A. Antonopoulos, E. Kartsakli and . C. Verikoukis, "Game Theoretic D2D Content Dissemination in 4G Cellular Networks," *IEEE Communications Magazine* , pp. 125-131, 2014.
- [93] R. T. Trestian, O. Ormond and G.-M. Muntean, "Game Theory-Based Network Selection;," *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, p. 1125, 2012.
- [94] L. Song and J. Shen, *Evolved Network Planning and Optimization for UMTS and LTE*, Auerbach Publications, CRC Press, 2010.
- [95] J. Liu et al, "Device-to-Device Communications Achieve Efficient Load Balancing in LTE-Advanced Networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 21, no. 2, Apr. 2014, pp. 57–65.
- [96] Y. Saito et al, "Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access," *Proc. IEEE 77th VTC Spring*, Dresden, Germany, June 2013, pp. 1–5.
- [97] Z. Ding et al, "On the Performance of Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems with Randomly Deployed Users," *IEEE Signal Processing Lett.*, vol. 21, no .12, Dec. 2014, pp. 1501–05.
- [98] J. Van De Beek and B. M. Popovic, "Multiple Access with Low-Density Signatures," *Proc. IEEE GLOBECOM*, Honolulu, HI, Nov. 2009, pp. 1–69.
- [99] B. Di, L. Song, and Y. Li, "Sub-Channel Assignment, Power Allocation and User Scheduling for Non-Orthogonal Multiple Access Networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 11, Nov. 2016, pp. 7686–98.
- [100] L. Song, Y. Li, . Z. Ding and . H. V. P. Poor, "Resource Management in Non-Orthogonal Multiple Access Networks for 5G and Beyond," *IEEE Network*, pp. 8-14, 2017.
- [101] B. Di, L. Song, and Y. Li, "Radio Resource Allocation for Uplink Sparse Code Multiple Access (SCMA) Networks Using Matching Game," *Proc. IEEE ICC*, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016.
- [102] S. Zhang et al, "Radio Resource Allocation for Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) Relay Network Using Matching Game," *Proc. IEEE ICC*, Kuala

Lumpur, Malaysia, May 2016.

[103] Z. Ding, F. Adachi, and H. V. Poor, "The Application of MIMO to Non-Orthogonal Multiple Access," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 1, Jan. 2016, pp. 537–52.

[104] J. Liu et al., "Device-to-Device Communications for Enhancing Quality of Experience in Software Defined Multi-Tier LTE-A Networks," *IEEE Network*, vol. 29, no. 4, July, 2015, pp. 46–52.

[105] L. Song et al., *Wireless Device-to-device Communications and Networks*, Cambridge Univ. Press, 2015.

[106] D. Lee et al., "Coordinated Multipoint Transmission and Reception in LTE-Advanced: Deployment Scenarios and Operational Challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 2, Feb. 2012, pp. 148–55.

[107] Z. Han et al., *Game Theory in Wireless and Communication Networks*, Cambridge Univ. Press, 2012.

[108] Z. Han and H. V. Poor, "Coalition Games with Cooperative Transmission: A Cure for the Curse of Boundary Nodes in Selfish Packet-Forwarding Wireless Networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 1, Jan. 2009, pp. 203–13.

[109] C. Sun et al., "A Coalition Game Scheme for Cooperative Interference Management in Cloud Radio Access Networks," *Trans. Emerging Telecommun. Tech.*, vol. 25, no. 9, May 2014, pp. 954–64.

[110] P. Georgakopoulos, T. Akhtar, I. Politis, C. Tselios, E. Markakis and S. Kotsopoulos, "Coordination Multipoint Enabled Small Cells for Coalition-Game-Based Radio Resource," *IEEE Network*, pp. 63-67, 2019.

[111] M. Rupp, S. Schwarz, and M. Taranetz, "The Vienna LTE-Advanced Simulators: Up and Downlink, Link and System Level Simulation," *Signals and Commun. Technology*, 1st ed., Springer, Singapore, 2016. ISBN: 978-981-10-0616-6.

[112] G. Grebla et al., "Joint Transmission in Cellular Networks with CoMPstability and Scheduling Algorithms," *Performance Evaluation*, 91, 2015, pp. 38–55.

