



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ**  
UNIVERSITY OF PATRAS

**Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και  
Πληροφορικής**

**Διπλωματική Εργασία**

---

**Εφαρμογή τεχνικών Θεωρίας Παιγνίων  
στην τεχνολογία DUDe για τη βελτίωση  
της ανάθεσης πόρων σε δίκτυα 5G**

---

**Καπνιάς Αθανάσιος 1071112**

**Τριμελής Επιτροπή:**

**Μπούρας Χρήστος, Επιβλέπων Καθηγητής  
Γαροφαλάκης Ιωάννης, Καθηγητής  
Βλάχος Κυριάκος, Καθηγητής**

**Πάτρα, 2024**

**Copyright ©–All rights reserved Καπνιάς Αθανάσιος , 2024**

*Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, είτε ολόκληρης είτε μέρους αυτής, για εμπορικούς σκοπούς χωρίς την έγγραφη άδεια του δημιουργού. Η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικούς σκοπούς, όπως για εκπαιδευτικούς ή ερευνητικούς σκοπούς, επιτρέπεται υπό την προϋπόθεση ότι θα αναφέρεται η πηγή προέλευσης και θα διατηρείται η παρούσα δήλωση.*

*Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία ανήκουν στον συγγραφέα και δεν εκφράζουν απαραίτητα τις θέσεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα ή της επιτροπής που την ενέκρινε.*

Από τη θέση αυτή, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες, πρωτίστως στον καθηγητή κ. Χρήστο Μπούρα, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα διπλωματικής εργασίας. Η καθοδήγηση, η υποστήριξη και οι πολύτιμες συμβουλές του υπήρξαν καθοριστικές για την ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας και η συνεργασία μας ήταν πάντα εποικοδομητική.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Απόστολο Γκάμα για την ουσιαστική καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε ιδιαίτερα σημαντική, καθώς με βοήθησε να αντιμετωπίσω προκλήσεις και να προσεγγίσω το θέμα με μεθοδικότητα και ακρίβεια.

Καπνιάς Αθανάσιος

# Περίληψη

Αυτή η διπλωματική εργασία εξετάζει την εφαρμογή τεχνικών Θεωρίας Παιγνίων στην τεχνολογία Downlink-Uplink Decoupling (DUDe), με στόχο τη βελτιστοποίηση της ανάθεσης πόρων σε δίκτυα 5G. Η τεχνολογία DUDe επιτρέπει την ανεξάρτητη διαχείριση των συνδέσεων uplink και downlink, που απαιτεί την ανάπτυξη νέων προσεγγίσεων για την κατανομή πόρων, όπως η διανομή bandwidth και η διαχείριση της ενεργειακής κατανάλωσης. Η μελέτη εστιάζεται σε δύο συγκεκριμένους αλγόριθμους βελτιστοποίησης: τον αλγόριθμο Gale-Shapley που προσομοιώνει ένα παιχνίδι αντιστοίχισης για την ανάθεση χρηστών σε σταθμούς βάσης, και τον αλγόριθμο Nash Bargaining που έχει σχεδιαστεί για την κατανομή του bandwidth με βάση τις εξατομικευμένες ανάγκες των χρηστών.

Η εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων σε αυτό το πλαίσιο παρέχει καινοτόμες λύσεις σε περίπλοκα προβλήματα δικτύωσης, επιτρέποντας δυναμική και αποτελεσματική διαχείριση των διαθέσιμων πόρων. Σκοπός της εργασίας είναι να εξετάσει πώς αυτές οι τεχνικές μπορούν να βελτιώσουν τη λειτουργικότητα και την απόδοση των δικτύων 5G, προκειμένου να βελτιωθεί η συνολική εμπειρία των χρηστών και να γίνει αποτελεσματικότερη η χρήση ενέργειας και επικοινωνιακών πόρων. Μέσα από την ανάλυση των παραπάνω αλγορίθμων, η εργασία αναδεικνύει τη σημασία της Θεωρίας Παιγνίων για τον σχεδιασμό ευφυών δικτύων επόμενης γενιάς και θέτει τη βάση για περαιτέρω έρευνα στην αυτόματη κατανομή πόρων σε δικτυακά περιβάλλοντα.

# Abstract

This thesis examines the application of Game Theory techniques to Downlink-Uplink Decoupling (DUDe) technology, aiming to optimize resource assignment in 5G networks. DUDe technology allows independent management of uplink and downlink connections, which requires the development of new approaches to resource allocation, such as bandwidth distribution and energy consumption management. The study focuses on two specific optimization algorithms: the Gale-Shapley algorithm that simulates a matching game for assigning users to base stations, and the Nash Bargaining algorithm designed to alter bandwidth based on individualized user needs.

The application of game theory in this context provides innovative solutions to complex networking problems, enabling dynamic and efficient management of available resources. The purpose of the study is to examine how these techniques can improve the functionality and performance of 5G networks in order to improve the overall user experience and make the use of energy and communication resources more efficient. Through the analysis of the above algorithms, the paper highlights the importance of Game Theory for the design of next-generation intelligent networks and lays the foundation for further research in automatic resource allocation in networked environments.

# Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή.....</b>	<b>10</b>
-----------------------------------	-----------

<b>Κεφάλαιο 2 : Αρχιτεκτονική Δικτύων 5G και Τεχνολογία DUDe.....</b>	<b>16</b>
---	-----------

2.1 Επισκόπηση Δικτύων 5G.....	16
2.2 Η Τεχνολογία Downlink-Uplink Decoupling (DUDe).....	18
2.3 Προκλήσεις στην Κατανομή Πόρων σε Δίκτυα DUDe.....	20

<b>Κεφάλαιο 3 : Η Θεωρία Παιγνίων στην Κατανομή Πόρων.....</b>	<b>22</b>
--	-----------

3.1 Εφαρμογές της Θεωρίας Παιγνίων σε Δίκτυα Επικοινωνίας.....	22
3.2 Τύποι Παιγνίων για Βελτιστοποίηση Πόρων.....	24
3.3 Προτεινόμενα Είδη Παιχνιδιών.....	28

<b>Κεφάλαιο 4 : Οι έννοιες του Matching Game και του Nash Bargaining.....</b>	<b>30</b>
---	-----------

4.1 Εισαγωγή στο Matching Game και τον Αλγόριθμο Gale-Shapley....	30
4.2 Ανάλυση Προβλήματος Κατανομής Ενέργειας και Χρηστών.....	34
4.3 Εισαγωγή στο Nash Bargaining.....	37
4.4 Ανάλυση Προβλήματος Κατανομής Bandwidth.....	40

<b>Κεφάλαιο 5 : Περιβάλλον δικτύου και Χαρακτηριστικά Προσομοίωσης.....</b>	<b>44</b>
---	-----------

5.1 Τοπολογία του Δικτύου.....	44
5.2 Τύποι και Χαρακτηριστικά Σταθμών Βάσης.....	44
5.3 Υπολογισμός και Διαχείριση Ενέργειας.....	45

5.4 Κατανομή Bandwidth.....	45
-----------------------------	----

## **Κεφάλαιο 6 : Προτεινόμενος Μηχανισμός Κατανομής Χρηστών και Ενέργειας.....49**

6.1 Εισαγωγή στον Προτεινόμενο Μηχανισμό.....	49
6.2 Κατανομή Χρηστών στους σταθμούς βάσης.....	49
6.3 Κατανομή και διαχείριση Ενέργειας.....	52
6.4 Ψευδοκώδικας Προτεινόμενου Μηχανισμού.....	56

## **Κεφάλαιο 7 : Προτεινόμενος Μηχανισμός Κατανομής Bandwidth..... 58**

7.1 Εισαγωγή στον Προτεινόμενο Μηχανισμό.....	58
7.2 Κατανομή Bandwidth των Small Cells / Macro cells για Uplink / Downlink.....	59
7.3 Ψευδοκώδικας Προτεινόμενου Μηχανισμού.....	64

## **Κεφάλαιο 8 : Αποτελέσματα..... 66**

8.1 Εισαγωγή.....	66
8.2 Αποτελέσματα κατανομής χρηστών-ενέργειας.....	67
8.3 Αποτελέσματα κατανομής Bandwidth.....	72

## **Κεφάλαιο 9 : Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....79**

9.1 Συμπεράσματα.....	79
9.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	80

## **Κεφάλαιο 10 : Βιβλιογραφία - Αναφορές.....82**

# Λίστα Εικόνων

[Εικόνα 2.1: Γράφημα έξυπνης πόλης \(Smart Cities\) - 5G](#)

[Εικόνα 2.2 : Σχηματικό διάγραμμα δικτύου με τεχνολογία DUDe](#)

[Εικόνα 3.1 : Εικόνα ισορροπίας Nash στα συνεργατικά παίγνια \( Nash Contributions to Cooperative Game Theory - “<https://fastercapital.com/>” \)](#)

[Εικόνα 8.1: Οπτικοποίηση κατανομής χρηστών με Gale-Shapley](#)

[Εικόνα 8.2: Επίτευξη Ισορροπίας Nash](#)

[Εικόνα 8.3: Αναλυτικά utilities χρηστών - Gale Shapley Matching Game](#)

[Εικόνα 8.4: Οπτικοποίηση κατανομής χρηστών με τυχαία κατανομή](#)

[Εικόνα 8.5: Γραφική παράσταση σύγκρισης Utility - Διαθέσιμου Bandwidth \(Uplink\) ανάμεσα στον μηχανισμό Nash Bargaining και την αναλογική κατανομή](#)

[Εικόνα 8.6: Η έξοδος του κώδικα με τις αναλυτικές κατανομές με διαθεσιμότητα bandwidth 1200 MHz](#)

[Εικόνα 8.7: Η έξοδος του κώδικα με τις αναλυτικές κατανομές με διαθεσιμότητα bandwidth 600 MHz](#)

[Εικόνα 8.8: Γραφική παράσταση σύγκρισης Utility - Διαθέσιμου Bandwidth \(Downlink\) ανάμεσα στον μηχανισμό Nash Bargaining και την αναλογική κατανομή](#)

[Εικόνα 8.9: Η έξοδος του κώδικα με τις αναλυτικές κατανομές με διαθεσιμότητα bandwidth 4400 MHz , 3000 MHz](#)



# Αρκτικόλεξα

<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>mmWave</b>	Millimeter wave
<b>MIMO</b>	Massive Multi Input Multi Output
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>DUDe</b>	Downlink Uplink Decoupling
<b>VR</b>	Virtual Reality
<b>AR</b>	Augmented Reality
<b>HetNet</b>	Heterogeneous Network
<b>SINR</b>	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
<b>NBS</b>	Nash Bargaining Solution
<b>SLSQP</b>	Sequential Least Squares Programming
<b>DL</b>	Downlink
<b>UL</b>	Uplink
<b>dBm</b>	decibel-milliwatts
<b>mhz</b>	Megahertz

# Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο και Σκοπός της Εργασίας

Τα δίκτυα 5G αποτελούν την πέμπτη γενιά ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων, αλλάζοντας τον τρόπο επικοινωνίας και διαχείρισης δεδομένων. Σημαντικά υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, μικρότερες καθυστερήσεις και δυνατότητα διασύνδεσης με δισεκατομμύρια συσκευές είναι τα βασικά χαρακτηριστικά που τα αναδεικνύουν, όπως αυτές που χρησιμοποιούν το Internet of Things (IoT) [1]. Οι βελτιώσεις αυτές αντιμετωπίζουν σοβαρές προκλήσεις, ειδικότερα στη διαχείριση και βελτιστοποίηση των πόρων του δικτύου, όπως η κατανάλωση ενέργειας, η κατανομή των χρηστών και η αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης (bandwidth).

Η ανάγκη για εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων δημιουργεί την ανάγκη για αποτελεσματική διαχείριση των πόρων του δικτύου, προκειμένου να υπάρχει συνεχής, γρήγορη και αξιόπιστη σύνδεση. Η χρήση νέων τεχνολογιών όπως το mmWave και το massive MIMO (Multi Input Multi Output) βελτιώνει την χωρητικότητα και την αποδοτικότητα των ασύρματων συνδέσεων, ενώ επιτρέπει τη σύνδεση πολλαπλών συσκευών ταυτόχρονα. Ωστόσο, οι προαναφερθείσες τεχνολογίες αυξάνουν τις ανάγκες σε ενέργεια και κάνουν πιο περίπλοκη και δύσκολη την διαχείριση των πόρων. Η βελτιστοποίηση των πόρων όπως η ενέργεια, το bandwidth και η κατανομή των χρηστών είναι κρίσιμη για τη σωστή λειτουργία των δικτύων 5G και επηρεάζει απευθείας την απόδοση, τη σταθερότητα και την ποιότητα των υπηρεσιών (QoS-Quality of Service) προς τους χρήστες.

Ένα από τα βασικά θέματα που προκύπτουν είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας στους σταθμούς βάσης (BS-Base Stations), καθώς οι σύγχρονες υποδομές απαιτούν όλο και περισσότερη ενέργεια λόγω της χρήσης μικροκυψελών και σταθμών βάσης μικρής εμβέλειας. Παρόλο που βελτιώνουν την κάλυψη και τη χωρητικότητα του δικτύου, αυτές οι υποδομές προκαλούν σημαντικό αποτύπωμα στην ενέργεια. Επιπλέον, η αποτελεσματική κατανομή των χρηστών στους σταθμούς βάσης είναι μια ακόμα πρόκληση, λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική φύση του δικτύου. Οι χρήστες πρέπει να τοποθετούνται σε βάσεις σταθμούς που προσφέρουν την καλύτερη ισορροπία ανάμεσα στην απόδοση και το φορτίο του δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη παράμετρα όπως η απόσταση, η ισχύς του σήματος και η χρήση πόρων.

Επιπλέον, η αναθεώρηση του bandwidth που αναλογεί σε κάθε κελί είναι εξίσου σημαντική, καθώς τα δίκτυα 5G εξυπηρετούν ταυτόχρονα εκατομμύρια χρήστες με διαφορετικές ανάγκες και πραγματικού χρόνου απαιτήσεις δεδομένων. Για να αποφευχθεί η συμφόρηση, είναι απαραίτητο να διαχειρίζεται καλύτερα το

bandwidth προκειμένου να διασφαλιστεί η συνεχής παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσιών.

Μια από τις πιο καινοτόμες λύσεις για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων είναι η τεχνολογία DUDe (Downlink-Uplink Decoupling) [2], η οποία επιτρέπει την ανεξάρτητη διαχείριση των κατερχόμενων (downlink) και ανερχόμενων (uplink) συνδέσεων από διαφορετικούς σταθμούς βάσης. Με αυτόν τον τρόπο, ο κάθε χρήστης μπορεί να επιλέξει διαφορετικό σταθμό βάσης για την ανερχόμενη ζεύξη και διαφορετικό για την κατερχόμενη ζεύξη, προκειμένου να βρει τη βέλτιστη απόδοση για την κάθε σύνδεση, βελτιώνοντας τη διαχείριση πόρων και μειώνοντας τις παρεμβολές. Αν και η τεχνολογία DUDe έχει σημαντικά πλεονεκτήματα, η ορθή και αποτελεσματική χρήση της απαιτεί προηγμένες στρατηγικές για τη βέλτιστη διαχείριση πόρων, λαμβάνοντας υπόψη τις ενεργειακές ανάγκες, τη διαθεσιμότητα πόρων και τον αριθμό των χρηστών.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση και η πρόταση τεχνικών από τη θεωρία παιγνίων για τη βελτίωση της κατανομής πόρων σε δίκτυα 5G που χρησιμοποιούν την τεχνολογία DUDe. Η θεωρία παιγνίων παρέχει ένα ισχυρό μαθηματικό εργαλείο για την ανάλυση και διαχείριση πολύπλοκων καταστάσεων, όπου πολλοί "παίκτες" (σταθμοί βάσης και χρήστες) πρέπει να αλληλεπιδράσουν και να ανταγωνιστούν για τους διαθέσιμους πόρους ενός δικτύου. Σε αυτήν την έρευνα εστιάζουμε στην βελτίωση τριών κύριων πόρων.

1. Ενέργεια: Η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας των σταθμών βάσης και των χρηστών, μέσω έξυπνης κατανομής των χρηστών και διαχείρισης της απόδοσης του δικτύου.
2. Χρήστες: Η δυναμική κατανομή των χρηστών στους σταθμούς βάσης, ανάλογα με τη θέση, την απόσταση και τις απαιτήσεις δικτύου.
3. Bandwidth: Η αποδοτική κατανομή του εύρους ζώνης των κελιών μεταξύ των χρηστών, εξασφαλίζοντας δίκαιη και βέλτιστη διαχείριση των δεδομένων.

Για την επίτευξη αυτών των στόχων, θα εφαρμοστούν συγκεκριμένες στρατηγικές βελτιστοποίησης, βασισμένες σε μοντέλα θεωρίας παιγνίων, όπως το Matching Game και το Nash Bargaining. Το Matching Game θα χρησιμοποιηθεί για την κατανομή των χρηστών στους σταθμούς βάσης και τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης, λαμβάνοντας υπόψη τις προτιμήσεις τόσο των χρηστών όσο και των σταθμών βάσης. Από την άλλη, το Nash Bargaining θα εφαρμοστεί για την αποδοτική κατανομή του bandwidth, επιδιώκοντας μια δίκαιη και ισόρροπη κατανομή του εύρους ζώνης μεταξύ των χρηστών, ανάλογα με τις απαιτήσεις τους.

Μέσω της ανάλυσης και της προσομοίωσης αυτών των στρατηγικών, στόχος είναι να αποδειχθεί ότι η εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης πόρων στα δίκτυα 5G, αυξάνοντας

την αποδοτικότητα και μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας, προσφέροντας ταυτόχρονα βέλτιστη ποιότητα υπηρεσίας στους χρήστες.

## 1.2 Σημασία της Βελτιστοποίησης Πόρων στα

### Δίκτυα 5G

Η βελτιστοποίηση των πόρων αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για τη λειτουργία των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, ιδιαίτερα στα δίκτυα 5G όπου η πολυπλοκότητα και οι απαιτήσεις είναι αυξημένες σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές. Τα δίκτυα 5G αναμένεται να υποστηρίξουν περισσότερες συσκευές, όπως έξυπνα τηλέφωνα και συσκευές IoT, εξασφαλίζοντας υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και χαμηλή καθυστέρηση. Η αύξηση της πολυπλοκότητας και η ανάγκη για αξιόπιστη σύνδεση απαιτούν αποτελεσματική διαχείριση των δικτυακών πόρων.

Η διαχείριση περιορισμένων πόρων σε δίκτυα επικοινωνιών περιλαμβάνει την κατανομή και χρήση του φάσματος συχνοτήτων, της ισχύος εκπομπής και του εύρους ζώνης. Η ανάγκη βελτιστοποίησης των πόρων είναι εξίσου επείγουσα και στα δίκτυα 5G, λόγω της ανάγκης για υψηλές χωρητικότητες, ταχύτητες και υποστήριξη πραγματικού χρόνου εφαρμογών. Το δίκτυο πρέπει να διανέμει τους πόρους του έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη απόδοση για παρόχους και τελικούς χρήστες, ενώ παράλληλα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ζητήματα ενεργειακής απόδοσης και οικονομικής βιωσιμότητας.

Τα νέα δίκτυα 5G απαιτούν ευέλικτες λύσεις που προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου, αντίθετα με τα παλιά δίκτυα όπου η διαχείριση πόρων ήταν πιο στατική. Η αύξηση της πυκνότητας των σταθμών βάσης, η χρήση νέων τεχνολογιών όπως το massive MIMO και το mmWave, καθώς και η ανάγκη για αποδοτική εξυπηρέτηση των χρηστών σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα απαιτήσεων, ενισχύουν την ανάγκη για έξυπνη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων. Αυτές οι τεχνολογίες απαιτούν βελτιστοποίηση και εξελιγμένες τεχνικές για τη διανομή των πόρων και την αποτελεσματική χρήση του φάσματος.

Αν και η διαχείριση των πόρων μπορεί να εμπεριέχει πολλούς παράγοντες, τα τρία βασικά στοιχεία που θεωρούνται κρίσιμα για τα δίκτυα 5G είναι η ενέργεια, οι χρήστες και το bandwidth. Αυτοί οι τρεις παράγοντες είναι ουσιώδεις για την ομαλή λειτουργία των δικτύων και επηρεάζουν απευθείας την ποιότητα των υπηρεσιών (QoS), τη σταθερότητα και την οικονομική βιωσιμότητα των τηλεπικοινωνιακών παρόχων

1. **Ενέργεια:** Η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν στα δίκτυα 5G. Οι νέες τεχνολογίες,

όπως το massive MIMO και η χρήση μικροκυψελών, συμβάλλουν στην αύξηση της κάλυψης και της χωρητικότητας του δικτύου, αλλά ταυτόχρονα αυξάνουν την κατανάλωση ενέργειας [3]. Η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας όχι μόνο μειώνει το κόστος λειτουργίας, αλλά συμβάλλει και στη βελτίωση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας των δικτύων. Καθώς οι σταθμοί βάσης πολλαπλασιάζονται για να καλύψουν τις απαιτήσεις των χρηστών, η διαχείριση της ενέργειας γίνεται κρίσιμη, με την αποδοτική κατανομή της να αποτελεί βασικό στόχο για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του δικτύου.

2. Χρήστες: Η διαχείριση των χρηστών στα δίκτυα 5G είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, λόγω του μεγάλου αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών και των διαφοροποιημένων απαιτήσεών τους. Οι χρήστες πρέπει να κατανεμηθούν στους σταθμούς βάσης με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί η συμφόρηση και να βελτιστοποιηθεί η χρήση των διαθέσιμων πόρων. Για παράδειγμα, σε αστικές περιοχές, όπου η πυκνότητα των χρηστών είναι πολύ υψηλή, οι σταθμοί βάσης μπορεί να αντιμετωπίσουν προβλήματα υπερφόρτωσης, γεγονός που επηρεάζει την ποιότητα των υπηρεσιών (QoS). Η δυναμική κατανομή των χρηστών βάσει παραμέτρων όπως η απόσταση από τον σταθμό βάσης, η ποιότητα του σήματος και οι απαιτήσεις δεδομένων είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του δικτύου και της ικανοποίησης των χρηστών [4].
3. Bandwidth: Το εύρος ζώνης είναι ένας από τους πιο πολύτιμους πόρους στα δίκτυα 5G, καθώς οι απαιτήσεις για μεγάλες ταχύτητες δεδομένων και χαμηλή καθυστέρηση αυξάνονται συνεχώς. Οι εφαρμογές υψηλής απόδοσης, όπως η εικονική πραγματικότητα (VR), η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) και οι ζωντανές ροές βίντεο, απαιτούν τεράστιο bandwidth για να λειτουργήσουν ομαλά. Η αποδοτική κατανομή του bandwidth ανάμεσα στους χρήστες αποτελεί πρόκληση, καθώς τα δίκτυα πρέπει να εξισορροπήσουν τις απαιτήσεις για δεδομένα με την αποφυγή της συμφόρησης, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα την ποιότητα υπηρεσιών (QoS) [5]. Η αποδοτική κατανομή του bandwidth είναι ζωτικής σημασίας για τη σταθερή λειτουργία του δικτύου, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα χρηστών.

Η βελτιστοποίηση των δικτύων 5G απαιτεί τη διαχείριση της ενέργειας, των χρηστών και του bandwidth, τα οποία αποτελούν τις κύριες προκλήσεις. Σε αυτήν την εργασία, επιδιώκουμε τη βελτιστοποίηση αυτών των τριών πόρων μέσω της χρήσης τεχνικών θεωρίας παιγνίων, καθώς η αποτελεσματική διαχείρισή τους μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη απόδοση, χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη.

## 1.3 Βασικές Έννοιες της Θεωρίας Παιγνίων

Το πεδίο της θεωρίας παιγνίων ασχολείται με τις στρατηγικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ λογικών παραγόντων, αποτελώντας έναν σημαντικό κλάδο των μαθηματικών και της οικονομικής επιστήμης. Στόχος της είναι η ανάλυση περιπτώσεων όπου τα αποτελέσματα για κάθε παίκτη εξαρτώνται όχι μόνο από τις δικές του επιλογές, αλλά και από τις επιλογές των άλλων παικτών. Επομένως, η θεωρία παιγνίων εξετάζει ζητήματα με αλληλεξάρτηση και ανταγωνισμό, καθώς και δυνατότητα συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκομένων.

Η εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, ειδικά στα δίκτυα 5G, παρέχει ένα ισχυρό πλαίσιο για την ανάλυση και βελτιστοποίηση της διαχείρισης περιορισμένων πόρων, όπως το εύρος ζώνης, η ενέργεια και η κατανομή των χρηστών. Για να διασφαλιστεί η βέλτιστη χρήση των περιορισμένων αυτών πόρων, πρέπει να γίνει διανομή που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των χρηστών και των παρόχων υπηρεσιών.

Η θεωρία παιγνίων εστιάζει στην ανάλυση των στρατηγικών αποφάσεων των παικτών, οι οποίοι προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν τη δική τους ωφέλεια, λαμβάνοντας υπόψη τις επιλογές των υπολοίπων παικτών. Σε αυτήν τη συγκυρία, η θεωρία παιγνίων εξετάζει διάφορες στρατηγικές επιλογές, από ανταγωνιστικές έως συνεργατικές, και αναλύει πώς αυτές οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Στα δίκτυα 5G, οι "παίκτες" μπορεί να είναι οι χρήστες, οι σταθμοί βάσης, οι διαχειριστές δικτύων ή ακόμα και διαφορετικοί πάροχοι υπηρεσιών που αναμένεται να ανταγωνιστούν ή συνεργαστούν για τη βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων πόρων [6].

Ένας από τους βασικούς στόχους της θεωρίας παιγνίων είναι η επίτευξη ισορροπίας Nash, όπου κανένας παίκτης δεν μπορεί να βελτιώσει τη θέση του αλλάζοντας τη στρατηγική του, εκτός αν αλλάξουν και οι στρατηγικές των υπολοίπων παικτών. Στα πλαίσια των δικτύων 5G, η έννοια της ισορροπίας Nash μπορεί να εφαρμοστεί στην κατανομή του bandwidth, στην κατανομή της ενέργειας, αλλά και στη διαχείριση των χρηστών, εξασφαλίζοντας τη δίκαιη και αποδοτική κατανομή των πόρων, χωρίς κίνητρα για αλλαγές που θα μπορούσαν να επηρεάσουν το σύστημα.

Επιπλέον, η θεωρία παιγνίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διερευνήσει σενάρια συνεργασίας και μη συνεργατικών παιγνίων. Σε παιχνίδια μη συνεργατικά, κάθε παίκτης λαμβάνει αποφάσεις ανεξάρτητα με στόχο τη μεγιστοποίηση του προσωπικού του οφέλους, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τους υπόλοιπους. Μια περίπτωση στα δίκτυα 5G είναι όταν οι χρήστες ανταγωνίζονται για περιορισμένο bandwidth ή ενέργεια, χωρίς να σκέφτονται τις επιπτώσεις στους άλλους [7]. Σε συνεργατικά παιχνίδια, οι παίκτες μπορούν να συνεργαστούν και να σχηματίσουν συνασπισμούς για να επιτύχουν καλύτερα αποτελέσματα. Σε δίκτυα 5G, αυτό ενδέχονται να συνεπάγεται τη συνεργασία μεταξύ σταθμών βάσης για τη

βελτιστοποίηση της χρήσης της ενέργειας ή του φάσματος, με αποτέλεσμα μια γενικά βελτιωμένη απόδοση του δικτύου.

Η θεωρία παιγνίων παρέχει εργαλεία για την ανάλυση καταστάσεων με πεπερασμένους πόρους που πρέπει να κατανεμηθούν ισορροπημένα μεταξύ όλων των εμπλεκομένων. Στα δίκτυα της 5ης γενιάς, προβλήματα κατανομής πόρων απαιτούν στρατηγικές που λαμβάνουν υπόψη τόσο τον ανταγωνισμό μεταξύ των χρηστών όσο και τις τεχνικές απαιτήσεις του δικτύου. Με τη θεωρία των παιγνίων, αναλύονται περιστάσεις όπου οι συμμετέχοντες πρέπει να διαπραγματευτούν, να συνεργαστούν ή να ανταγωνιστούν προκειμένου να αποκτήσουν τους απαιτούμενους πόρους, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος [8].

Συνολικά, η θεωρία παιγνίων αποτελεί ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την ανάλυση της συμπεριφοράς των παικτών και της αλληλεπίδρασής τους σε καταστάσεις περιορισμένων πόρων, όπως είναι τα δίκτυα 5G. Η χρήση της σε κρίσιμες καταστάσεις μπορεί να βελτιώσει τις επιδόσεις, να εξασφαλίσει δίκαιη κατανομή πόρων και να αυξήσει την αποδοτικότητα του δικτύου.

# Κεφάλαιο 2 : Αρχιτεκτονική Δικτύων 5G και Τεχνολογία DUDe

## 2.1 Επισκόπηση Δικτύων 5G

Η νέα γενιά ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων (5G) αποτελεί μία από τις πλέον καινοτόμες και προηγμένες πλατφόρμες στον χώρο της ψηφιακής επικοινωνίας. Σχεδιάστηκε για να ανταποκριθεί στις αυξανόμενες ανάγκες της σύγχρονης ψηφιακής οικονομίας, προσφέροντας σημαντικές βελτιώσεις στη χωρητικότητα, την ταχύτητα και την αξιοπιστία των συνδέσεων. Το 5G εισάγει νέες τεχνολογίες που υπερβαίνουν τις δυνατότητες των προκατόχων και υποστηρίζουν την ανάπτυξη εφαρμογών που απαιτούν υψηλές επιδόσεις, όπως το IoT, οι έξυπνες πόλεις, η αυτοκινητοβιομηχανία και η βιομηχανική αυτοματοποίηση.



Εικόνα 2.1: Γράφημα έξυπνης πόλης (Smart Cities) - 5G

Η μετάδοση δεδομένων στο 5G μπορεί να φτάσει μέχρι τα 10 Gbps, παρέχοντας σημαντικά υψηλότερες ταχύτητες από τα δίκτυα 4G, ενισχύοντας ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της νέας τεχνολογίας. Η επίτευξη αυτή γίνεται με τη χρήση υψηλών συχνοτήτων φασμάτων, όπως τα millimeter wave (mmWave), που παρέχουν ευρύτερο εύρος για τη μετάδοση δεδομένων. Αν και τα mmWave παρέχουν υψηλές ταχύτητες, η χρήση τους αντιμετωπίζει προκλήσεις όπως η περιορισμένη εμβέλεια και η δυσκολία διείσδυσης σημάτων, απαιτώντας πυκνό δίκτυο σταθμών βάσης για συνεχή κάλυψη, ιδίως σε αστικά περιβάλλοντα [9].

Εκτός από την αυξημένη ταχύτητα, το 5G παρέχει σημαντικά μικρότερους χρόνους καθυστέρησης, φθάνοντας σε επίπεδα κάτω του 1 ms. Αυτή η μικρή καθυστέρηση



την καθιστά ιδανική για εφαρμογές που απαιτούν σχεδόν άμεση απόκριση, όπως αυτόνομα οχήματα και βιομηχανικές διαδικασίες που χρειάζονται γρήγορη ανταπόκριση σε πραγματικό χρόνο. Η βελτίωση στην απόκριση οφείλεται κατά κύριο λόγο στη χρήση της τεχνολογίας edge computing, η οποία επιτρέπει την επεξεργασία δεδομένων πιο κοντά στον τελικό χρήστη, μειώνοντας έτσι τους χρόνους μεταφοράς δεδομένων σε απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων [10].

Η δυνατότητα υποστήριξης μαζικής συνδεσιμότητας είναι ένα από τα καινοτόμα χαρακτηριστικά του 5G. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ζωτικής σημασίας για την αύξηση του Internet of Things (IoT), το οποίο απαιτεί τη συγχρονισμένη σύνδεση εκατομμυρίων συσκευών με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μειωμένες απαιτήσεις εύρους ζώνης [11]. Το 5G μπορεί να υποστηρίξει μεγάλο αριθμό συσκευών ταυτόχρονα, παρέχοντας υψηλή απόδοση και αξιοπιστία, εξασφαλίζοντας έτσι ομαλή λειτουργία των IoT εφαρμογών σε μεγάλη κλίμακα.

Η τεχνολογία beamforming βελτιώνει την απόδοση και την κάλυψη στο 5G με την κατευθυνόμενη εκπομπή σήματος προς συγκεκριμένες συσκευές, μειώνοντας τις παρεμβολές σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τη βελτίωση της ποιότητας των συνδέσεων ακόμη και σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα χρηστών, εξασφαλίζοντας αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου [12].

Μια άλλη κρίσιμη πτυχή του 5G σχεδιασμού είναι το Network Slicing, που επιτρέπει τη δημιουργία εικονικών δικτύων πάνω στην ίδια υποδομή. Με αυτόν τον τρόπο, τα δίκτυα μπορούν να προσφέρουν εξειδικευμένες υπηρεσίες σε διαφορετικούς χρήστες ή εφαρμογές, προσαρμόζοντας τα επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών (QoS) βάσει των αναγκών τους [13]. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει στο 5G να προσαρμόζεται εύκολα στις ανάγκες κάθε εφαρμογής, είτε πρόκειται για γρήγορη μετάδοση δεδομένων είτε για αξιόπιστη χρήση με χαμηλή καθυστέρηση.

Η αποτελεσματική χρήση ενέργειας στα δίκτυα 5G είναι σημαντική για τη βιωσιμότητά τους. Η δυνατότητα υποστήριξης πολλών συσκευών με χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, σε συνδυασμό με τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των υποδομών, καθιστά το 5G κρίσιμο εργαλείο για τη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, ιδίως όταν οι απαιτήσεις για συνεχή συνδεσιμότητα και υψηλές επιδόσεις αυξάνονται.

Συνολικά, το 5G δεν απλά αναβαθμίζει τα υπάρχοντα δίκτυα, αλλά μετασχηματίζει τις επικοινωνίες επιτρέποντας την ανάπτυξη νέων εφαρμογών και υπηρεσιών με υψηλές επιδόσεις, αξιοπιστία και προσαρμοστικότητα. Η επίδραση του 5G αναμένεται να είναι πολύπλευρη, επηρεάζοντας διάφορους τομείς όπως η υγεία, οι μεταφορές, η ενέργεια και οι έξυπνες πόλεις, καθώς παράλληλα παρέχει τις βάσεις για έναν κόσμο που είναι συνδεδεμένος και αυτοματοποιημένος [14].

## 2.2 Η Τεχνολογία Downlink-Uplink Decoupling (DUDe)

Η τεχνική Downlink-Uplink Decoupling (DUDe) αποτελεί μία από τις πιο καινοτόμες προσεγγίσεις για τη διαχείριση πόρων στα δίκτυα 5G, προσφέροντας βελτιωμένη αποδοτικότητα και ευελιξία. Η βασική ιδέα της τεχνολογίας DUDe είναι η αποκατάσταση της έλλειψης συγχρονισμού μεταξύ των κατερχόμενων και ανερχόμενων συνδέσεων, επιτρέποντας στους χρήστες να επιλέγουν διαφορετικούς σταθμούς βάσης για κάθε σύνδεση, ανάλογα με την απόδοση του δικτύου σε κάθε τομέα. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την βελτιωμένη αξιοποίηση των ασύρματων πόρων, βελτιώνοντας την QoS σε περιοχές με υψηλή κυκλοφορία δεδομένων [15].

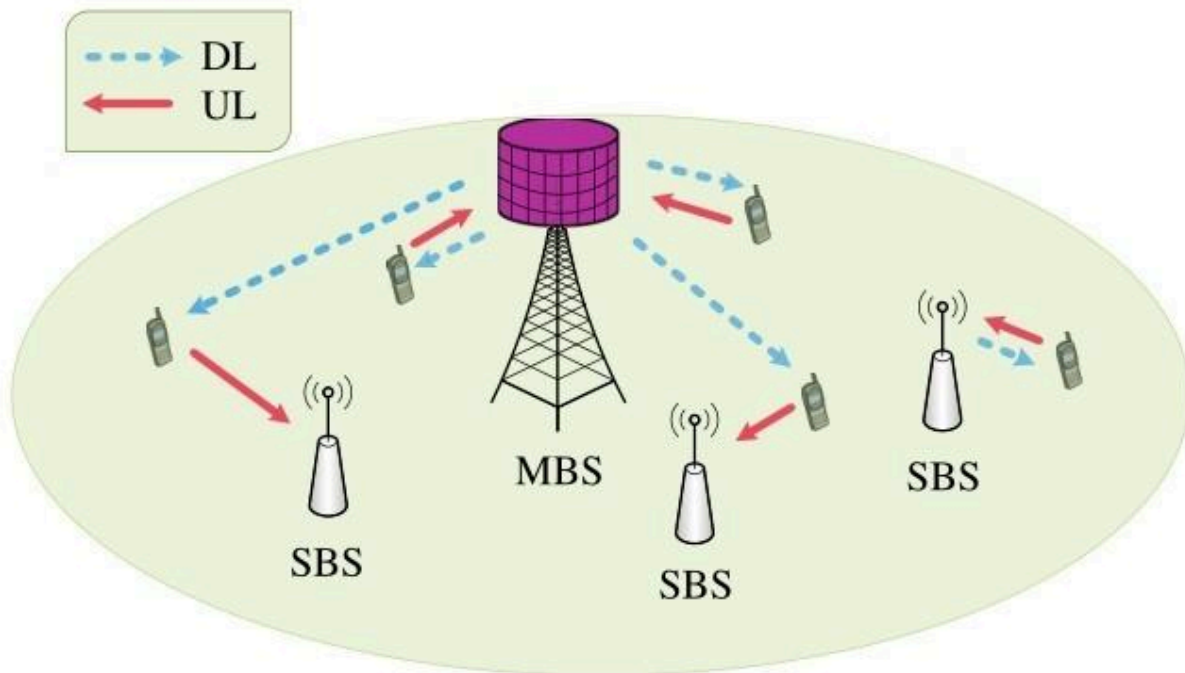
Στα παραδοσιακά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι χρήστες συνδέονται στον ίδιο σταθμό βάσης τόσο για τη μετάδοση προς τον δέκτη όσο και για τη λήψη δεδομένων. Με την τεχνολογία DUDe, η σύνδεση uplink και downlink μπορεί να απελευθερωθεί, επιτρέποντας την ανάθεσή τους σε διαφορετικούς σταθμούς βάσης [16].

Αυτό έχει σημασία επειδή:

- Τα small cells συχνά παρέχουν ισχυρότερο uplink σήμα λόγω της μικρής απόστασης από τον χρήστη, γεγονός που μειώνει την κατανάλωση ενέργειας των χρηστών.
- Τα macro cells, με την ευρύτερη κάλυψη τους, είναι συχνά καταλληλότερες για το downlink, καθώς μπορούν να προσφέρουν ισχυρότερα σήματα σε μεγαλύτερες αποστάσεις και να εξυπηρετούν περισσότερους χρήστες.

Με τη χρήση της τεχνολογίας DUDe, τα δίκτυα μπορούν να επιλέξουν ξεχωριστά τον καλύτερο σταθμό βάσης για τη μετάδοση και τη λήψη δεδομένων από κάθε χρήστη, με αποτέλεσμα:

- Πιο αποτελεσματικός καταμερισμός πόρων: Οι χρήστες μπορούν να συνδεθούν σε μικρότερες, αποδοτικές ενεργειακά small cells για το uplink, και σε ισχυρότερες macro cells για το downlink.
- Μείωση κατανάλωσης ενέργειας: Οι χρήστες που συνδέονται με μικρές κυψέλες για τη μετάδοση προς τη βάση εξοικονομούν ενέργεια, ενώ οι μεγάλες κυψέλες ρυθμίζουν καλύτερα τη μετάδοση μεγάλων όγκων δεδομένων προς τους χρήστες [18]
- Βελτίωση της ποιότητας εξυπηρέτησης (QoS): Κάθε χρήστης μπορεί να απολαμβάνει το καλύτερο δυνατό σήμα για uplink και downlink, ενισχύοντας συνολικά την εμπειρία του.



Εικόνα 2.2 : Σχηματικό διάγραμμα δικτύου με τεχνολογία DUE

Αυτό βελτιώνει την απόδοση του δικτύου, ιδίως σε περιοχές με πολλούς χρήστες. Επίσης, η χρήση διαφορετικών σημείων πρόσβασης για κάθε σύνδεση μειώνει τις παρεμβολές και βελτιώνει την κάλυψη σε δίκτυα με διαφορετικούς τύπους κυψελών, επιτρέποντας την αποδοτική χρήση πόρων [17].

Η τεχνολογία DUE παρέχει εξίσου σημαντικά πλεονεκτήματα σε περιβάλλοντα με ανισότητα στην κάλυψη του δικτύου, όπως σε αστικές περιοχές με διαφορετικούς σταθμούς βάσης σε ισχύ και εμβέλεια. Σε τέτοια περιβάλλοντα, η αυτόνομη διαχείριση των φθινουσών και αυξανόμενων συνδέσεων βοηθάει στην καλύτερη διανομή των διαθέσιμων πόρων και τη βελτίωση της κάλυψης και της χωρητικότητας του δικτύου. Ταυτόχρονα, επιτρέπει στους παρόχους να διαχειρίζονται αποτελεσματικότερα τη ροή δεδομένων και να μειώνουν τον κυκλοφοριακό φόρτο, ειδικά κατά τις αιχμές [19].

Παρόλα αυτά, παρά τα οφέλη που προσφέρει, η τεχνολογία DUE απαιτεί σημαντικές αλλαγές στην δομή των δικτύων 5G. Η υλοποίηση απαιτεί προηγμένους αλγόριθμους για τη δυναμική διαχείριση πόρων και τη συνεργασία μεταξύ διαφορετικών σταθμών βάσης, προκειμένου να επιτευχθεί βέλτιστη απόδοση και συγχρονισμός ανάμεσα σε εισερχόμενες και εξερχόμενες συνδέσεις. Παρά τις προκλήσεις, το DUE μπορεί να έχει κρίσιμο ρόλο στη μελλοντική εξέλιξη των δικτύων 5G, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις.

Καταλήγοντας, η τεχνολογία Downlink-Uplink Decoupling (DUDe) εισάγει μια καινοτόμο προσέγγιση στη διαχείριση των ασύρματων πόρων, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία, αποδοτικότητα και ενεργειακή βελτίωση στα δίκτυα 5G. Παρά τις απαιτήσεις για αλλαγές στην δομή των δικτύων, η τεχνολογία αυτή μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της ποιότητας υπηρεσιών και στην ικανοποίηση των αυξανόμενων αναγκών των δικτύων της επόμενης γενιάς.

## 2.3 Προκλήσεις στην Κατανομή Πόρων σε Δίκτυα DUDe

Η τεχνολογία Downlink-Uplink Decoupling (DUDe), παρόλο που έχει σημαντικά πλεονεκτήματα για τη βελτίωση της απόδοσης των δικτύων 5G, φέρνει και νέες προκλήσεις στη διαχείριση και κατανομή των ασύρματων πόρων. Η ανεξάρτητη διαχείριση συνδέσεων παρακάτω και πάνω απαιτεί νέες προδιαγραφές για τη δομή του δικτύου και τους αλγορίθμους κατανομής πόρων σε πραγματικό χρόνο. Η διαχείριση των νέων προκλήσεων είναι ζωτικής σημασίας για την βελτίωση της απόδοσης των δικτύων 5G και την αποδοτική χρήση των πόρων που είναι διαθέσιμοι.

Η πολυπλοκότητα που επιφέρει η δυναμική κατανομή πόρων αποτελεί μία βασική πρόκληση της τεχνολογίας DUDe. Η αποσύνδεση των κατερχόμενων και ανερχόμενων συνδέσεων απαιτεί την ανεξάρτητη κατανομή πόρων για κάθε είδος σύνδεσης, προσαρμόζοντας τους στις διακυμάνσεις της ζήτησης και στις ανάγκες των χρηστών. Αντίθετα από τις παραδοσιακές μεθόδους κατανομής πόρων σε συμμετρικές συνδέσεις, η κατανομή πρέπει να είναι σε πραγματικό χρόνο και να λαμβάνει υπόψη τις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου, όπως η χωρητικότητα των βάσεων και η απόδοση του φάσματος. Οι αλγόριθμοι πρέπει να είναι ευέλικτοι και να αποκρίνονται γρήγορα σε αλλαγές στη ζήτηση και την κατάσταση του δικτύου, κάτι που καθιστά πιο πολύπλοκη τη διαχείριση των πόρων [20].

Επιπλέον, η αντιμετώπιση των παρεμβολών και της συμφόρησης είναι μια σημαντική πρόκληση για τα δίκτυα DUDe. Η αποσύνδεση των συνδέσεων και η δυνατότητα των χρηστών να συνδεθούν σε διαφορετικούς σταθμούς βάσης αυξάνει τον κίνδυνο παρεμβολών, ειδικά σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα χρηστών, όπως τα ετερογενή δίκτυα (HetNets), όπου οι σταθμοί βάσης διαφέρουν σε μέγεθος και ισχύ [21]. Οι παρεμβολές μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα των συνδέσεων και να προκαλέσουν συμφόρηση, ιδίως όταν πολλοί χρήστες μοιράζονται την ίδια εύρυθμη λειτουργία. Επομένως, χρειάζονται αλγόριθμοι που μπορούν να διαχειρίζονται αποτελεσματικά τις παρεμβολές και να κατανέμουν τους πόρους με τρόπο που να μειώνει την πιθανότητα συμφόρησης, εξασφαλίζοντας παράλληλα την αποδοτική χρήση του φάσματος [18].

Μια άλλη πρόκληση που προκύπτει από την τεχνολογία DUDe είναι η ανάγκη συνεργασίας μεταξύ των σταθμών βάσης που εξυπηρετούν τις κατερχόμενες και

ανερχόμενες συνδέσεις. Η αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ των σταθμών βάσης είναι αναγκαία για την ιδανική κατανομή των πόρων και την αποφυγή ανισοτήτων στην απόδοση των συνδέσεων. Η συγχρονοποίηση των σταθμών βάσης είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και απαιτεί την ανάπτυξη νέων αρχιτεκτονικών δικτύου που επιτρέπουν τη δυναμική και συντονισμένη διαχείριση των πόρων σε ετερογενή περιβάλλοντα, όπου οι σταθμοί βάσης μπορεί να έχουν διαφορετικές δυνατότητες και περιοχές κάλυψης [19].

Η αποδοτικότητα ενέργειας είναι εξίσου σημαντική στη διαχείριση των πόρων σε δίκτυα DUDe. Καθώς οι χρήστες μεταβαίνουν από διαφορετικούς σταθμούς βάσης για τις κατερχόμενες και ανερχόμενες συνδέσεις, η κατανάλωση ενέργειας των σταθμών βάσης αυξάνεται, ειδικά σε περιβάλλοντα με πυκνή κυψελωτή ανάπτυξη. Η αυξανόμενη ανάγκη για συγχρονισμό μεταξύ των σταθμών βάσης μπορεί να επιδεινώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των δικτύων [9]. Για να διατηρηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα στα δίκτυα 5G, απαιτούνται αλγόριθμοι που λαμβάνουν υπόψη τις ενεργειακές ανάγκες των σταθμών βάσης και των χρηστών, επιτρέποντας την βέλτιστη κατανομή των πόρων για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Τελικώς, η χρήση της τεχνολογίας DUDe απαιτεί σημαντικές αναβαθμίσεις στην αρχιτεκτονική των δικτύων και των υποδομών. Η αποσύνδεση των εξερχόμενων και εισερχόμενων συνδέσεων απαιτεί νέους τρόπους διαχείρισης πόρων και υποδομών που υποστηρίζουν τη συνεργασία μεταξύ βάσεων [7]. Αυτό σημαίνει περισσότερα έξοδα και πολύπλοκη διαδικασία για τους παρόχους, καθώς και την ανάγκη για ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων επικοινωνίας που θα υποστηρίζουν την ευέλικτη και προσαρμόσιμη διανομή των πόρων σε ένα πολυδιάστατο δίκτυο περιβάλλον.

Συνολικά, το DUDe τεχνολογικό μοντέλο παρέχει σημαντικές ευκαιρίες βελτίωσης στην απόδοση των δικτύων 5G, αλλά αντιμετωπίζει πολλές τεχνικές προκλήσεις. Η βέλτιστη διανομή των πόρων, η διαχείριση των παρεμβολών και η αποτελεσματική χρήση ενέργειας είναι σημαντικά ζητήματα προς αντιμετώπιση. Νέοι αλγόριθμοι και αρχιτεκτονικές δικτύων πρέπει να αναπτυχθούν για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις και να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας DUDe στα επόμενη γενιάς δίκτυα.

# Κεφάλαιο 3 : Η Θεωρία Παιγνίων στην Κατανομή Πόρων

## 3.1 Εφαρμογές της Θεωρίας Παιγνίων σε Δίκτυα Επικοινωνίας

Η θεωρία παιγνίων έχει γίνει ένα από τα πιο χρήσιμα εργαλεία για να αναλυθούν και να διαχειριστούν οι περιορισμένοι πόροι στα σύγχρονα δίκτυα επικοινωνίας, ιδίως στα δίκτυα 5G. Με την αυξανόμενη πολυπλοκότητα των δικτύων και την ανάγκη για αποτελεσματική χρήση φάσματος και bandwidth, η θεωρία παιγνίων παρέχει ένα πλαίσιο για την μοντελοποίηση αλληλεπιδράσεων στα δίκτυα, συμπεριλαμβανομένων των χρηστών και των σταθμών βάσης. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις μπορεί να είναι είτε ανταγωνιστικές είτε συνεργατικές, προκειμένου να επιτευχθεί πιο αποδοτική κατανομή των πόρων και να διασφαλιστεί η ποιότητα των υπηρεσιών (QoS) [21].

Η θεωρία παιγνίων είναι χρήσιμη για τα δίκτυα όπως τα 5G, όπου οι συνθήκες αλλάζουν συνεχώς και η ζήτηση από τους χρήστες μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις εφαρμογές. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία παιγνίων, μπορούμε να αναπτύξουμε στρατηγικές που επιτρέπουν τη βέλτιστη κατανομή των πόρων, λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά και τις ανάγκες των χρηστών που ανταγωνίζονται για πόρους από το δίκτυο [22]. Αυτές οι στρατηγικές βοηθούν στην αποδοτική διαχείριση της ενέργειας, του bandwidth και στην κατανομή των χρηστών σε σταθμούς βάσης, με στόχο τη διατήρηση της σταθερότητας και της απόδοσης του δικτύου.

### Κατανομή Χρηστών σε Σταθμούς Βάσης για Uplink και Downlink

Ένα από τα βασικά ζητήματα στα δίκτυα 5G είναι η αποτελεσματική ανάθεση των χρηστών σε κατάλληλους σταθμούς βάσης για τις ανερχόμενες (uplink) και κατερχόμενες (downlink) συνδέσεις. Η σωστή κατανομή των χρηστών είναι πολύ σημαντική για να βελτιωθεί η απόδοση του δικτύου και να διασφαλιστεί η ποιότητα των υπηρεσιών (QoS), ειδικά όταν αυξάνεται ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών. Οι χρήστες που ζητούν περιορισμένους πόρους από το δίκτυο πρέπει να κατανέμονται ανάλογα με την ισχύ του σήματος, την απόσταση από τους σταθμούς βάσης και την τρέχουσα φόρτωση του δικτύου.

Στο 5G, η τεχνολογία DUDe επιτρέπει τη σύνδεση των χρηστών με διαφορετικούς σταθμούς βάσης για το uplink και το downlink. Αυτό επιτρέπει αυξημένη ευελιξία στο δίκτυο, εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων πόρων ανάλογα με

τις ανάγκες των χρηστών και τις συνθήκες του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Η θεωρία παιγνίων παρέχει στρατηγικές για την αποτελεσματική ανάθεση των χρηστών με βάση την δυναμική προσαρμογή των πόρων, λαμβάνοντας υπόψη την διαθεσιμότητα των πόρων, τις απαιτήσεις σε δεδομένα και την ποιότητα σύνδεσης [23].

Για παράδειγμα, οι χρήστες που έχουν υψηλές απαιτήσεις σε δεδομένα μπορεί να συνδεθούν σε έναν βασικό σταθμό που προσφέρει καλύτερη ταχύτητα στη λήψη, ενώ η μετάδοση ενδείξεων μπορεί να γίνει μέσω διαφορετικού σταθμού που αποτελεί πιο αποδοτική λύση για τις ανερχόμενες συνδέσεις. Αυτός ο διαχωρισμός επιτρέπει στο δίκτυο να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά την κατανομή των πόρων και να μειώσει τη συμφόρηση, παρέχοντας βελτιωμένη συνολική εμπειρία στους χρήστες.

### **Διαχείριση Κατανάλωσης Ενέργειας Χρηστών και Σταθμών Βάσης**

Η αποδοτικότητα στα δίκτυα 5G αντιμετωπίζει μεγάλη πρόκληση λόγω της αυξανόμενης κατανάλωσης ενέργειας από χρήστες και σταθμούς βάσης. Η απαιτούμενη υψηλή απόδοση των δικτύων 5G συχνά οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, ιδίως σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα πληθυσμού και πολλές ταυτόχρονες συνδέσεις, προκειμένου να καλύψουν τις ανάγκες των χρηστών. Η θεωρία παιγνίων επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της απόδοσης ενέργειας με έξυπνες στρατηγικές κατανομής πόρων.

Οι στρατηγικές αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν την προσαρμογή της ισχύος μετάδοσης ανάλογα με τη ζήτηση και τις συνθήκες του δικτύου, από τους χρήστες και τους σταθμούς βάσης. Σε περιοχές με υψηλή ζήτηση, οι σταθμοί βάσης μπορούν να μειώσουν την ισχύ μετάδοσης όταν οι χρήστες βρίσκονται κοντά, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας. Ακόμα, η δυναμική προσαρμογή της διανομής χρηστών σε σταθμούς βάσης, βασισμένη στην ενεργειακή αποδοτικότητα, επιτρέπει τη μείωση της συνολικής κατανάλωσης χωρίς να υποβάθμισε την ποιότητα υπηρεσιών (QoS) [24].

Η θεωρία παιγνίων παρέχει μοντέλα για τη διαχείριση της ισχύος μετάδοσης και για τη στρατηγική κατανομή των χρηστών με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιοχές με υψηλή ζήτηση για δεδομένα, όπου οι πόροι του δικτύου πρέπει να χρησιμοποιούνται αποδοτικά για τη μείωση του ενεργειακού κόστους [25].

## **Κατανομή Bandwidth για Uplink και Downlink**

Η αποτελεσματική κατανομή του διαθέσιμου εύρους ζώνης είναι εξίσου σημαντική για την επίτευξη υψηλών επιδόσεων στα δίκτυα 5G. Καθώς οι απαιτήσεις των χρηστών για bandwidth ποικίλλουν ανάλογα με τις εφαρμογές και τη χρήση του δικτύου, η σωστή κατανομή του bandwidth μεταξύ uplink και downlink είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή συμφόρησης και την εξασφάλιση ποιότητας υπηρεσιών.

Η θεωρία παιγνίων επιτρέπει την ευέλικτη κατανομή του bandwidth με βάση τις ανάγκες των χρηστών και τις συνθήκες του δικτύου. Κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ζήτησης στο downlink, το δίκτυο μπορεί να προσαρμόσει το εύρος ζώνης για να ανταποκριθεί στις αυξημένες ανάγκες των χρηστών σε δεδομένα. Επίσης, το uplink μπορεί να έχει μικρότερο εύρος ζώνης όταν οι ανάγκες για αποστολή δεδομένων είναι χαμηλές. Αυτό επιτρέπει το δίκτυο να εκμεταλλεύεται αποτελεσματικά τους διαθέσιμους πόρους και να παρέχει βελτιωμένη εμπειρία στους χρήστες, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τη συμφόρηση [25].

Η εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων επιτρέπει την λήψη στρατηγικών αποφάσεων για τη διανομή του bandwidth, ισορροπώντας τη ζήτηση και τη διαθεσιμότητα πόρων. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για να υποστηρίξει εφαρμογές που απαιτούν υψηλές ταχύτητες και χαμηλή καθυστέρηση, όπως το video streaming και οι διαδραστικές υπηρεσίες, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη δίκαιη κατανομή του bandwidth μεταξύ των χρηστών.

## **3.2 Τύποι Παιγνίων για Βελτιστοποίηση Πόρων**

Η θεωρία παιγνίων προσφέρει μια ποικιλία εργαλείων και τεχνικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της διανομής πόρων στα δίκτυα επικοινωνίας. Ανάλογα με την φύση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των "παικτών", διαφορετικά είδη παιγνίων χρησιμοποιούνται για να λύσουν προβλήματα σχετικά με την κατανομή πόρων, την ισορροπία της ζήτησης και την αποτελεσματική χρήση bandwidth, ενέργειας και φάσματος.

### **Μη Συνεργατικά Παίγνια**

Τα μη-συνεργατικά παιχνίδια είναι εκείνα στα οποία οι παίκτες δεν συνεργάζονται μεταξύ τους και κάθε παίκτης επιδιώκει να μεγιστοποιήσει τα προσωπικά του συμφέροντα, αδιαφορώντας για το συνολικό συμφέρον. Σε αυτά τα παιχνίδια, οι παίκτες διαγωνίζονται μεταξύ τους και λαμβάνουν ανεξάρτητες αποφάσεις με βάση τις πληροφορίες που έχουν για τις στρατηγικές των άλλων παικτών.



Η κύρια μέθοδος ανάλυσης μη συνεργατικών παιγνίων είναι το ισοζύγιο Nash, που δείχνει μια κατάσταση όπου κανένας παίκτης δεν μπορεί να βελτιώσει την απόδοσή του με μονομερή αλλαγή στρατηγικής, επειδή οι άλλοι παίκτες δεν αλλάζουν την δική τους. Καθορίζοντας τη στρατηγική του βάσει των υπολοίπων, κάθε παίκτης διατηρεί μια σταθερή ισορροπία στο παιχνίδι.

Στην τεχνολογία επικοινωνιών, μη συνεργατικά παιχνίδια χρησιμοποιούνται ευρέως για θέματα όπως η διανομή φάσματος και η ανάθεση καναλιών. Για παράδειγμα, οι χρήστες ασύρματου δικτύου επιλέγουν κανάλια που θεωρούν κατάλληλα για τη μεταφορά των δεδομένων τους, λαμβάνοντας υπόψη τις επιλογές των άλλων χρηστών. Το παιχνίδι φτάνει σε μια κατάσταση ισορροπίας Nash όταν κανένας παίκτης δεν μπορεί να βελτιώσει τη θέση του επιλέγοντας διαφορετικό μονοπάτι, με τους υπόλοιπους να διατηρούν τις επιλογές τους σταθερές [26]. Στα δίκτυα 5G, οι εφαρμογές περιλαμβάνουν επίσης τη διαχείριση ισχύος, όπου οι χρήστες προσπαθούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας διατηρώντας την ποιότητα του σήματος.

## **Συνεργατικά παιχνίδια**

Τα συνεργατικά παίγνια διαφέρουν από τα μη συνεργατικά, καθώς οι παίκτες συνεργάζονται για να επιτύχουν έναν κοινό στόχο και να βελτιστοποιήσουν το συλλογικό όφελος. Σε αυτά τα παιχνίδια, οι παίκτες σχηματίζουν συμμαχίες ή συνεργασίες, όπου κάθε μέλος της ομάδας επιδιώκει τη μεγιστοποίηση του συνολικού κέρδους, ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζεται ότι η κατανομή των κερδών ή των πόρων είναι δίκαιη.

Ένα από τα κύρια εργαλεία που χρησιμοποιούνται στα συνεργατικά παίγνια είναι η αξία Shapley, η οποία καθορίζει τη δίκαιη κατανομή των κερδών ή των πόρων ανάμεσα στους παίκτες μιας συνεργατικής συμμαχίας, με βάση τη συμβολή κάθε παίκτη στο συνολικό αποτέλεσμα. Η αξία Shapley διασφαλίζει ότι κάθε παίκτης λαμβάνει το μερίδιο που αντιστοιχεί στη συμμετοχή του στη συνεργασία.

Οι συνεργατικοί τύποι παιγνίων χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου οι φορείς δικτύου ή οι χρήστες συνεργάζονται για να διαχειριστούν αποτελεσματικά τους πόρους. Ένα παράδειγμα είναι η συν-εκμετάλλευση φάσματος στα δίκτυα 5G, όπου οι πάροχοι συνεργάζονται για αποδοτική διαχείριση του φάσματος, με σκοπό τη μείωση της συμφόρησης και την αύξηση της ποιότητας υπηρεσιών για τους χρήστες. Επιπλέον, οι βάσεις σταθμών μπορούν να συνεργαστούν για να ανακατανεύμουν δυναμικά τους χρήστες, λαμβάνοντας υπόψη απόσταση, ποιότητα σήματος και φόρτωση δικτύου, προκειμένου να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση του δικτύου [27].

## **Δυναμικά παιχνίδια**

Τα δυναμικά παιχνίδια είναι αυτά όπου οι παίκτες παίρνουν αποφάσεις που εξελίσσονται με τον χρόνο και επηρεάζουν την εξέλιξη του παιχνιδιού. Σε αυτά τα παιχνίδια, οι παίκτες διαμορφώνουν συνεχώς τη στρατηγική τους με βάση την εξέλιξη των συνθηκών του δικτύου και τις κινήσεις των υπολοίπων συμμετεχόντων. Αυτά τα παιχνίδια είναι κατάλληλα για δίκτυα 5G όπου οι συνθήκες αλλάζουν συνεχώς.

Η διαχείριση της ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα δυναμικού παιχνιδιού, όπου σταθμοί βάσης και χρήστες προσαρμόζουν τη μετάδοση ισχύος και την κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου και τις ανάγκες των χρηστών. Τα δυναμικά παιχνίδια επιτρέπουν την προσαρμοστική βελτιστοποίηση των πόρων σε πραγματικό χρόνο, εξασφαλίζοντας ότι η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται χωρίς να υποστεί ζημιά η απόδοση του δικτύου. Στα δίκτυα 5G, η προσαρμογή είναι κρίσιμη επειδή οι χρήστες και οι σταθμοί βάσης πρέπει να προσαρμόζονται γρήγορα στη ζήτηση για δεδομένα και στις συνθήκες του δικτύου [28].

## **Παιχνίδια Διαπραγμάτευσης**

Τα παιχνίδια διαπραγμάτευσης είναι ένα είδος παιχνιδιού όπου οι παίκτες πρέπει να διαπραγματευτούν για να συμφωνήσουν σχετικά με την κατανομή των πόρων. Σε αυτά τα παιχνίδια, ο στόχος των παικτών είναι να βρουν μια λύση που θα εξυπηρετεί τα ατομικά τους συμφέροντα ενώ θα είναι δίκαιη για όλους. Ένα δημοφιλές παράδειγμα αυτής της κατηγορίας αποτελεί το Nash Bargaining, το οποίο προσφέρει ένα πλαίσιο για τη δίκαιη και αποδοτική κατανομή των πόρων [29].

Στα δίκτυα 5G, τα παιχνίδια διαπραγμάτευσης χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατανομή του bandwidth και του φάσματος μεταξύ των χρηστών και των παρόχων. Μέσω της διαδικασίας της διαπραγμάτευσης, οι παίκτες συμφωνούν σε ένα συμβιβασμό που αντικατοπτρίζει τις ανάγκες και τις απαιτήσεις κάθε πλευράς, εξασφαλίζοντας την αποτελεσματική χρήση των πόρων. Για παράδειγμα, ένας σταθμός βάσης μπορεί να ρυθμίσει την ίση κατανομή του διαθέσιμου bandwidth μεταξύ των χρηστών του δικτύου, βάσει των αναγκών τους και της διαθέσιμης χωρητικότητας [30]. Αυτά τα παιχνίδια εξασφαλίζουν ισότιμη κατανομή πόρων και αποφεύγουν υπερβολική συγκέντρωση σε συγκεκριμένους χρήστες ή σταθμούς.

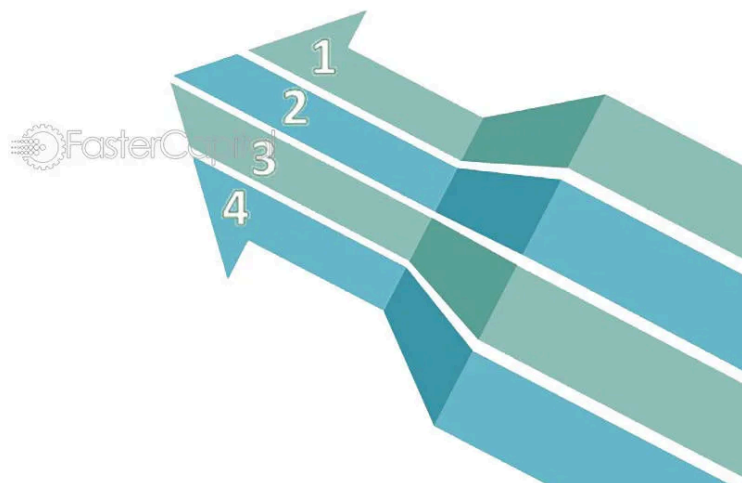
## Στοχαστικά παίγνια

Τα στοχαστικά παιχνίδια ενσωματώνουν την αβεβαιότητα και την τυχαιότητα στην ανάληψη αποφάσεων. Σε αυτά τα παιχνίδια, οι παίκτες λαμβάνουν αποφάσεις με βάση προβλέψεις για το μέλλον του παιχνιδιού, καθώς δεν έχουν πλήρη κατανόηση των ενεργειών των άλλων παικτών ή των επερχόμενων συνθηκών. Είναι ιδανικά για περιβάλλοντα με συνεχείς αλλαγές και όπου η αβεβαιότητα είναι κρίσιμης σημασίας για τις αποφάσεις που λαμβάνονται.

Στα δίκτυα 5G, η χρήση στοχαστικών παιγνίων είναι ιδιαίτερως χρήσιμη για την ανακατανομή πόρων σε περιπτώσεις αβεβαιότητας, όπως η κατανομή φάσματος και η εξοικονόμηση ενέργειας. Οι βάσεις και οι χρήστες πρέπει να καθορίζουν τη χρήση των πόρων χωρίς να έχουν ακριβή πληροφορία για τη μελλοντική ζήτηση ή τις συνθήκες παρεμβολών. Σε ένα παιχνίδι τύχης, οι παίκτες προσαρμόζουν τις στρατηγικές τους, λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανότητες μελλοντικών αποτελεσμάτων, προκειμένου να εξασφαλίσουν βέλτιστη χρήση των πόρων, ακόμη και όταν οι συνθήκες είναι απρόβλεπτες [31].

## Nashs Contributions to Cooperative Game Theory

- ✓ Nash Equilibrium
- ✓ Bargaining Theory
- ✓ Cooperative Games
- ✓ Shapley Value



Εικόνα 3.1 : Nash Contributions to Cooperative Game Theory -  
“<https://fastercapital.com/>”

### 3.3 Προτεινόμενα Είδη Παιχνιδιών

Για να βελτιωθεί η διανομή των πόρων στα δίκτυα 5G, θα χρησιμοποιηθούν συγκεκριμένα είδη παιχνιδιών που αντιμετωπίζουν τις ιδιαιτερότητες και προκλήσεις της διαχείρισης πόρων, όπως η διαχείριση ενέργειας, χρηστών και bandwidth. Τα παιχνίδια που προτείνονται σε αυτήν τη μελέτη είναι συνεργατικά, με το Matching Game να χρησιμοποιείται για την ανάθεση ενέργειας και χρηστών, ενώ τα παιχνίδια διαπραγμάτευσης χρησιμοποιούν το Nash Bargaining για την κατανομή bandwidth στους σταθμούς βάσης.

#### **Συνεργατικά Παιχνίδια και Matching Game για Κατανομή Ενέργειας και Χρηστών**

Τα παιχνίδια συνεργασίας είναι κατάλληλα όταν οι παίκτες μπορούν να συνεργαστούν για να επιτύχουν έναν κοινό στόχο και να μοιραστούν τα οφέλη δίκαια. Σε αυτήν την ανάλυση, προτιμάται η χρήση του παιχνιδιού Matching Game για τον συντονισμό της ενέργειας και των χρηστών σε σταθμούς βάσης. Το παιχνίδι ταιριάσματος είναι ένα συνεργατικό παιχνίδι που προσαρμόζεται τέλεια σε προβλήματα όπου απαιτείται ισορροπία μεταξύ δύο ομάδων παικτών, λαμβάνοντας υπόψη τις προτιμήσεις και τους περιορισμούς τους.

Το παιχνίδι ταιριάσματος στα δίκτυα 5G επιτρέπει τη δυναμική αντιστοίχιση χρηστών με σταθμούς βάσης, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως ποιότητα σήματος, απόσταση και φόρτιση σταθμών βάσης. Οι βάσεις πρέπει να αξιοποιούν αποτελεσματικά τους πόρους τους, ενώ οι χρήστες αναζητούν την ιδανική σύνδεση βάσει των δεδομένων τους και τη θέση τους στο δίκτυο. Το παιχνίδι ταιριάσματος εξασφαλίζει αποτελεσματική αντιστοίχιση μεταξύ σταθμών βάσης και χρηστών για τη μέγιστη ποιότητα υπηρεσιών και ενεργειακή απόδοση.

Ο αλγόριθμος Gale-Shapley είναι ένα παράδειγμα κλασικού Matching Game που εξασφαλίζει μια σταθερή αντιστοίχιση μεταξύ δύο ομάδων παικτών. Στο πλαίσιο των δικτύων 5G, οπότε αυτός ο αλγόριθμος είναι ικανός να βελτιώσει την κατανομή των χρηστών στους σταθμούς βάσης με βάση τις προτιμήσεις και τις δυνατότητες και των δύο πλευρών [32]. Ταυτόχρονα, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος μπορεί να συμβάλει στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, καθώς οι βάσεις θα διαχειρίζονται αποτελεσματικότερα τους πόρους τους, κατανέμοντας τους χρήστες σε τρόπο που εξασφαλίζει την καλύτερη εξυπηρέτησή τους με το ελάχιστο ενεργειακό κόστος.

## **Παιχνίδια Διαπραγμάτευσης και Nash Bargaining για Κατανομή Bandwidth**

Για την διανομή του εύρους ζώνης για τους σταθμούς βάσης, προτείνεται η εφαρμογή παιχνιδιών διαπραγμάτευσης, όπως το Nash Bargaining. Τα παιχνίδια συναίνεσης είναι κατάλληλα για περιπτώσεις όπου οι συμμετέχοντες πρέπει να συμφωνήσουν σε μια κοινή λύση για τη διαίρεση των πόρων, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες και τις δυνατότητες κάθε πλευράς. Το Nash Bargaining είναι ένα κλασικό μοντέλο παιχνιδιού διαπραγμάτευσης που αποσκοπεί στη δίκαιη κατανομή των πόρων και στην αποδοτική χρήση τους.

Στα δίκτυα 5G, η μέθοδος Nash Bargaining χρησιμοποιείται για να μοιράσει το bandwidth ανάμεσα στους χρήστες ενός σταθμού βάσης, προκειμένου να εξασφαλιστεί βέλτιστη και δίκαιη κατανομή. Οι χρήστες αναζητούν την αναγκαία χωρητικότητα του δικτύου μέσω της διαπραγμάτευσης, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές απαιτήσεις τους σε δεδομένα και τις διαφορετικές τους προτιμήσεις. Το Nash Bargaining επιτρέπει στους παίκτες να βρουν μια λύση που βελτιώνει την ικανοποίηση όλων των εμπλεκόμενων, ενώ εξασφαλίζει πως το διαθέσιμο bandwidth κατανέμεται αποδοτικά για το δίκτυο [33].

Η Nash Bargaining επιτρέπει επίσης τη λήψη αποφάσεων που λαμβάνουν υπόψη τις προτεραιότητες των χρηστών και των σταθμών βάσης. Κατά την διαδικασία διαπραγμάτευσης, ο κάθε χρήστης προσαρμόζει τις απαιτήσεις του σύμφωνα με τις δυνατότητες του δικτύου και τις ανάγκες των υπολοίπων χρηστών, εξασφαλίζοντας ότι το συνολικό bandwidth χρησιμοποιείται αποδοτικά και χωρίς περιττές συγκρούσεις. Αυτός ο μηχανισμός επιτρέπει στο δίκτυο να προσαρμόζεται στις αλλαγές στη ζήτηση δεδομένων, μειώνοντας την συμφόρηση και βελτιώνοντας την ποιότητα των υπηρεσιών.

# Κεφάλαιο 4 : Οι έννοιες του Matching Game και του Nash Bargaining

## 4.1 Εισαγωγή στο Matching Game και τον Αλγόριθμο Gale-Shapley

### 1. Θεωρία του Matching Game

Οι αγώνες αντιστοίχισης είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για να λύσει προβλήματα κατανομής πόρων, όπου δύο ομάδες (π.χ., χρήστες και σταθμοί βάσης) πρέπει να ταιριάξουν με τρόπο που να μεγιστοποιεί την ικανοποίησή τους. Σε ένα δίκτυο 5G, η κατανομή των χρηστών στους σταθμούς βάσης παίζει σημαντικό ρόλο για την εξασφάλιση βέλτιστης απόδοσης και ενεργειακής αποδοτικότητας.

Κάθε μέλος των δύο ομάδων έχει προτιμήσεις όσον αφορά τα μέλη της αντίπαλης ομάδας. Ένα παράδειγμα για να εξηγήσουμε είναι:

- Οι χρήστες επιλέγουν σταθμούς βάσης που προσφέρουν καλύτερη ποιότητα σήματος και μικρότερη απόσταση, καθώς αυτό αυξάνει τον ρυθμό μετάδοσής τους και μειώνει την χρονική καθυστέρηση.
- Οι βάσεις σταθμών δίνουν προτεραιότητα σε χρήστες που είναι κοντά τους, καθώς χρειάζονται λιγότερη ενέργεια για εξυπηρέτησή τους και δεν υπερφορτώνονται.
- Το matching game στοχεύει σε μια σταθερή αντιστοίχιση, δηλαδή σε ένα όπου κανένα ζεύγος χρήστη-σταθμού βάσης δεν επιθυμεί να αλλάξει αντιστοίχιση, βελτιώνοντας την απόδοση και την κατανάλωση ενέργειας.

### 2. Ανάλυση του Αλγόριθμου Gale-Shapley

Η μέθοδος Gale-Shapley επιλύει παιχνίδια ταίριασης και εξασφαλίζει μια σταθερή αντιστοίχιση μεταξύ δύο ομάδων (χρηστών και σταθμών βάσης). Η μέθοδος που ακολουθεί ο αλγόριθμος είναι η αναβαλλόμενη αποδοχή, όπου οι χρήστες και οι σταθμοί βάσης ανταλλάσσουν προτάσεις μέχρι να επιτευχθεί μια σταθερή κατάσταση.

Το σύστημα λειτουργεί με τον ακόλουθο τρόπο:

- 1) Συστάσεις από χρήστες: Κάθε χρήστης προτείνει να συνδεθεί με τον σταθμό βάσης που προτιμά περισσότερο, λαμβάνοντας υπόψη το SINR και την απόσταση.
- 2) Προσωρινή υποδοχή από σταθμούς βάσης: Κάθε σταθμός βάσης προσωρινά δέχεται τους χρήστες μέχρι να εξεταστούν όλοι οι χρήστες που προτιμούν. Αντικείμενο απόρριψης οι λιγότερο επιθυμητοί χρήστες.
- 3) Επανειλημμένες προτάσεις: Οι χρήστες που απορρίπτονται προτείνουν στον επόμενο σταθμό βάσης στη λίστα προτιμήσεών τους, και η διαδικασία συνεχίζεται.
- 4) Τέλος: Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν δεν υπάρχει κάποιος χρήστης που απορρίπτεται από τον επιλεγμένο σταθμό βάσης του.

Ο αλγόριθμος Gale-Shapley εξασφαλίζει τη σταθερότητα του συστήματος διασφαλίζοντας ότι κανένας χρήστης και σταθμός βάσης δεν έχουν κίνητρο να αλλάξουν την τρέχουσα αντιστοίχισή τους. Σε δίκτυα 5G, η ακριβής αντιστοίχιση είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της ροής χρηστών, τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την παροχή ποιοτικών υπηρεσιών.

### **3. Τεχνολογία DUDe (Downlink-Uplink Decoupling)**

Στα παραδοσιακά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι χρήστες συνδέονται στον ίδιο σταθμό βάσης τόσο για τη μετάδοση προς τον δέκτη όσο και για τη λήψη δεδομένων. Με την τεχνολογία DUDe, η σύνδεση uplink και downlink μπορεί να απελευθερωθεί, επιτρέποντας την ανάθεσή τους σε διαφορετικούς σταθμούς βάσης.

Αυτό έχει σημασία επειδή:

- Τα small cells συχνά παρέχουν ισχυρότερο uplink σήμα λόγω της μικρής απόστασης από τον χρήστη, γεγονός που μειώνει την κατανάλωση ενέργειας των χρηστών.
- Τα macro cells, με την ευρύτερη κάλυψη τους, είναι συχνά καταλληλότερες για το downlink, καθώς μπορούν να προσφέρουν ισχυρότερα σήματα σε μεγαλύτερες αποστάσεις και να εξυπηρετούν περισσότερους χρήστες.

Με τη χρήση της τεχνολογίας DUDe, τα δίκτυα μπορούν να επιλέξουν ξεχωριστά τον καλύτερο σταθμό βάσης για τη μετάδοση και τη λήψη δεδομένων από κάθε χρήστη, με αποτέλεσμα:

- Πιο αποτελεσματικός καταμερισμός πόρων: Οι χρήστες μπορούν να συνδεθούν σε μικρότερες, αποδοτικές ενεργειακά small cells για το uplink, και σε ισχυρότερες macro cells για το downlink.
- Μείωση κατανάλωσης ενέργειας: Οι χρήστες που συνδέονται με μικρές κυψέλες για τη μετάδοση προς τη βάση εξοικονομούν ενέργεια, ενώ οι μεγάλες κυψέλες ρυθμίζουν καλύτερα τη μετάδοση μεγάλων όγκων δεδομένων προς τους χρήστες.
- Βελτίωση της ποιότητας εξυπηρέτησης (QoS): Κάθε χρήστης μπορεί να απολαμβάνει το καλύτερο δυνατό σήμα για uplink και downlink, ενισχύοντας συνολικά την εμπειρία του.

Η εφαρμογή της τεχνολογίας DUDe σε ένωση με τα matching games και τον αλγόριθμο Gale-Shapley είναι ουσιώδης για την καλύτερη κατανομή των χρηστών σε βάσεις στα δίκτυα 5G.

#### **4. Εφαρμογή του Αλγόριθμου Gale-Shapley σε Δίκτυα DUDe**

Η διανομή των χρηστών σε σταθμούς βάσης σε ένα δίκτυο που χρησιμοποιεί την τεχνολογία DUDe, γίνεται πιο περίπλοκη λόγω της ανάγκης σύνδεσης κάθε χρήστη.

- Σε έναν σταθμό για το uplink (συνήθως σε ένα κοντινό small cell για καλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας).
- Σε έναν σταθμό για το downlink (συνήθως σε ένα macro cell για μεγαλύτερη χωρητικότητα και καλύτερη απόδοση δεδομένων).

Ο αλγόριθμος Gale-Shapley μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να επιλύει αυτό το πρόβλημα της διπλής αντιστοίχισης, όπου οι χρήστες κάνουν δύο προτάσεις: μία για uplink και μία για downlink.

Προτιμήσεις των Χρηστών:

- Για το uplink: Οι χρήστες επιλέγουν να συνδεθούν στο πλησιέστερο small cell για εξοικονόμηση ενέργειας και βελτίωση απόδοσης.
- Για το downlink : Οι χρήστες επιλέγουν να συνδεθούν με το macro cell που παρέχει καλύτερο σήμα και μεγαλύτερη δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων

Ο αλγόριθμος Gale-Shapley τροποποιείται για να λαμβάνει υπόψη τις ξεχωριστές προτιμήσεις για uplink και downlink, ώστε να εξασφαλιστεί η μέγιστη χρησιμότητα κάθε χρήστη με την αντιστοίχισή του σε σταθμούς και να διασφαλιστεί η σταθερότητα του συστήματος.



## 5. Πλεονεκτήματα της Χρήσης του Gale-Shapley σε Δίκτυα DUDe

Με την εφαρμογή του παραπάνω μηχανισμού στο δίκτυο μπορούμε να επιτύχουμε τα παρακάτω :

- 1) Σταθερότητα: Ο αλγόριθμος εξασφαλίζει ότι ο βέλτιστος σταθμός βάσης αντιστοιχίζεται σταθερά με το uplink και το downlink κάθε χρήστη, αποφεύγοντας την περιττή κατανάλωση ενέργειας.
- 2) Αποδοτική Χρήση Πόρων: Η τεχνολογία DUDe διαχωρίζει τις συνδέσεις uplink και downlink προκειμένου να εξασφαλίσει την αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων ανά χρήστη.
- 3) Η ενεργειακή αποδοτικότητα μειώνει την κατανάλωση ενέργειας συνδέοντας τους χρήστες με small cells για το uplink, ιδιαίτερα όταν βρίσκονται κοντά σε μικρούς σταθμούς βάσης.
- 4) Καλύτερη Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS): Οι χρήστες μπορούν να απολαμβάνουν αυξημένο throughput στο downlink μέσω των macro cells, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας στο uplink.

## 4.2 Ανάλυση Προβλήματος Κατανομής Ενέργειας και Χρηστών

### 4.2.1 Το Πρόβλημα της Κατανομής Χρηστών σε Σταθμούς Βάσης

Σε ένα ετερογενές δίκτυο κινητής τηλεφωνίας (HetNet) που βασίζεται στην αρχιτεκτονική 5G, οι χρήστες πρέπει να συνδεθούν με τους διαθέσιμους σταθμούς βάσης που περιλαμβάνουν macro cells και small cells (femto, pico, micro cells). Το πρόβλημα της κατανομής των χρηστών αφορά τον τρόπο με τον οποίο οι χρήστες επιλέγουν τον κατάλληλο σταθμό βάσης και το πώς οι σταθμοί βάσης αποδέχονται ή απορρίπτουν τους χρήστες. Στόχος είναι να βελτιστοποιηθεί η ποιότητα των υπηρεσιών που λαμβάνει ο κάθε χρήστης και ταυτόχρονα να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας τόσο στους σταθμούς βάσης όσο και στις συσκευές των χρηστών.

Η κατανομή των χρηστών στους σταθμούς βάσης είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης δύο επιπέδων.

- 1) Εξυπηρέτηση του χρήστη: Οι χρήστες αναζητούν σταθμούς βάσης που παρέχουν υψηλή ποιότητα υπηρεσίας (QoS), η οποία επηρεάζεται από την ισχύ σήματος (SINR), το bandwidth και την καθυστέρηση.

- 2) Βέλτιστη διαχείριση πόρων και ενέργειας από τον σταθμό βάσης: Οι σταθμοί βάσης επιθυμούν να μεγιστοποιήσουν τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούν, αλλά παράλληλα να ελαχιστοποιήσουν την ενεργειακή τους κατανάλωση.

#### 4.2.2 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Κατανομή Χρηστών

Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την κατανομή των χρηστών στους σταθμούς βάσης, συμπεριλαμβανομένων τόσο τεχνικών παραμέτρων όσο και περιορισμών στην ενέργεια.

Ισχύς Σήματος (SINR):

- Το Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR) είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζει την επιλογή σταθμού βάσης από τους χρήστες. Το SINR καθορίζει την ποιότητα του σήματος που λαμβάνει ο χρήστης και εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής του σταθμού βάσης, την απόσταση του χρήστη από τον σταθμό βάσης, και τις παρεμβολές από άλλους χρήστες ή σταθμούς.
- Οι χρήστες προτιμούν να συνδέονται σε σταθμούς βάσης με υψηλό SINR, καθώς αυτό αυξάνει το throughput και μειώνει τα σφάλματα στη μετάδοση των δεδομένων.

Απόσταση από τον Σταθμό Βάσης:

- Όσο πιο κοντά είναι ένας χρήστης στον σταθμό βάσης, τόσο ισχυρότερο σήμα λαμβάνει. Η απόσταση επηρεάζει απευθείας την απαιτούμενη ισχύ σήματος για σταθερή σύνδεση, καθώς οι χρήστες που βρίσκονται μακριά από έναν σταθμό βάσης χρειάζονται μεγαλύτερη ισχύ εκπομπής τόσο από τη συσκευή τους όσο και από τον σταθμό βάσης.
- Τα macro cells έχουν τη δυνατότητα να εξυπηρετούν μεγαλύτερες αποστάσεις, ενώ αυτό συνεπάγεται υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας για τους χρήστες που βρίσκονται στην άκρη της κάλυψης.

Χωρητικότητα Σταθμού Βάσης:

- Η χωρητικότητα των χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα κάθε σταθμός βάσης είναι περιορισμένη. Η κατανομή των χρηστών πρέπει να

λαμβάνει υπόψη τη χωρητικότητα, καθώς η υπερφόρτωση ενός σταθμού βάσης μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη ποιότητα υπηρεσίας, υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας και επιβάρυνση του δικτύου.

- Τα small cells, λόγω της περιορισμένης χωρητικότητάς τους, μπορούν να εξυπηρετούν μικρό αριθμό χρηστών με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ενώ τα macro cells μπορούν να εξυπηρετήσουν περισσότερους χρήστες, αλλά με υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση.

#### Κατανάλωση Ενέργειας:

- Η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί έναν σημαντικό περιορισμό για την επιλογή σταθμού βάσης τόσο από την πλευρά των χρηστών όσο και των παρόχων. Οι macro cells έχουν υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας, ειδικά όταν εξυπηρετούν μεγάλους αριθμούς χρηστών σε απομακρυσμένες περιοχές. Από την άλλη, οι small cells καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια και είναι ιδανικές για την εξυπηρέτηση χρηστών σε πυκνές περιοχές κοντά τους.
- Η διαχείριση ενέργειας στους σταθμούς βάσης μπορεί να προσαρμοστεί δυναμικά ανάλογα με τη ζήτηση και τη θέση των χρηστών, ώστε να εξοικονομηθεί ενέργεια, ενώ παράλληλα διατηρείται η ποιότητα υπηρεσιών.

### 4.2.3 Ανάλυση της Ενεργειακής Κατανάλωσης των Σταθμών Βάσης

Η κατανάλωση ενέργειας των σταθμών βάσης εξαρτάται από:

- Την ισχύ εκπομπής: Οι σταθμοί βάσης πρέπει να μεταδίδουν με επαρκή ισχύ ώστε να διασφαλίζουν αξιόπιστες συνδέσεις με τους χρήστες. Για παράδειγμα, οι macro cells χρησιμοποιούν ισχύ εκπομπής έως και 46 dBm, ενώ οι small cells περιορίζονται σε περίπου 20-30 dBm.
- Τον αριθμό των συνδεδεμένων χρηστών: Όσο περισσότερους χρήστες εξυπηρετεί ένας σταθμός βάσης, τόσο μεγαλύτερη ενέργεια καταναλώνει, καθώς πρέπει να διατηρεί συνεχείς συνδέσεις και να διαχειρίζεται τη μετάδοση δεδομένων.
- Την τοπολογία του δικτύου: Η διάταξη των σταθμών βάσης, καθώς και η θέση των χρηστών επηρεάζουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας, καθώς η ανάγκη για αυξημένη ισχύ εκπομπής για την κάλυψη μεγάλων αποστάσεων αυξάνει σημαντικά την κατανάλωση.

Σύμφωνα με μελέτες, η κατανάλωση ενέργειας των σταθμών βάσης κατανέμεται σε δύο κύριες κατηγορίες:

1. Σταθερή κατανάλωση ενέργειας (overhead power): Αυτή η ενέργεια είναι η βασική κατανάλωση που απαιτείται για τη λειτουργία του σταθμού βάσης, ανεξάρτητα από τον αριθμό των συνδεδεμένων χρηστών. Σε macro cells, η σταθερή κατανάλωση είναι υψηλή, κάτι που καθιστά την ενεργειακή απόδοση μια πρόκληση, ιδιαίτερα σε περιόδους χαμηλής ζήτησης.
2. Δυναμική κατανάλωση ενέργειας: Αυτή εξαρτάται από τον αριθμό των χρηστών και την ποσότητα δεδομένων που διακινούνται. Σε δίκτυα 5G, όπου η ζήτηση για δεδομένα αυξάνεται δραματικά, αυτή η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να κυμανθεί έντονα.

#### 4.2.4 Ενεργειακές Ανάγκες των Χρηστών

Οι χρήστες των δικτύων 5G έχουν επίσης ενεργειακές απαιτήσεις, ιδιαίτερα για το uplink, καθώς πρέπει να μεταδίδουν δεδομένα προς τους σταθμούς βάσης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή κατανάλωση των χρηστών περιλαμβάνουν:

- Απόσταση από τον σταθμό βάσης: Οι χρήστες που βρίσκονται πιο κοντά σε έναν σταθμό βάσης χρειάζονται μικρότερη ισχύ για τη μετάδοση δεδομένων, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας.
- Χρήση small cells: Όταν οι χρήστες συνδέονται σε small cells, οι οποίες βρίσκονται πιο κοντά τους, απαιτείται χαμηλότερη ισχύς εκπομπής, γεγονός που μειώνει την κατανάλωση ενέργειας.
- Μεταβλητές ανάγκες σε δεδομένα: Όσο περισσότερα δεδομένα πρέπει να μεταδώσει ο χρήστης, τόσο μεγαλύτερη ενέργεια απαιτείται για να διατηρηθεί η σύνδεση σταθερή και αξιόπιστη.

### 4.3 Εισαγωγή στο Nash Bargaining

#### 1. Θεωρία του Nash Bargaining

Η τεχνική του Nash Bargaining είναι σημαντική στην θεωρία παιγνίων και πρωτοστάθηκε από τον John Nash το 1950. Πρόκειται για μια συνεργατική διαδικασία, όπου δύο ή περισσότεροι "συμμετέχοντες" διαπραγματεύονται για να επιτύχουν μια βέλτιστη και αμοιβαία επωφελή κατανομή πόρων ή ωφελειών. Στόχος είναι να επιτευχθεί μία δίκαιη κατανομή που θα αυξήσει το συνολικό κέρδος των παικτών,

διασφαλίζοντας ότι κανένας παίκτης δεν μπορεί να βελτιώσει τη θέση του χωρίς να επιδεινώσει τη θέση των υπολοίπων.

Η θεωρία του Nash Bargaining έχει εφαρμοστεί σε πολλούς τομείς, όπως οικονομία, τηλεπικοινωνίες και δίκτυα δεδομένων, για την κατανομή πόρων. Σε αυτό το πλαίσιο, στοχεύει στην ισότιμη κατανομή των διαθέσιμων πόρων (π.χ., bandwidth) βάσει των αναγκών, προτιμήσεων και περιορισμών κάθε χρήστη. Ο Nash ανέδειξε πως υπάρχει ένα συγκεκριμένο σημείο ισορροπίας στις διαπραγματεύσεις, γνωστό ως Nash Bargaining Solution, το οποίο εξυπηρετεί ιδανικά όλα τα μέρη που εμπλέκονται.

Στα δίκτυα 5G, όπου ο περιορισμένος πόρος είναι το bandwidth, οι χρήστες και οι σταθμοί βάσης μπορούν να θεωρηθούν ως παίκτες που διαπραγματεύονται το bandwidth, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες τους και τις συνθήκες του δικτύου. Κάθε χρήστης επιδιώκει να αυξήσει την ταχύτητα μετάδοσης και την ποιότητα υπηρεσιών του (QoS), ενώ οι σταθμοί βάσης προσπαθούν να διαχειριστούν αποτελεσματικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης προκειμένου να εξυπηρετήσουν όσο το δυνατόν περισσότερους χρήστες.

## 2. Ανάλυση του Nash Bargaining Solution

Η λύση διαπραγμάτευσης Nash Bargaining Solution (NBS) πληροί τις απαιτήσεις της δικαιοσύνης και της βέλτιστης κατανομής. Το βασικό μοντέλο υποθέτει ότι οι χρήστες και οι σταθμοί βάσης επιθυμούν να βρουν έναν τρόπο κατανομής του bandwidth που μεγιστοποιεί το συνολικό κέρδος, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες όλων των χρηστών.

Η λύση Nash επιτυγχάνεται μέσω της μεγιστοποίησης του γινομένου των διαφορών μεταξύ της ωφέλειας που λαμβάνει κάθε χρήστης και του σημείου διαφωνίας, δηλαδή του επιπέδου ωφέλειας που θα είχε ο χρήστης σε περίπτωση αποτυχίας της διαπραγμάτευσης.

Η λύση αυτή εξασφαλίζει ότι η κατανομή των πόρων είναι:

-> **Αποδοτική:** Μεγιστοποιεί το συνολικό throughput για όλους τους χρήστες, ενώ παράλληλα λαμβάνει υπόψη τις προτιμήσεις και τους περιορισμούς τους.

-> **Δίκαιη:** Κανένας χρήστης δεν λαμβάνει δυσανάλογα μεγάλο μερίδιο του bandwidth εις βάρος άλλων χρηστών, ενώ το συνολικό δίκτυο λειτουργεί αποδοτικά .

### 3. Πλεονεκτήματα της Χρήσης του Nash Bargaining

Η εφαρμογή της μεθόδου Nash Bargaining στην κατανομή του bandwidth στα δίκτυα 5G παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους.

-> **Δίκαιη Κατανομή Πόρων:** Ο Nash Bargaining δίνει ίσα μερίδια bandwidth σε χρήστες, βασιζόμενο στις ανάγκες τους και το SINR που λαμβάνουν. Κάθε ατομική συμμετοχή στη διαπραγμάτευση αντιστοιχεί σε ένα δίκαιο και αποδοτικό μερίδιο.

-> **Ενεργειακή Αποδοτικότητα:** Το Nash Bargaining λαμβάνει υπόψη την ενεργειακή κατανάλωση των χρηστών κατά την κατανομή του bandwidth, εξασφαλίζοντας ότι οι χρήστες που καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια μπορούν να επωφεληθούν περισσότερο από το δίκτυο .

-> **Βελτίωση της Ποιότητας Υπηρεσιών (QoS):** Η διαδικασία διαπραγμάτευσης βοηθά στη βελτίωση του QoS, καθώς οι χρήστες με υψηλότερες ανάγκες δεδομένων και καλύτερο SINR λαμβάνουν μεγαλύτερο μερίδιο του bandwidth, εξασφαλίζοντας καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας .

-> **Αποφυγή Υπερφόρτωσης:** Με τη λειτουργία του Nash Bargaining, οι βάσεις δεδομένων δεν υπερ φορτώνονται με χρήστες, καθώς το σύστημα εξασφαλίζει ισότιμη κατανομή bandwidth σε κάθε χρήστη, χωρίς να υπερφορτώνεται το δίκτυο.

### 4. Εφαρμογή του Nash Bargaining στα Δίκτυα 5G

Στα δίκτυα 5G, η εφαρμογή του Nash Bargaining μπορεί να βοηθήσει στη βέλτιστη κατανομή του bandwidth μεταξύ των χρηστών και των σταθμών βάσης. Οι χρήστες διαπραγματεύονται με τους σταθμούς βάσης για την κατανομή του bandwidth, λαμβάνοντας υπόψη το throughput και την ενεργειακή κατανάλωση.

Η διαδικασία περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

1. **Αρχική Κατανομή Bandwidth:** Οι χρήστες λαμβάνουν ένα αρχικό μερίδιο bandwidth, βασισμένο σε εκτιμήσεις για το SINR και τις απαιτήσεις τους σε δεδομένα.
2. **Υπολογισμός Utility:** Κάθε χρήστης υπολογίζει την ωφέλεια (utility) που λαμβάνει με βάση το bandwidth που του αποδόθηκε και την κατανάλωση ενέργειας.
3. **Διαπραγμάτευση για Καλύτερο Μερίδιο:** Οι χρήστες διαπραγματεύονται με τους σταθμούς βάσης για μεγαλύτερο μερίδιο bandwidth, μέχρι να επιτευχθεί μια συμφωνία που ικανοποιεί όλους τους εμπλεκόμενους .
4. **Ισορροπία Nash:** Η διαδικασία διαπραγμάτευσης συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί μια κατάσταση ισορροπίας Nash, όπου κανένας χρήστης δεν μπορεί να βελτιώσει το utility του χωρίς να βλάψει τους υπόλοιπους .

Η εφαρμογή του Nash Bargaining επιτρέπει τη δίκαιη κατανομή του bandwidth, βελτιώνοντας την απόδοση του δικτύου και εξασφαλίζοντας ενεργειακή αποδοτικότητα.

## 4.4 Ανάλυση Προβλήματος Κατανομής Bandwidth

### 4.4.1 Το Πρόβλημα της Κατανομής Bandwidth σε Δίκτυα 5G

Σε ένα δίκτυο 5G, η κατανομή του διαθέσιμου bandwidth μεταξύ των χρηστών και των σταθμών βάσης αποτελεί ένα βασικό ζήτημα. Το bandwidth είναι ένας περιορισμένος πόρος, ο οποίος πρέπει να κατανεμηθεί αποτελεσματικά, ώστε να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή ποιότητα υπηρεσιών (QoS) για τους χρήστες και η βέλτιστη απόδοση για το δίκτυο. Η κατανομή του bandwidth επηρεάζει άμεσα το throughput που λαμβάνει κάθε χρήστης, καθώς και την καθυστέρηση και το packet loss, καθιστώντας το ένα κρίσιμο ζήτημα στα δίκτυα επόμενης γενιάς.

Η κατανομή του bandwidth στα δίκτυα 5G είναι ιδιαίτερα σύνθετη λόγω της ύπαρξης διαφορετικών τύπων σταθμών βάσης, όπως macro cells και small cells (femto, pico, micro cells), που διαφέρουν σε χωρητικότητα και κάλυψη. Η πρόκληση έγκειται στη βέλτιστη διαχείριση του bandwidth ανάμεσα στους χρήστες, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές ανάγκες και δυνατότητες των χρηστών, τις τεχνικές παραμέτρους του δικτύου, και την ενεργειακή απόδοση.

Το πρόβλημα της κατανομής bandwidth στα δίκτυα 5G αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών παραγόντων:

1. **Απόδοση χρήστη:** Οι χρήστες επιδιώκουν να λάβουν όσο το δυνατόν περισσότερο bandwidth, το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερο throughput και βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσιών.
2. **Αποδοτική διαχείριση πόρων από τον σταθμό βάσης:** Οι σταθμοί βάσης επιδιώκουν να κατανεμηθεί το bandwidth μεταξύ των χρηστών με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιηθεί η συνολική απόδοση του δικτύου, ενώ παράλληλα διατηρούνται τα ενεργειακά όρια.

#### 4.4.2 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Κατανομή Bandwidth

Η κατανομή του bandwidth επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, τόσο από την πλευρά των χρηστών όσο και από την πλευρά των σταθμών βάσης. Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν τη διαδικασία κατανομής bandwidth περιλαμβάνουν:

- **Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR):** Το SINR είναι ουσιώδης για τον υπολογισμό του εύρους ζώνης που μπορεί να διατεθεί ανά χρήστη. Η ποιότητα του σήματος που λαμβάνει ένας χρήστης καθορίζεται από το SINR και εξαρτάται από την ισχύ του, την απόσταση από τον βάσης σταθμό, και τις παρεμβολές από άλλες συσκευές. Οι χρήστες που έχουν υψηλό SINR μπορούν να υποστηρίξουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, βελτιώνοντας την απόδοση και μειώνοντας την καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων.
- **Απόσταση από τον Σταθμό Βάσης:** Όσο πλησιάζει ένας χρήστης τον σταθμό βάσης, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα να λάβει καλύτερο σήμα και να εξασφαλίσει υψηλότερο throughput. Οι χρήστες που απέχουν μακριά από τους σταθμούς βάσης αντιμετωπίζουν χαμηλό SINR, μειώνοντας την αποδοτική χρήση του bandwidth και αυξάνοντας την κατανάλωση ενέργειας.
- **Χωρητικότητα Σταθμού Βάσης:** Κάθε βάση σταθμού έχει περιορισμένο συνολικό εύρος ζώνης που μοιράζεται στους χρήστες. Η κατανομή του bandwidth πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη χωρητικότητα του σταθμού βάσης, προκειμένου να αποφευχθεί η υπερφόρτωση, η οποία θα οδηγούσε σε μειωμένη ποιότητα υπηρεσιών (QoS) και αύξηση της καθυστέρησης.
- **Απαιτήσεις Δεδομένων των Χρηστών:** Η ζήτηση για δεδομένα μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την εφαρμογή που χρησιμοποιεί ο κάθε χρήστης. Οι χρήστες που χρησιμοποιούν εφαρμογές υψηλής ζήτησης δεδομένων, όπως streaming ή τηλεδιασκέψεις, απαιτούν μεγαλύτερο bandwidth για να διατηρήσουν μια καλή ποιότητα υπηρεσιών. Η κατανομή του bandwidth πρέπει να λαμβάνει υπόψη αυτές τις διαφορετικές απαιτήσεις για να διατηρήσει την εμπειρία χρήστη.
- **Κατανάλωση Ενέργειας:** Η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα στην κατανομή του bandwidth. Σταθμοί βάσης που εξυπηρετούν



πολλούς χρήστες σε μεγάλες αποστάσεις καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια. Η βελτιστοποίηση της κατανομής bandwidth μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, βελτιώνοντας ταυτόχρονα την ενεργειακή αποδοτικότητα του δικτύου .

#### 4.4.3 Προβλήματα Υπερφόρτωσης και Υποκατανομής Bandwidth

Η υπερφόρτωση σταθμών βάσης και η υποκατανομή αποτελούν σημαντικό ζήτημα στη διαχείριση του bandwidth. Η υπερφόρτωση συμβαίνει όταν πολλοί χρήστες συνδέονται σε έναν σταθμό βάσης με περιορισμένο εύρος ζώνης, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ποιότητα της υπηρεσίας. Η υποχρήση συμβαίνει όταν οι διαθέσιμοι πόροι ενός σταθμού βάσης δεν εκμεταλλεύονται πλήρως, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη απόδοση του δικτύου.

Για να αποφευχθούν τα προβλήματα αυτά, οι μηχανισμοί δυναμικής κατανομής bandwidth που χρησιμοποιεί το δίκτυο 5G ανακατανέμουν το bandwidth ανάλογα με τη ζήτηση σε πραγματικό χρόνο. Η δυναμική κατανομή εξασφαλίζει ότι οι πόροι διανέμονται εκεί που είναι πιο απαραίτητοι, ενώ παράλληλα αυξάνει τη συνολική απόδοση του δικτύου και μειώνει τις καθυστερήσεις.

#### 4.4.4 Ανάλυση Διαδικασίας Κατανομής Bandwidth

Η κατανομή του bandwidth στα δίκτυα 5G ακολουθεί μια διαδικασία που συνδυάζει την ανάλυση των αναγκών των χρηστών και των δυνατοτήτων του δικτύου:

1. **Αρχική Ανάλυση της Κατάστασης του Δικτύου:** Το δίκτυο αξιολογεί την κατάσταση του bandwidth σε κάθε σταθμό βάσης και τη ζήτηση από τους χρήστες που είναι συνδεδεμένοι.
2. **Προτεραιότητα Χρηστών:** Οι χρήστες με υψηλότερες απαιτήσεις και καλύτερο SINR λαμβάνουν προτεραιότητα στην κατανομή του bandwidth.
3. **Δυναμική Προσαρμογή:** Καθώς οι συνθήκες του δικτύου μεταβάλλονται, η κατανομή του bandwidth προσαρμόζεται ώστε να εξασφαλίζεται η αποδοτική χρήση των πόρων. Οι σταθμοί βάσης ανακατανέμουν το bandwidth ανάλογα με την τρέχουσα ζήτηση και την ποιότητα των συνδέσεων των χρηστών .

4. **Βελτιστοποίηση της Απόδοσης:** Μέσω της συνεχούς προσαρμογής, το δίκτυο επιτυγχάνει τη βέλτιστη απόδοση, βελτιώνοντας το throughput των χρηστών και διατηρώντας την ποιότητα υπηρεσιών σε υψηλό επίπεδο.

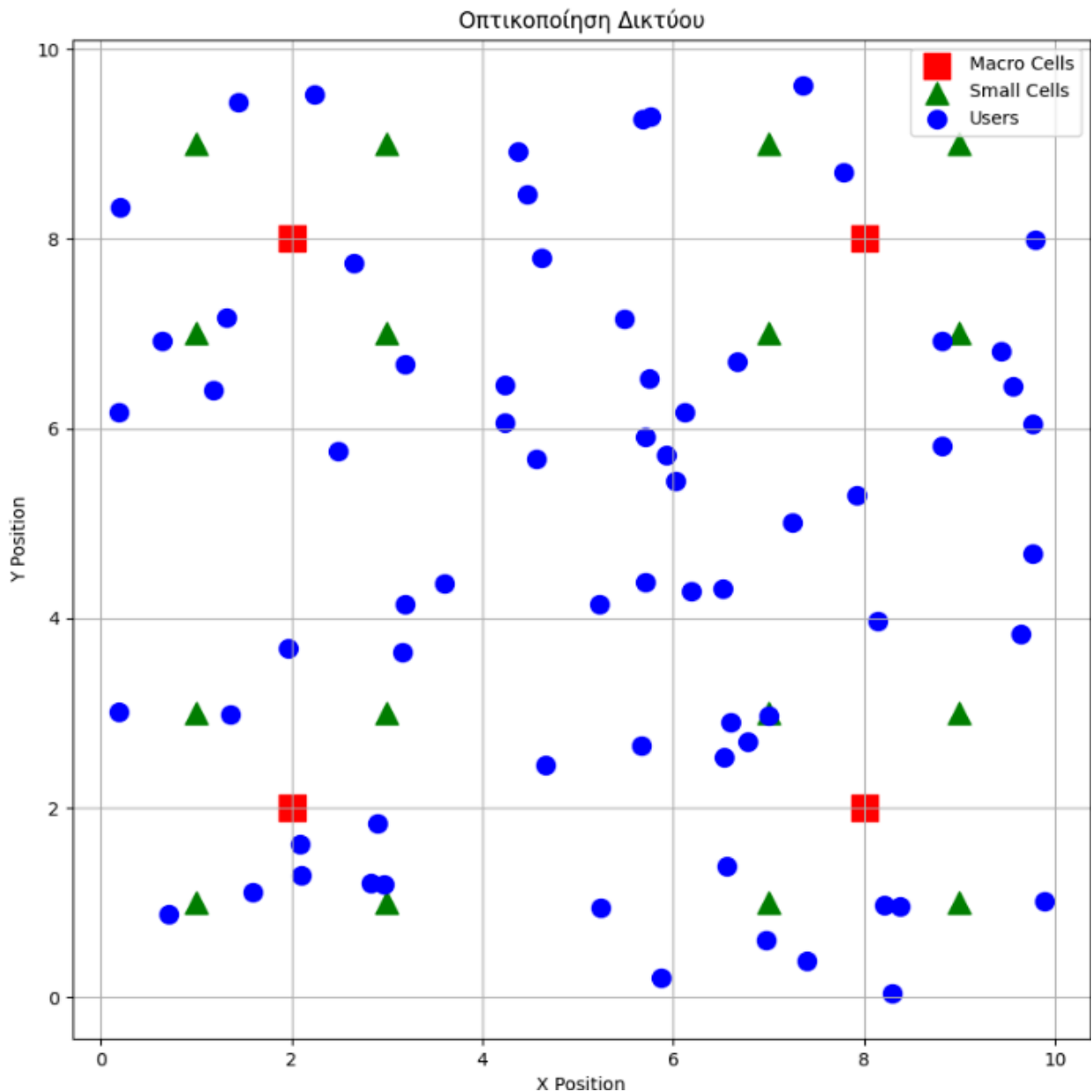
Η κατανομή του bandwidth είναι ένα πρόβλημα που απαιτεί συνεχή παρακολούθηση και βελτιστοποίηση, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή απόδοση του δικτύου και η διασφάλιση της εμπειρίας των χρηστών.

# Κεφάλαιο 5 : Περιβάλλον δικτύου και Χαρακτηριστικά Προσομοίωσης

## 5.1 Τοπολογία του Δικτύου

Η τοπολογία του δικτύου είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει άμεσα την απόδοση και την ενεργειακή κατανάλωση. Το περιβάλλον που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση καλύπτει μια περιοχή μεγέθους 100 τετραγωνικών χιλιομέτρων , που αναπαριστά έναν αστικό χώρο με σταθμούς βάσης macro και small cells τοποθετημένους σε σταθερές θέσεις.

- **Macro Cells:** Το δίκτυο περιλαμβάνει 4 σταθερά τοποθετημένα macro cells, τα οποία έχουν μεγαλύτερη ισχύ εκπομπής και καλύπτουν μεγαλύτερη γεωγραφική περιοχή. Οι θέσεις των macro cells είναι καθορισμένες σε καίρια σημεία για να προσφέρουν κάλυψη σε όλη την περιοχή του δικτύου. Οι θέσεις τους είναι στις συντεταγμένες  $[2,2][2, 2][2,2]$ ,  $[2,8][2, 8][2,8]$ ,  $[8,2][8, 2][8,2]$ , και  $[8,8][8, 8][8,8]$ .
- **Small Cells:** Στο δίκτυο υπάρχουν 16 small cells, τοποθετημένα σε σταθερά σημεία με πιο πυκνή διανομή σε σχέση με τα macro cells. Αυτοί οι σταθμοί έχουν μικρότερη ισχύ εκπομπής και καλύπτουν περιορισμένες περιοχές, εξυπηρετώντας χρήστες σε μικρές αποστάσεις από τον σταθμό. Οι θέσεις τους είναι προσεκτικά επιλεγμένες για να εξυπηρετούν χρήστες σε πυκνές αστικές περιοχές.



Οι χρήστες του δικτύου τοποθετήθηκαν τυχαία στην περιοχή χρησιμοποιώντας μια ομοιόμορφη κατανομή, ώστε να διασφαλιστεί η ρεαλιστική προσομοίωση του ασύρματου περιβάλλοντος και της κίνησης των χρηστών.

## 5.2 Τύποι και Χαρακτηριστικά Σταθμών Βάσης

Το δίκτυο αποτελείται από δύο τύπους σταθμών βάσης: macro cells και small cells. Οι σταθμοί αυτοί διαφέρουν στις τεχνικές προδιαγραφές τους και διαδραματίζουν διαφορετικό ρόλο στην εξυπηρέτηση των χρηστών.

- **Macro Cells:** Τα macro cells προσφέρουν μεγαλύτερη κάλυψη και υποστηρίζουν περισσότερους χρήστες, με ισχύ εκπομπής 40 dBm. Η μεγάλη

γεωγραφική κάλυψη των macro cells επιτρέπει τη σύνδεση πολλών χρηστών ταυτόχρονα, προσφέροντας χωρητικότητα 20 χρηστών ανά σταθμό. Ωστόσο, αυτό συνοδεύεται από υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

- **Small Cells:** Τα small cells λειτουργούν με ισχύ εκπομπής 30 dBm και προσφέρουν κάλυψη σε μικρότερες περιοχές, εξυπηρετώντας λιγότερους χρήστες με χωρητικότητα 5 χρηστών ανά σταθμό. Αν και τα small cells έχουν χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση, μπορούν να εξυπηρετήσουν μόνο χρήστες που βρίσκονται κοντά στον σταθμό, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για την εξυπηρέτηση χρηστών σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές.

### 5.3 Υπολογισμός και Διαχείριση Ενέργειας

Η κατανάλωση ενέργειας σε ένα ασύρματο δίκτυο είναι κρίσιμη για την απόδοση του συστήματος, καθώς επηρεάζει τόσο τους σταθμούς βάσης όσο και τις συσκευές των χρηστών.

**Overhead Power:** Κάθε σταθμός βάσης έχει ένα σταθερό ενεργειακό κόστος που απαιτείται για τη λειτουργία του ανεξάρτητα από τον αριθμό των συνδεδεμένων χρηστών. Για τα macro cells, το κόστος αυτό είναι 5 dBm, ενώ για τα small cells είναι 2 dBm. Το overhead power αποτελεί ένα βασικό στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου.

**Δυναμική Κατανάλωση Ενέργειας:** Η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των συνδεδεμένων χρηστών και ο όγκος των δεδομένων που διακινούνται μέσω του σταθμού. Κάθε σταθμός πρέπει να προσαρμόζει την ισχύ εκπομπής ανάλογα με τη θέση των χρηστών και την ανάγκη τους για δεδομένα, διασφαλίζοντας ότι η ενεργειακή αποδοτικότητα παραμένει υψηλή.

Η ενεργειακή κατανάλωση των σταθμών βάσης υπολογίζεται με βάση την ισχύ εκπομπής και το overhead power, και ο αλγόριθμος κατανοεί τους χρήστες με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου.

### 5.4 Κατανομή Bandwidth

Η κατανομή του bandwidth είναι μία από τις κρίσιμες παραμέτρους για την εξυπηρέτηση των χρηστών και την απόδοση των σταθμών βάσης σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 5G. Στην προτεινόμενη υλοποίηση, το δίκτυο αποτελείται από macro cells και small cells, τα οποία εξυπηρετούν διαφορετικές κατηγορίες χρηστών με διαφορετικές ανάγκες σε bandwidth. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε τα

βασικά χαρακτηριστικά της κατανομής του bandwidth και τις απαιτήσεις των χρηστών, καθώς και τη διαθεσιμότητα πόρων στα δύο είδη σταθμών βάσης.

### 5.4.1 Χαρακτηριστικά Macro Cells

Τα macro cells είναι οι κύριοι σταθμοί βάσης με μεγάλη ακτίνα κάλυψης, σχεδιασμένα να εξυπηρετούν μεγαλύτερες περιοχές και περισσότερους χρήστες ταυτόχρονα. Λόγω της εκτεταμένης κάλυψης και της υψηλής χωρητικότητας τους, τα macro cells διαθέτουν μεγάλο εύρος ζώνης (bandwidth) για την εξυπηρέτηση των χρηστών.

Στο προτεινόμενο δίκτυο, τα macro cells διαθέτουν ένα εύρος διαθέσιμου bandwidth που κυμαίνεται από 3000 MHz έως 5000 MHz. Αυτή η διαθεσιμότητα καθιστά τα macro cells ιδανικά για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλες ποσότητες δεδομένων, όπως:

- **HD Streaming:** Οι χρήστες που χρησιμοποιούν εφαρμογές streaming απαιτούν υψηλό bandwidth, το οποίο καλύπτεται κυρίως από τα macro cells. Στην προσομοίωση, το bandwidth για τέτοιες εφαρμογές ανέρχεται στα 400 MHz ανά χρήστη.
- **Web Browsing και E-mail:** Για τους χρήστες που ασχολούνται με εφαρμογές περιήγησης στο διαδίκτυο ή ανταλλαγής email, οι απαιτήσεις bandwidth είναι σημαντικά χαμηλότερες, με 200 MHz και 100 MHz αντίστοιχα.

Τα macro cells έχουν τη δυνατότητα να εξυπηρετούν μεγάλες αποστάσεις μεταξύ του σταθμού βάσης και των χρηστών, καθιστώντας τα κατάλληλα για την κάλυψη ευρείας περιοχής και τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων.

### 5.4.2 Χαρακτηριστικά Small Cells

Τα small cells, από την άλλη, είναι μικρότεροι σταθμοί βάσης που καλύπτουν μικρότερες περιοχές, όπως πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές ή εσωτερικούς χώρους. Λόγω της μικρότερης ακτίνας κάλυψης, τα small cells εξυπηρετούν λιγότερους χρήστες αλλά έχουν το πλεονέκτημα της πιο άμεσης σύνδεσης, μειώνοντας τις καθυστερήσεις και την κατανάλωση ενέργειας για τους χρήστες.

Το διαθέσιμο bandwidth στα small cells κυμαίνεται από 500 MHz έως 1200 MHz, ανάλογα με την πυκνότητα των χρηστών και τις ανάγκες του δικτύου. Ενώ τα small cells διαθέτουν μικρότερο εύρος ζώνης σε σχέση με τα macro cells, εξυπηρετούν χρήστες με μικρότερες απαιτήσεις σε bandwidth, όπως:

- **HD Streaming:** Παρέχεται στους χρήστες bandwidth 200 MHz για εφαρμογές streaming.
- **Web Browsing:** Οι χρήστες που ασχολούνται με περιήγηση στο διαδίκτυο λαμβάνουν 100 MHz.
- **E-mail:** Η λιγότερο απαιτητική εφαρμογή από άποψη bandwidth, με 50 MHz για την αποστολή και λήψη email.

Η μικρότερη χωρητικότητα των small cells τα καθιστά ιδανικά για περιοχές όπου υπάρχει υψηλή πυκνότητα χρηστών, όπως εμπορικά κέντρα ή πυκνοκατοικημένες αστικές ζώνες, ενώ η εγγύτητα των χρηστών στον σταθμό βάσης βελτιώνει την απόδοση.

### 5.4.3 Κατηγορίες Χρηστών και Ανάγκες Bandwidth

Οι χρήστες του δικτύου έχουν διαφορετικές ανάγκες ανάλογα με τις εφαρμογές που χρησιμοποιούν. Στην προτεινόμενη προσέγγιση, οι χρήστες κατατάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες με βάση τις ανάγκες τους σε bandwidth:

1. **HD Streaming:** Χρήστες που χρησιμοποιούν υπηρεσίες συνεχούς ροής υψηλής ευκρίνειας απαιτούν το μεγαλύτερο ποσό bandwidth, δηλαδή 400 MHz στα macro cells και 200 MHz στα small cells.
2. **Web Browsing:** Οι χρήστες που περιηγούνται στο διαδίκτυο έχουν μέσες απαιτήσεις bandwidth, δηλαδή 200 MHz στα macro cells και 100 MHz στα small cells.
3. **E-mail:** Χρήστες με τις χαμηλότερες απαιτήσεις, καθώς οι εφαρμογές email απαιτούν μόνο 100 MHz στα macro cells και 50 MHz στα small cells.

Η ποικιλία στις ανάγκες bandwidth των χρηστών επιτρέπει την αποδοτική κατανομή των πόρων, όπου οι χρήστες με μεγαλύτερες ανάγκες εξυπηρετούνται κυρίως από τα macro cells, ενώ οι χρήστες με μικρότερες ανάγκες συνδέονται στα small cells, μειώνοντας έτσι την πίεση στα κύρια σημεία του δικτύου.

### 5.4.4 Συνολική Εικόνα Κατανομής Bandwidth

Η διαθεσιμότητα του bandwidth στους σταθμούς βάσης εξαρτάται τόσο από την πυκνότητα των χρηστών όσο και από τις κατηγορίες των εφαρμογών που χρησιμοποιούν. Στον προτεινόμενο μηχανισμό, το διαθέσιμο bandwidth στους σταθμούς βάσης κατανέμεται με τρόπο που διασφαλίζει τη βέλτιστη χρήση των πόρων και την ικανοποίηση των χρηστών.

- Στα **macro cells**, το διαθέσιμο bandwidth κυμαίνεται από 5000 MHz έως 3000 MHz και καλύπτει κυρίως χρήστες με απαιτήσεις για υψηλό bandwidth.
- Στα **small cells**, το διαθέσιμο bandwidth κυμαίνεται από 500 MHz έως 1200 MHz και εξυπηρετεί χρήστες με μικρότερες ανάγκες, προσφέροντας παράλληλα χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και καλύτερη κάλυψη σε πυκνές περιοχές.



# Κεφάλαιο 6 : Προτεινόμενος Μηχανισμός Κατανομής Χρηστών και Ενέργειας

## 6.1 Εισαγωγή στον Προτεινόμενο Μηχανισμό

Ο προτεινόμενος μηχανισμός κατανομής βασίζεται στον αλγόριθμο Gale-Shapley και τη θεωρία παιγνίων για την επίτευξη ισορροπίας Nash. Ο στόχος του αλγορίθμου είναι η κατανομή των χρηστών στους διαθέσιμους σταθμούς βάσης για το uplink και το downlink, λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση ενέργειας τόσο από την πλευρά των χρηστών όσο και από την πλευρά των σταθμών βάσης.

Η κατανομή γίνεται με βάση τις προτιμήσεις των χρηστών και των σταθμών βάσης, οι οποίες σχετίζονται με το Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR), την απόσταση και άλλα τεχνικά χαρακτηριστικά. Η ισορροπία Nash προκύπτει όταν κανένα άτομο ή σταθμός βάσης δεν έχει κίνητρο να αλλάξει την τρέχουσα αντιστοίχισή τους, αφού κάθε αλλαγή δεν θα βελτιώσει την ευχαρίστησή τους.

## 6.2 Κατανομή Χρηστών στους σταθμούς βάσης

Ο αλγόριθμος Gale-Shapley βασίζεται σε μια διαδικασία προτάσεων και απορρίψεων, η οποία καταλήγει σε μια σταθερή κατανομή (matching) μεταξύ χρηστών και σταθμών βάσης.

### 6.2.1 Στάδια του Αλγορίθμου για Κατανομή Χρηστών

1. Δημιουργία Προτιμήσεων: Οι χρήστες δημιουργούν λίστα προτιμήσεων με βάση το SINR και την απόσταση. Παρόμοια, οι σταθμοί βάσης δημιουργούν τη δική τους λίστα προτιμήσεων με βάση την απόσταση των χρηστών και την ενεργειακή τους κατανάλωση.

Οι προτιμήσεις των χρηστών είναι μαθηματικά εκφρασμένες ως εξής:

$$\text{Preference}_{\text{user}} = \text{argmax} (\text{SINR}/\text{Distance}) \quad (1)$$

όπου το **SINR** υπολογίζεται ως:

$$\text{SINR} = P_{\text{transmit}} / I + N$$

με το  $P_{\text{transmit}}$  να είναι η ισχύς εκπομπής του σταθμού βάσης, το  $I$  να είναι οι παρεμβολές, και το  $N$  να είναι ο θόρυβος του καναλιού.

2. Αρχικές Προτάσεις Χρηστών: Οι χρήστες προτείνουν τον σταθμό βάσης με την υψηλότερη προτεραιότητα, δηλαδή αυτόν με τον οποίο έχουν την καλύτερη σχέση απόστασης και ποιότητας σήματος (SINR).
3. Αποδοχή ή Απόρριψη από Σταθμούς Βάσης: Οι σταθμοί βάσης δέχονται χρήστες μέχρι να γεμίσουν τη χωρητικότητά τους. Αν ο σταθμός βάσης υπερφορτωθεί, απορρίπτει τους λιγότερο επιθυμητούς χρήστες. Αυτό σημαίνει ότι οι χρήστες που απορρίπτονται προτείνουν τον επόμενο σταθμό βάσης στη λίστα τους.
4. Επαναλήψεις Προτάσεων: Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να βρεθεί μια σταθερή αντιστοίχιση, όπου κάθε χρήστης είναι συνδεδεμένος σε έναν σταθμό βάσης, χωρίς κανένα ζεύγος χρήστη και σταθμού βάσης να θέλει να αλλάξει την αντιστοίχιση.

## 6.2.2 Μαθηματική Διατύπωση της Διαδικασίας

Για κάθε χρήστη  $U_i$ , υπάρχει ένας πίνακας προτιμήσεων  $P_u = [b_1, b_2, \dots, b_n]$ , όπου  $b_n$  είναι οι διαθέσιμοι σταθμοί βάσης. Παρόμοια, κάθε σταθμός βάσης έχει έναν πίνακα προτιμήσεων  $P_b = [u_1, u_2, \dots, u_m]$ .

Ο αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής:

-> Για κάθε χρήστη  $u_i$ , επιλέγεται ο σταθμός βάσης  $b_j$  που ικανοποιεί τη συνάρτηση μεγιστοποίησης :

$$b_j = \operatorname{argmax} (P_{\text{Transmit}} / I + N) \text{ όπου } b_j \in P_u \quad (2)$$

-> Ο σταθμός βάσης  $b_j$  αποδέχεται τους χρήστες μέχρι να γεμίσει τη χωρητικότητά του:

$$\text{Capacity}(b_j) \leq C_j \quad (3)$$

όπου  $C_j$  είναι η μέγιστη χωρητικότητα χρηστών για τον σταθμό βάσης  $b_j$ .

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου δεν υπάρχουν χρήστες που απορρίπτονται, και κανένας χρήστης ή σταθμός βάσης δεν έχει κίνητρο να αλλάξει την αντιστοίχιση τους. Αυτός ο αλγόριθμος οδηγεί σε μια σταθερή αντιστοίχιση, δηλαδή μια κατάσταση όπου η αντιστοίχιση δεν αλλάζει πλέον, και οι χρήστες δεν θα βελτιώσουν το utility τους αν αλλάξουν σταθμό βάσης.

### 6.2.3 Επίτευξη Ισορροπίας Nash στην Κατανομή Χρηστών

Η ισορροπία Nash επιτυγχάνεται όταν κανένας χρήστης δεν έχει κίνητρο να αλλάξει σταθμό βάσης, καθώς η αλλαγή αυτή δεν θα βελτιώσει το utility του. Το utility του

κάθε χρήστη  $u_i$  μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\text{Utility}(u_i) = \text{ThroughputUL} + \text{ThroughputDL} - (a \times \text{EnergyBS} + b \times \text{Energyuser}) \quad (4)$$

όπου :

-> ThroughputUL : το throughput στο uplink.

-> ThroughputDL : το throughput στο downlink.

-> EnergyBS : η ενέργεια που καταναλώνεται από τον σταθμό βάσης.

-> Energyuser : η ενέργεια που καταναλώνεται από τον χρήστη.

Η ισορροπία επιτυγχάνεται όταν καμία αλλαγή δεν οδηγεί σε βελτίωση του utility για οποιονδήποτε χρήστη.

#### Μαθηματικός Ορισμός της Σταθερής Αντιστοίχισης:

Ας υποθέσουμε ότι η αντιστοίχιση που προκύπτει από τον αλγόριθμο είναι η  $M$ . Η αντιστοίχιση  $M$  είναι σταθερή αν:

1. Δεν υπάρχει χρήστης  $U_i$  και σταθμός βάσης  $b_j$  τέτοιοι ώστε:  $b_j$  προτιμά τον  $U_i$  περισσότερο από έναν ήδη συνδεδεμένο χρήστη.
2. Ο χρήστης  $U_i$  δεν προτιμά κάποιον άλλο σταθμό  $b_k$  περισσότερο από τον τρέχοντα σταθμό του.

## 6.3 Κατανομή και διαχείριση Ενέργειας

Ο αλγόριθμος Gale-Sharpley μπορεί να εφαρμοστεί όχι μόνο για την κατανομή των χρηστών στους σταθμούς βάσης, αλλά και για τη βέλτιστη διαχείριση των ενεργειακών πόρων. Εδώ, στόχος είναι να εξισορροπήσουμε τις ενεργειακές απαιτήσεις των χρηστών και των σταθμών βάσης, διασφαλίζοντας ότι κάθε χρήστης καταναλώνει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια, ενώ οι σταθμοί βάσης λειτουργούν όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά [34].

### 6.3.1 Υπολογισμός Κατανάλωσης Ενέργειας

Η συνολική ενέργεια που καταναλώνει ένας σταθμός βάσης εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες:

- Η ενέργεια εκπομπής (transmission power), η οποία σχετίζεται με τη μετάδοση του σήματος προς τους χρήστες.
- Η σταθερή κατανάλωση (overhead power), που αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτείται για τη βασική λειτουργία του σταθμού, ανεξάρτητα από τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετεί.

Η ενέργεια εκπομπής είναι ανάλογη της απόστασης μεταξύ του σταθμού βάσης και του χρήστη. Σύμφωνα με το μοντέλο path loss, η ισχύς που πρέπει να εκπέμψει ο σταθμός για να διασφαλίσει καλή ποιότητα σύνδεσης μειώνεται καθώς μειώνεται η απόσταση.

Ο τύπος για την ενεργειακή κατανάλωση ενός σταθμού βάσης είναι:

$$\text{Energy}_{\text{BS}} = ( \sum P_{\text{transmit}} + \text{Overhead} ) \quad (5)$$

όπου το  $P_{\text{transmit}}$  είναι η ισχύς εκπομπής του σταθμού βάσης για τη σύνδεση με τον χρήστη  $u$ , και το Overhead είναι η σταθερή κατανάλωση ενέργειας του σταθμού βάσης.

Η ενέργεια που καταναλώνεται από τους χρήστες εξαρτάται από το uplink και την απόσταση από τον σταθμό βάσης:

$$\text{Energy}_{\text{user}} = (1 / \text{Distance}) \times P_{\text{transmit-user}} \quad (6)$$

### 6.3.2 Βελτιστοποίηση Κατανάλωσης Ενέργειας

Ο αλγόριθμος Gale-Shapley επιτρέπει τη βέλτιστη αντιστοίχιση χρηστών και σταθμών βάσης, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την ποιότητα της σύνδεσης αλλά και την κατανάλωση ενέργειας.

#### Βασικές Παράμετροι:

Οι χρήστες και οι σταθμοί βάσης έχουν διαφορετικές προτιμήσεις για την κατανάλωση ενέργειας. Κάθε χρήστης προτιμά να συνδεθεί με τον σταθμό βάσης που του παρέχει την καλύτερη σχέση απόδοσης (SINR) και ενεργειακής κατανάλωσης. Αντίστοιχα, οι σταθμοί βάσης προτιμούν να εξυπηρετούν χρήστες που βρίσκονται πιο κοντά, έτσι ώστε να μειώσουν την ισχύ που απαιτείται για να διατηρηθεί η σύνδεση.

#### Utility Function για Ενέργεια:

Ο υπολογισμός του utility για κάθε χρήστη και σταθμό βάσης βασίζεται στην ενέργεια που καταναλώνεται. Το utility ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ του συνολικού throughput και της κατανάλωσης ενέργειας:

$$U = \text{throughput} - (a \times EBS) - (b \times Euser) \quad (7)$$

όπου :

-> U : συνολικό Utility.

-> EBS : η ενέργεια που καταναλώνει ο σταθμός βάσης.

-> Euser : η ενέργεια που καταναλώνει ο χρήστης.

-> a , b : παράγοντες ρύθμισης που εξισορροπούν την επιρροή της ενέργειας στο τελικό αποτέλεσμα.

#### Αλγόριθμος διαχείρισης-κατανομής ενέργειας:

Η μέθοδος Gale-Shapley εφαρμόζει την αντιστοίχιση βάσει των προτιμήσεων των ατόμων και των σταθμών.

- 1) Προτιμήσεις Χρηστών: Οι χρήστες προτείνουν να συνδεθούν με τον σταθμό βάσης που βρίσκεται στη μικρότερη απόσταση (και έτσι να έχουν χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση για uplink).
- 2) Προτιμήσεις Σταθμών Βάσης: Οι σταθμοί βάσης προτιμούν να εξυπηρετούν χρήστες που είναι πιο κοντά, με στόχο να εξοικονομούν ενέργεια και να αυξάνουν την αποδοτικότητά τους.
- 3) Απόρριψη και Επανυποβολή: Χρήστες που απορρίπτονται από τον πρώτο σταθμό βάσης προτείνουν τον επόμενο στη σειρά βάσει των προτιμήσεών τους. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να συνδεθούν όλοι οι χρήστες σε έναν σταθμό βάσης.

### 6.3.3 Επίτευξη Ισορροπίας Nash στην Κατανομή Ενέργειας

Η επίτευξη ισορροπίας Nash σε αυτήν την περίπτωση σημαίνει ότι κανένας χρήστης ή σταθμός βάσης δεν μπορεί να βελτιώσει τη θέση του αλλάζοντας την αντιστοίχιση (με μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ή αύξηση του utility). Αυτή τη στιγμή, το σύστημα έχει σταθεροποιηθεί και η κατανομή της ενέργειας είναι ιδανική σύμφωνα με τα καθορισμένα κριτήρια.

Αυτό συμβαίνει επειδή ο αλγόριθμος εξετάζει συνεχώς εναλλακτικές λύσεις για τη βελτίωση του utility, υπολογίζοντας τη νέα ενεργειακή κατανάλωση και το throughput μετά από κάθε πιθανή αλλαγή σταθμού βάσης. Όταν κανένας χρήστης δεν μπορεί να αυξήσει το utility του, ο αλγόριθμος φτάνει στην ισορροπία Nash.

#### Μαθηματική Περιγραφή της Ισορροπίας Nash

Αν υποθέσουμε ότι ο χρήστης  $i$  είναι συνδεδεμένος με τον σταθμό βάσης  $j$ , τότε για κάθε αλλαγή που μπορεί να εξετάσει ο χρήστης  $i$ , η σχέση:

$$U_i(j') > U_i(j) \quad (8)$$

πρέπει να μην ισχύει για οποιονδήποτε άλλο σταθμό βάσης  $j'$ . Αντίστοιχα, κανένας άλλος χρήστης δεν μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερο utility στον σταθμό βάσης  $j$ .

## 6.4 Ψευδοκώδικας Προτεινόμενου Μηχανισμού

```
1 ▾ Αρχικές συνθήκες:
2   Ορισμός αριθμού χρηστών, macro cells, small cells, και χωρητικότητας κάθε σταθμού βάσης
3   Δημιουργία τυχαίων θέσεων χρηστών
4   Καθορισμός ισχύος εκπομπής και overhead για macro και small cells
5
6 ▾ Υπολογισμός Απόστασης (pos1, pos2):
7   Επιστροφή Ευκλείδειας απόστασης μεταξύ δύο θέσεων
8
9 ▾ Υπολογισμός SINR (power, distance):
10  Υπολογισμός path loss
11  Υπολογισμός θορύβου
12  Επιστροφή SINR
13
14 ▾ Υπολογισμός Throughput (SINR, bandwidth):
15  Επιστροφή throughput με βάση τη συνάρτηση  $\log_2(1 + \text{SINR})$ 
16
17 ▾ Υπολογισμός Ενεργειακής Κατανάλωσης (power, overhead):
18  Επιστροφή συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης
19
20 ▾ Gale-Shapley Matching (user_prefs, bs_prefs, capacities):
21  Αρχικοποίηση συνδέσεων χρηστών-σταθμών βάσης
22 ▾ Όσο υπάρχουν χρήστες χωρίς σύνδεση:
23   Κάθε χρήστης προτείνει τον προτιμώμενο σταθμό βάσης
24   Ο σταθμός αποδέχεται τον χρήστη αν υπάρχει διαθέσιμη χωρητικότητα
25   Αν όχι, ο σταθμός απορρίπτει τον λιγότερο επιθυμητό χρήστη
26  Επιστροφή αντιστοιχίσεων χρηστών-σταθμών
27
28 ▾ Εύρεση Ισορροπίας Nash:
29  Αρχικές συνδέσεις με Gale-Shapley
30 ▾ Για κάθε χρήστη:
31   Υπολογισμός τρέχοντος utility
32   Έλεγχος για καλύτερες εναλλακτικές συνδέσεις
33   Αν βρεθεί βελτίωση, ενημέρωση συνδέσεων
34  Επιστροφή τελικών συνδέσεων
35
36 ▾ Τελικός Υπολογισμός:
37  Υπολογισμός του συνολικού utility κάθε χρήστη
```

### Δομή του Ψευδοκώδικα :

#### 1. Αρχικές Συνθήκες:

- Ορισμός αριθμού χρηστών, macro cells, small cells, και χωρητικότητας για κάθε σταθμό βάσης.
- Δημιουργία τυχαίων θέσεων για τους χρήστες και σταθμούς βάσης.
- Ορισμός ισχύος εκπομπής και κόστους overhead για κάθε σταθμό βάσης (macro και small cells).

#### 2. Υπολογισμός Απόστασης:

- Υπολογισμός της απόστασης μεταξύ δύο θέσεων (π.χ. χρήστη και σταθμού βάσης) χρησιμοποιώντας την Ευκλείδεια απόσταση.

#### 3. Υπολογισμός SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio):

- Υπολογισμός της ισχύος σήματος για κάθε σταθμό βάσης με βάση την απόσταση.

- Χρήση του path loss και του θορύβου για τον υπολογισμό του SINR, το οποίο καθορίζει την ποιότητα του σήματος.
- 4. Υπολογισμός Throughput:**
- Υπολογισμός του throughput (ρυθμός μετάδοσης δεδομένων) για κάθε σύνδεση σταθμού βάσης-χρήστη .
- 5. Υπολογισμός Ενεργειακής Κατανάλωσης:**
- Υπολογισμός της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας για κάθε σταθμό βάσης, λαμβάνοντας υπόψη την ισχύ εκπομπής και το κόστος overhead.
- 6. Αντιστοίχιση Χρηστών με τον Αλγόριθμο Gale-Shapley:**
- Αρχικοποίηση: Ξεκινάμε με τους χρήστες να μην έχουν συνδεθεί σε κανένα σταθμό βάσης.
  - **Διαδικασία Αντιστοίχισης:**
    - Κάθε χρήστης προτείνει τον σταθμό βάσης με βάση τις προτιμήσεις του (μικρότερη απόσταση ή καλύτερη ποιότητα σύνδεσης).
    - Ο σταθμός είτε δέχεται τον χρήστη, είτε απορρίπτει τον λιγότερο επιθυμητό χρήστη, αν η χωρητικότητά του είναι πλήρης.
  - Επαναλαμβάνεται έως ότου όλοι οι χρήστες να συνδεθούν σε σταθμούς βάσης ή να μην υπάρχουν άλλες διαθέσιμες επιλογές.
- 7. Εύρεση Ισορροπίας Nash:**
- Αρχικοποίηση Συνδέσεων: Ξεκινάμε με τις συνδέσεις που έχουν γίνει με τον Gale-Shapley.
  - Για κάθε χρήστη, υπολογίζουμε το utility (μέγιστο throughput με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας).
  - Έλεγχος εναλλακτικών συνδέσεων: Αν βρεθεί βελτιωμένη σύνδεση, γίνεται ενημέρωση των συνδέσεων.
  - Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου δεν υπάρχουν περαιτέρω βελτιώσεις στο utility των χρηστών.
- 8. Τελικός Υπολογισμός:**
- Υπολογισμός του συνολικού utility για κάθε χρήστη, το οποίο βασίζεται στο τελικό throughput και την ενεργειακή κατανάλωση.



# Κεφάλαιο 7 : Προτεινόμενος Μηχανισμός Κατανομής Bandwidth

## 7.1 Εισαγωγή στον Προτεινόμενο Μηχανισμό

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα εξηγήσουμε τον προτεινόμενο τρόπο κατανομής του διαθέσιμου bandwidth σε ένα δίκτυο που υποστηρίζει την τεχνολογία DUDe (Decoupled Uplink and Downlink). Η διανομή του bandwidth αποτελεί ένα σημαντικό θέμα σε δίκτυα 5G, καθώς επηρεάζει την απόδοση και την εμπειρία των χρηστών.

Ο μηχανισμός που προτείνεται στηρίζεται στη χρήση του Nash Bargaining για την κατανομή του bandwidth. Ο αλγόριθμος Nash Bargaining αποτελεί ένα από τα βασικά εργαλεία της θεωρίας παιγνίων και χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων που απαιτούν κατανομή πόρων με δίκαιο και αποτελεσματικό τρόπο. Στην περίπτωση των δικτύων 5G, ο μηχανισμός αυτός εξασφαλίζει ότι το διαθέσιμο bandwidth κατανέμεται ανάμεσα στους χρήστες λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές απαιτήσεις τους, όπως HD streaming, web browsing και email, και τους περιορισμούς των πόρων του δικτύου.

Η βασική αρχή του Nash Bargaining είναι να βρεθεί μια λύση που είναι Pareto-efficient, δηλαδή να μεγιστοποιεί την απόδοση όλων των χρηστών χωρίς δυνατότητα βελτίωσης ενός χρήστη χωρίς να χειροτερέψει κάποιον άλλο. Με τον προτεινόμενο μηχανισμό, το bandwidth διαμοιράζεται δίκαια μεταξύ των χρηστών, λαμβάνοντας υπόψη το uplink και το downlink ξεχωριστά, βασιζόμενος στις απαιτήσεις τους και στο διαθέσιμο εύρος ζώνης σε κάθε είδος κελιού.

Στο επόμενο κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί αναλυτικά η διαδικασία κατανομής του bandwidth για το uplink μέσω του μηχανισμού Nash Bargaining, και θα ακολουθήσει η αντίστοιχη κατανομή για το downlink.

## 7.2 Κατανομή Bandwidth των Small Cells / Macro cells για Uplink / Downlink

Η κατανομή του διαθέσιμου uplink bandwidth στα δίκτυα 5G είναι ζωτικής σημασίας για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας των εφαρμογών που χρησιμοποιούν οι χρήστες. Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζουμε αναλυτικά τον προτεινόμενο μηχανισμό κατανομής του διαθέσιμου bandwidth στα δύο διαφορετικά είδη κελιών (small cell , macro cell) χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Nash Bargaining, καθώς και τη μαθηματική προσέγγιση πίσω από αυτόν.

### 7.2.1 Εισαγωγή στον Προτεινόμενο Μηχανισμό

Στόχος του προτεινόμενου μηχανισμού είναι η δίκαιη και βέλτιστη κατανομή του διαθέσιμου bandwidth στους χρήστες, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις τους σε δεδομένα και τη συνολική περιορισμένη χωρητικότητα των small cells / macro cells. Η χρήση του αλγορίθμου Nash Bargaining επιτρέπει την εξισορρόπηση της κατανομής των πόρων ώστε να ικανοποιούνται όλοι οι χρήστες κατά το μέγιστο δυνατό βαθμό, επιτυγχάνοντας παράλληλα μια Pareto-efficient λύση.

Το Nash Bargaining εξασφαλίζει ισορροπία μεταξύ της ικανοποίησης των χρηστών και του απαιτούμενου bandwidth, ώστε κανένας χρήστης να μην ξεπεράσει το 90% του bandwidth που χρειάζεται. Αποτρέπει την υπερβολική διανομή σε μεμονωμένους χρήστες προς όφελος των υπολοίπων.

### 7.2.2 Κατηγοριοποίηση Χρηστών και Απαιτήσεων

Οι χρήστες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις ανάγκες τους σε τρεις κατηγορίες, με βάση το είδος της εφαρμογής που χρησιμοποιούν:

#### Uplink:

- HD Streaming: Χρήστες που απαιτούν 200 MHz για την αναπαραγωγή βίντεο υψηλής ανάλυσης.
- Web Browsing: Χρήστες που απαιτούν 100 MHz για περιήγηση στο διαδίκτυο.
- E-mail: Χρήστες που απαιτούν 50 MHz για τη διαχείριση ηλεκτρονικής αλληλογραφίας.

## **Downlink:**

- HD Streaming: Χρήστες που απαιτούν 400 MHz για την αναπαραγωγή βίντεο υψηλής ανάλυσης.
- Web Browsing: Χρήστες που απαιτούν 200 MHz για περιήγηση στο διαδίκτυο.
- E-mail: Χρήστες που απαιτούν 100 MHz για τη διαχείριση ηλεκτρονικής αλληλογραφίας.

Το συνολικό bandwidth που απαιτείται προκύπτει από το άθροισμα των απαιτήσεων όλων των χρηστών. Αν η συνολική ζήτηση είναι μικρότερη από το διαθέσιμο bandwidth, τότε όλοι οι χρήστες λαμβάνουν το ίδιο bandwidth που ζητούν. Σε διαφορετική προσέγγιση, ο αλγόριθμος Nash Bargaining επιδιώκει να αυξήσει το συνολικό ωφέλιμο κέρδος των χρηστών.

### **7.2.3 Υπολογισμός Utility**

Για κάθε χρήστη, το utility του υπολογίζεται ως ο λόγος του κατανεμημένου bandwidth προς το απαιτούμενο bandwidth:

$$U_i = B_i\text{-Allocated} / B_i\text{-Required} \quad (9)$$

όπου :

->  $U_i$  : Το Utility του χρήστη  $i$

->  $B_i\text{-Allocated}$  : το κατανεμημένο bandwidth στον χρήστη  $i$

->  $B_i\text{-Required}$  : το απαιτούμενο bandwidth του χρήστη  $i$

Το utility κυμαίνεται από το μηδέν έως το ένα, με το ένα να αντιπροσωπεύει πλήρη ικανοποίηση του χρήστη. Η προτεραιότητα του μηχανισμού είναι να εξασφαλίσει τη μέγιστη ικανοποίηση όλων των χρηστών, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς του συστήματος.

Η συνολική συνάρτηση στόχου του Nash Bargaining είναι να μεγιστοποιήσει το προϊόν των utilities όλων των χρηστών:

$$\max \prod_{i=1}^n U_i = \max \prod_{i=1}^n ( B_i\text{-Allocated} / B_i\text{-Required} )$$

ή ισοδύναμα, να μεγιστοποιήσει το άθροισμα των λογαρίθμων των utilities:

$$\max \sum_{i=1}^n \log ( B_i\text{-Allocated} / B_i\text{-Required} ) \quad (10)$$

## 7.2.4 Περιορισμοί του συστήματος

Για να επιλυθεί το πρόβλημα της βελτιστοποίησης, λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω περιορισμοί:

- 1) Περιορισμός Συνολικού Bandwidth: Το άθροισμα του κατανεμημένου bandwidth δεν πρέπει να ξεπερνά το συνολικό διαθέσιμο bandwidth του κελιού. Μαθηματικά, αυτός ο περιορισμός διατυπώνεται ως:

$$\sum_{i=1}^n B_i\text{-Allocated} \leq B_{\text{total}} \quad (11)$$

όπου  $B_{\text{total}}$  το συνολικό διαθέσιμο Bandwidth του κελιού.

- 2) Περιορισμός 90% Σχετικά με τις Απαιτήσεις: Κανένας χρήστης δεν επιτρέπεται να λάβει περισσότερο από το 90% του απαιτούμενου bandwidth του, για να διασφαλιστεί ότι οι διαθέσιμοι πόροι κατανέμονται δίκαια μεταξύ όλων των χρηστών. Ο περιορισμός αυτός διατυπώνεται ως:

$$B_i\text{-Allocated} \leq 0.9 \times B_i\text{-Required} \quad (12)$$

## 7.2.5 Λειτουργία του Αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος Nash Bargaining λειτουργεί σε στάδια:

- 1) Ο αλγόριθμος ξεκινά με μια αρχική κατανομή bandwidth στους χρήστες, η οποία μπορεί να είναι ισόποση, με κάθε χρήστη να λαμβάνει ένα αρχικό μερίδιο bandwidth, το οποίο υπολογίζεται ως:

$$B_i\text{-Initial} = B_{\text{total}} / n$$

όπου  $n$  ο αριθμός των χρηστών.

- 2) Υπολογισμός Utility : Στο στάδιο αυτό υπολογίζεται το utility για κάθε χρήστη ( ποσοστό ικανοποίησης που λαμβάνει βάσει του κατανεμημένου προς αυτόν bandwidth ) το οποίο υπολογίζεται ως εξής :

$$U_i = B_i\text{-Allocated} / B_i\text{-Required}$$

- 3) Βελτιστοποίηση με περιορισμούς : Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί την μέθοδο SLSQP ( Sequential Least Squares Programming ) [35] για την βελτιστοποίηση της κατανομής . Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας , ο αλγόριθμος προσαρμόζει σε κάθε χρήστη χρήστη το κατανεμημένο bandwidth με σκοπό να μεγιστοποιήσει το utility .

$$\max \sum_{i=1}^n \log ( B_i\text{-Allocated} / B_i\text{-Required} ) \quad (13)$$

Η βελτιστοποίηση εκτελείται με γνώμονα τους περιορισμούς που έχουν οριστεί στο σύστημα ( συνολικό bandwidth και 90% της ζήτησης).

- 4) Έλεγχος περιορισμών : Για κάθε προσαρμογή στην κατανομή, ο αλγόριθμος ελέγχει εάν ικανοποιούνται οι περιορισμοί:
- Το συνολικό bandwidth δεν πρέπει να υπερβαίνει το διαθέσιμο,
  - Κανένας χρήστης δεν λαμβάνει περισσότερο από το 90% του απαιτούμενου bandwidth.

Αν οι περιορισμοί δεν ικανοποιούνται, ο αλγόριθμος προσαρμόζει τις κατανομές μέχρι να επιτευχθεί ισορροπία.

- 5) Τελική κατανομή : Με την επίτευξη της τελικής κατανομής και την ικανοποίηση των περιορισμών , ο αλγόριθμος τερματίζει . Η τελική κατανομή του bandwidth είναι μια λύση Pareto-efficient, που εξασφαλίζει δίκαιη και βέλτιστη κατανομή μεταξύ των χρηστών.

## 7.3 Ψευδοκώδικας Προτεινόμενου Μηχανισμού

```
1 ▽ Αρχικές συνθήκες:
2 ▽ - Ορισμός αριθμού χρηστών και κατηγοριών απαιτήσεων bandwidth:
3 ▽   * Κατηγορίες: HD Streaming, Web Browsing, E-mail
4 ▽ - Ορισμός διαθέσιμου bandwidth για:
5 ▽   * Uplink (small cells)
6 ▽   * Downlink (macro cells)
7 ▽ - Κατανομή χρηστών σε κατηγορίες απαιτήσεων bandwidth με βάση τις ανάγκες τους.
8
9 ▽ Υπολογισμός Utility (bandwidth_allocated, bandwidth_required):
10 ▽ Για κάθε χρήστη:
11 ▽   - Επιστροφή:  $\min(\text{bandwidth\_allocated}, \text{bandwidth\_required}) / \text{bandwidth\_required}$ 
12 ▽   * Το utility υπολογίζεται ως το ποσοστό του allocated bandwidth σε σχέση με το required bandwidth.
13
14 ▽ Nash Bargaining Loss (allocations, bandwidth_requirements, user_bandwidth_category):
15 ▽ Για κάθε χρήστη:
16 ▽   - Υπολογισμός utility με βάση το allocated και το required bandwidth.
17 ▽ Επιστροφή:
18 ▽   - Άθροισμα των αρνητικών λογαρίθμων των utilities:
19 ▽   * Επιστροφή:  $-\sum(\log(\text{utility}))$  για όλους τους χρήστες (για ελαχιστοποίηση της συνάρτησης απωλειών)
20
21 ▽ Περιορισμοί στην κατανομή bandwidth:
22 ▽   - Το άθροισμα των κατανομών δεν πρέπει να ξεπερνά το διαθέσιμο bandwidth για Uplink/Downlink.
23 ▽   - Το allocated bandwidth για κάθε χρήστη δεν πρέπει να υπερβαίνει το 90% του required bandwidth για να εξασφαλιστεί ισορροπία μεταξύ χρηστών.
24
25 ▽ Αρχικοποίηση κατανομών bandwidth:
26 ▽   - Κατανομή ίσου μέρους του διαθέσιμου bandwidth σε όλους τους χρήστες:
27 ▽   *  $\text{initial\_allocations} = \text{διαθέσιμο\_bandwidth} / \text{αριθμός\_χρηστών}$ 
28
29 ▽ Βελτιστοποίηση μέσω Nash Bargaining:
30 ▽ Επανάληψη μέχρι σύγκλισης:
31 ▽   Για κάθε βήμα:
32 ▽     - Υπολογισμός νέων κατανομών που ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση απωλειών του Nash Bargaining.
33 ▽     - Εφαρμογή περιορισμών στις κατανομές bandwidth:
34 ▽       * Συνολικό bandwidth  $\leq$  διαθέσιμο bandwidth
35 ▽       * Κάθε χρήστης  $\leq$  90% του απαιτούμενου bandwidth
36 ▽   Ενημέρωση:
37 ▽     - Οι κατανομές ενημερώνονται μέχρι να υπάρξει σύγκλιση, δηλαδή όταν οι αλλαγές στο utility κάθε χρήστη γίνουν αμελητέες.
38
39 ▽ Τελικές Κατανομές και Υπολογισμός:
40 ▽   - Εκτύπωση των τελικών κατανομών bandwidth για κάθε χρήστη.
41 ▽   - Υπολογισμός του συνολικού utility για κάθε χρήστη με βάση τις τελικές κατανομές.
42 ▽   - Υπολογισμός και εκτύπωση του συνολικού utility για ολόκληρο το δίκτυο.
```

## Δομή του Ψευδοκώδικα :

### 1. Αρχικές συνθήκες:

- Στην αρχική φάση, ορίζονται οι χρήστες και κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τις απαιτήσεις τους σε HD Streaming, Web Browsing και E-mail, οι οποίες απαιτούν διαφορετικά επίπεδα bandwidth.
- Ταυτόχρονα, γίνεται ο διαχωρισμός του διαθέσιμου bandwidth για Uplink (small cells) και Downlink (macro cells). Αυτό διασφαλίζει ότι κάθε χρήστης θα έχει διαφορετικό εύρος ζώνης για κάθε κατεύθυνση επικοινωνίας.
- Οι χρήστες αντιστοιχίζονται στις κατηγορίες τους βάσει των απαιτήσεών τους σε bandwidth, όπως π.χ. HD Streaming που απαιτεί μεγαλύτερο bandwidth από Web Browsing ή E-mail.

### 2. Υπολογισμός Utility:

- Το utility υπολογίζεται βάσει του πόσο κοντά φτάνει το allocated bandwidth στο required bandwidth για κάθε χρήστη. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για τη διασφάλιση ότι οι κατανομές είναι δίκαιες.

### 3. Nash Bargaining Loss:

- Εδώ υπολογίζεται το συνολικό loss (απώλεια) για όλους τους χρήστες, με βάση τις κατανομές bandwidth και τα utilities.
- Το Nash Bargaining επιδιώκει να ελαχιστοποιήσει το συνολικό loss, εξασφαλίζοντας ότι η κατανομή των πόρων γίνεται με τον πιο δίκαιο τρόπο για όλους τους χρήστες. Αυτό το loss εκφράζεται ως το αρνητικό άθροισμα των λογαρίθμων των utilities όλων των χρηστών, ώστε να δίνεται έμφαση στην ισότιμη κατανομή του bandwidth.

### 4. Περιορισμοί κατανομής bandwidth:

- Οι περιορισμοί του συστήματος απαιτούν:
  - Το συνολικό allocated bandwidth να μην υπερβαίνει το διαθέσιμο bandwidth του σταθμού βάσης (Uplink/Downlink).
  - Κανένας χρήστης να μην λαμβάνει πάνω από το 90% του απαιτούμενου bandwidth, για να διασφαλιστεί η δίκαιη κατανομή των πόρων.

### 5. Αρχικοποίηση κατανομών bandwidth:

- Αρχικά, γίνεται ίση κατανομή του bandwidth σε όλους τους χρήστες, ώστε όλοι να ξεκινούν με ίσες ευκαιρίες.

### 6. Βελτιστοποίηση μέσω Nash Bargaining:

- Στην φάση αυτή:

- Γίνεται βελτιστοποίηση της κατανομής του bandwidth, με στόχο τη μεγιστοποίηση της δικαιοσύνης στη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης.
- Υπολογίζεται η νέα κατανομή με βάση τον Nash Bargaining αλγόριθμο και τους περιορισμούς που ορίστηκαν παραπάνω.
- Ο αλγόριθμος συνεχίζεται μέχρι η κατανομή του bandwidth να φτάσει σε σημείο σύγκλισης, δηλαδή όταν δεν υπάρχουν άλλες βελτιώσεις στη δίκαιη κατανομή.

#### **7. Τελικές Κατανομές και Υπολογισμός:**

- Στο τέλος, υπολογίζονται οι τελικές κατανομές του bandwidth για κάθε χρήστη και εκτυπώνονται οι κατανομές.
- Υπολογίζεται το συνολικό utility για κάθε χρήστη και για όλο το δίκτυο, ώστε να αξιολογηθεί η συνολική απόδοση του συστήματος.



# Κεφάλαιο 8 : Αποτελέσματα

Για τα αποτελέσματα που θα δείξουμε παρακάτω χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Python στο περιβάλλον Google Collab. Επίσης για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων η βιβλιοθήκη που χρησιμοποιείται είναι η matplotlib, και συγκεκριμένα το υποπακέτο της pyplot.

## 8.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των δύο προτεινόμενων αλγορίθμων για τη βελτιστοποίηση της κατανομής χρηστών, της κατανάλωσης ενέργειας και της κατανομής του Bandwidth σε δίκτυα 5G. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν όπως αναφέραμε παραπάνω είναι ο αλγόριθμος Gale-Shapley σε μοντελοποίηση matching-game και ένας αλγόριθμος Nash Bargaining μοντελοποιημένος σε ένα παιχνίδι διαπραγματεύσεων.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται περιλαμβάνουν:

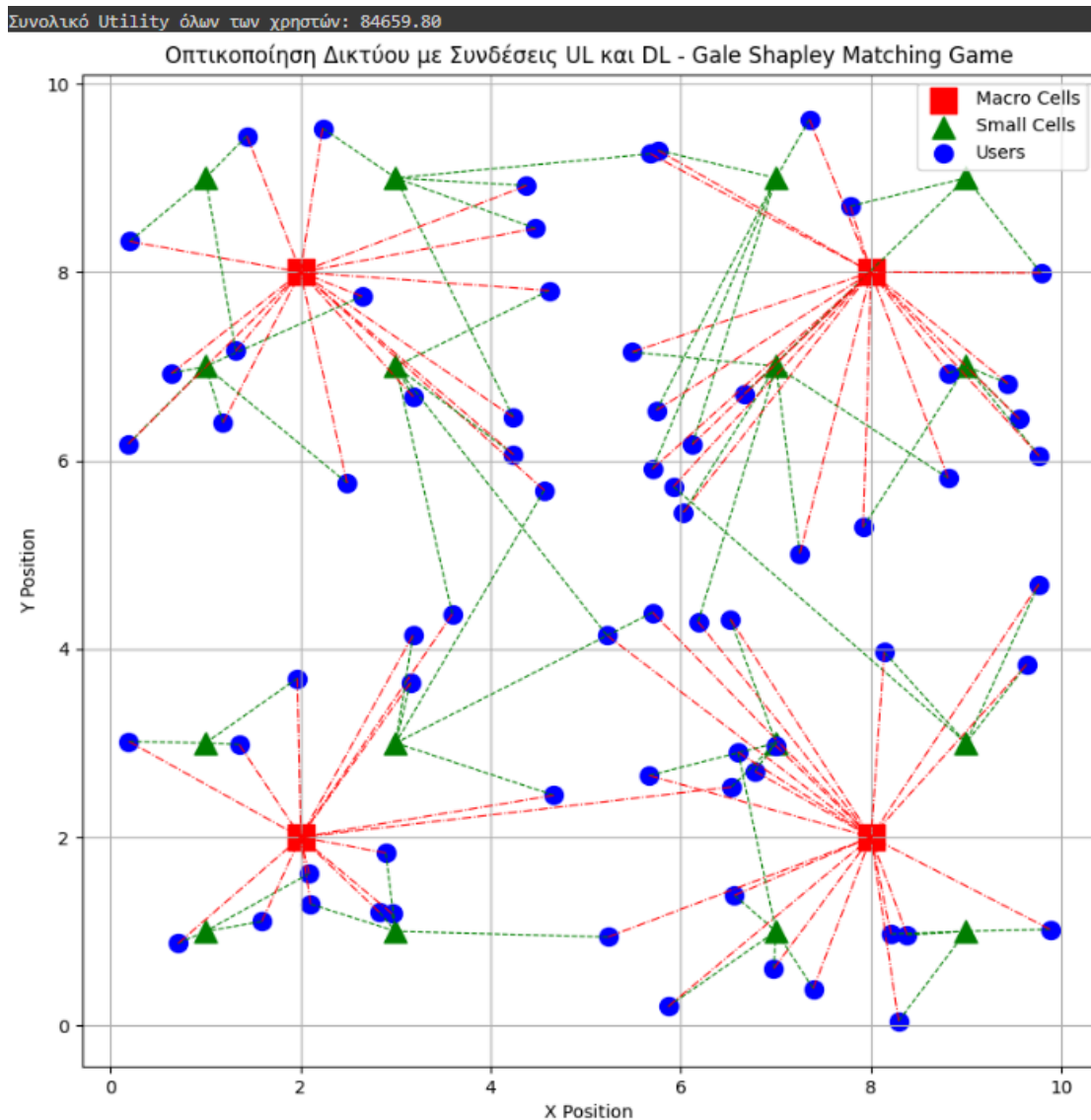
- Ανάλυση της κατανομής των χρηστών και της κατανάλωσης ενέργειας μέσω του αλγορίθμου Gale-Shapley.
- Ανάλυση της κατανομής του bandwidth μέσω του αλγορίθμου Nash Bargaining, διαχωρίζοντας τα αποτελέσματα για το uplink (small cells) και το downlink (macro cells).

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων περιλαμβάνει διαγράμματα και πίνακες που δείχνουν τη βελτίωση στην απόδοση του δικτύου, τη δικαιότερη κατανομή πόρων και την εξισορρόπηση της κατανάλωσης ενέργειας. Σκοπός είναι η ανάλυση των δύο αλγορίθμων ως προς την αποδοτικότητα και τη σταθερότητα που επιτυγχάνουν στο δίκτυο 5G συγκριτικά με αλγορίθμους που δεν χρησιμοποιούν τεχνικές θεωρίας παιγνίων.

## 8.2 Αποτελέσματα κατανομής χρηστών-ενέργειας

### 8.2.1 Γενική Επισκόπηση των Αποτελεσμάτων

Στην εικόνα 8.1 φαίνεται η κατανομή των χρηστών ( μπλε χρώμα ) στα small cells ( πράσινο χρώμα ) και στα macro cells ( κόκκινο χρώμα ) με τη χρήση του αλγόριθμου Gale - Sharpley . Με κόκκινη γραμμή είναι σχεδιασμένες οι συνδέσεις Downlink και με πράσινη γραμμή οι συνδέσεις Uplink οι οποίες είναι διαχωρισμένες μεταξύ τους εξαιτίας της τεχνολογίας DUE που χρησιμοποιείται στο δίκτυο.



Εικόνα 8.1: Οπτικοποίηση κατανομής χρηστών με Gale-Shapley

Το συνολικό utility που επιτυγχάνεται στην κατανομή αυτή είναι 84.659,80 μονάδες και αποτελεί το επίπεδο ικανοποίησης των χρηστών ως προς την κατανομή τους.

Στην εικόνα 8.2, φαίνεται ο τρόπος που λειτουργεί ο έλεγχος εναλλακτικών συνδέσεων με κάποιους χρήστες να αλλάζουν DL σύνδεση, βελτιώνοντας το utility τους. Ο κάθε χρήστης βελτιώνει την κατάσταση του μέχρι το utility του να φτάσει σε ένα σημείο όπου περαιτέρω αλλαγές δεν φέρνουν κέρδος.

Μετά από αρκετές αλλαγές, η ισορροπία Nash επιτυγχάνεται, όπως φαίνεται στην τελευταία γραμμή της εικόνας, όπου δεν υπάρχει καμία δυνατότητα περαιτέρω βελτίωσης για κανέναν χρήστη.

```
Χρήστης 3 άλλαξε DL σύνδεση - Νέο Utility: 1195.90
Χρήστης 4 άλλαξε DL σύνδεση - Νέο Utility: 1204.10
Χρήστης 7 άλλαξε DL σύνδεση - Νέο Utility: 1188.50
Χρήστης 7 άλλαξε DL σύνδεση - Νέο Utility: 1197.03
Χρήστης 55 άλλαξε DL σύνδεση - Νέο Utility: 1216.68
Χρήστης 56 άλλαξε DL σύνδεση - Νέο Utility: 1203.27
Χρήστης 68 άλλαξε DL σύνδεση - Νέο Utility: 1191.14
Χρήστης 2 άλλαξε DL σύνδεση - Νέο Utility: 1196.54
Χρήστης 15 άλλαξε DL σύνδεση - Νέο Utility: 1187.59
Ισορροπία Nash επιτεύχθηκε.
```

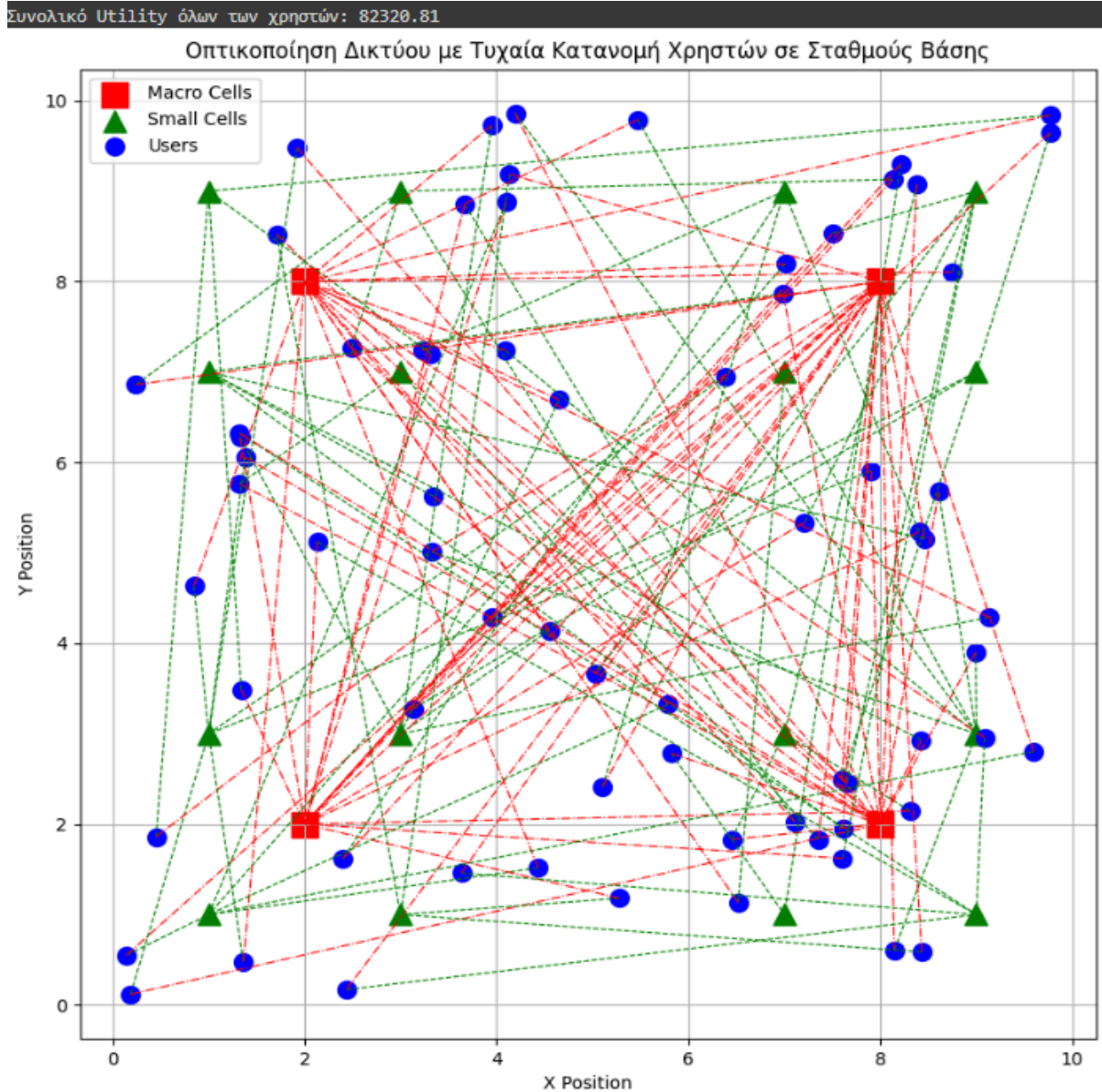
Εικόνα 8.2: Επίτευξη Ισορροπίας Nash

Στην εικόνα 8.3 φαίνεται αναλυτικά το utility του κάθε χρήστη του δικτύου έπειτα από τη χρήση του προτεινόμενου μηχανισμού . Διακρίνουμε ότι διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους αναδεικνύοντας την δικαιοσύνη της κατανομής των χρηστών στα small , macro cells .

Χρήστης 1: Utility = 1202.43	Χρήστης 24: Utility = 1227.94	Χρήστης 46: Utility = 1219.05
Χρήστης 2: Utility = 1196.54	Χρήστης 25: Utility = 1214.13	Χρήστης 47: Utility = 1216.83
Χρήστης 3: Utility = 1195.90	Χρήστης 26: Utility = 1190.83	Χρήστης 48: Utility = 1225.68
Χρήστης 4: Utility = 1204.10	Χρήστης 27: Utility = 1211.13	Χρήστης 49: Utility = 1202.12
Χρήστης 5: Utility = 1206.98	Χρήστης 28: Utility = 1231.79	Χρήστης 50: Utility = 1210.38
Χρήστης 6: Utility = 1199.32	Χρήστης 29: Utility = 1196.29	Χρήστης 51: Utility = 1223.20
Χρήστης 7: Utility = 1197.03	Χρήστης 30: Utility = 1200.77	Χρήστης 52: Utility = 1216.20
Χρήστης 8: Utility = 1220.35	Χρήστης 31: Utility = 1226.57	Χρήστης 53: Utility = 1203.23
Χρήστης 9: Utility = 1212.83	Χρήστης 32: Utility = 1219.36	Χρήστης 54: Utility = 1189.00
Χρήστης 10: Utility = 1225.53	Χρήστης 33: Utility = 1213.33	Χρήστης 55: Utility = 1216.68
Χρήστης 11: Utility = 1211.68	Χρήστης 34: Utility = 1224.01	Χρήστης 56: Utility = 1203.27
Χρήστης 12: Utility = 1201.12	Χρήστης 35: Utility = 1224.66	Χρήστης 57: Utility = 1227.50
Χρήστης 13: Utility = 1216.42	Χρήστης 36: Utility = 1196.51	Χρήστης 58: Utility = 1209.75
Χρήστης 14: Utility = 1219.10	Χρήστης 37: Utility = 1204.39	Χρήστης 59: Utility = 1201.77
Χρήστης 15: Utility = 1187.59	Χρήστης 38: Utility = 1216.41	Χρήστης 60: Utility = 1225.88
Χρήστης 16: Utility = 1223.02	Χρήστης 39: Utility = 1227.65	Χρήστης 61: Utility = 1196.71
Χρήστης 17: Utility = 1189.66	Χρήστης 40: Utility = 1227.10	Χρήστης 62: Utility = 1211.09
Χρήστης 18: Utility = 1205.32	Χρήστης 41: Utility = 1206.35	Χρήστης 63: Utility = 1199.91
Χρήστης 19: Utility = 1196.12	Χρήστης 42: Utility = 1219.62	Χρήστης 64: Utility = 1212.19
Χρήστης 20: Utility = 1217.21	Χρήστης 43: Utility = 1205.12	Χρήστης 65: Utility = 1209.30
Χρήστης 21: Utility = 1195.32	Χρήστης 44: Utility = 1196.47	Χρήστης 66: Utility = 1194.31
Χρήστης 22: Utility = 1219.29	Χρήστης 45: Utility = 1204.42	Χρήστης 67: Utility = 1226.32
Χρήστης 23: Utility = 1201.90	Χρήστης 46: Utility = 1219.05	Χρήστης 68: Utility = 1191.14
		Χρήστης 69: Utility = 1196.30
		Χρήστης 70: Utility = 1202.40

Εικόνα 8.3: Αναλυτικά utilities χρηστών - Gale Shapley Matching Game

Στην εικόνα 8.4 φαίνεται η κατανομή των χρηστών χωρίς την χρήση του παιχνιδιού Matching-Game . Στην προκειμένη περίπτωση οι χρήστες συνδέονται με τους διαθέσιμους σταθμούς βάσης τυχαία χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η απόσταση και το SINR .



Εικόνα 8.4: Οπτικοποίηση κατανομής χρηστών με τυχαία κατανομή

Το συνολικό utility που επιτυγχάνεται στην κατανομή αυτή είναι 82.417,18 μονάδες και αποτελεί το επίπεδο ικανοποίησης των χρηστών ως προς την κατανομή τους.

## 8.2.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των κατανομών χρηστών

Η σύγκριση της κατανομής των χρηστών στους σταθμούς βάσης με βάση τον αλγόριθμο Gale-Shapley και τη μέθοδο της τυχαίας κατανομής δείχνει σαφείς διαφορές τόσο στην απόδοση όσο και στην κατανάλωση ενέργειας. Η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι καθοριστικός παράγοντας που επηρεάζει το συνολικό utility και την αποτελεσματικότητα του δικτύου.

Συγκρίνοντας τις δύο κατανομές το πρώτο και σημαντικότερο που παρατηρούμε είναι η διαφορά κάτι παραπάνω από 2.000 μονάδες στο επιτυγχανόμενο συνολικό utility . Αυτό είναι κάτι που αντανακλά την διαφορά που υπάρχει στην συνολική ποιότητα της σύνδεσης των χρηστών σε Uplink και Downlink . Απο τις εικόνες 1 και 3 μπορούμε να καταλάβουμε ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός προσφέρει καλύτερη ισορροπία συγκριτικά με την τυχαία κατανομή όπου κάποιοι σταθμοί είτε υπο-λειτουργούν είτε υπέρ φορτώνονται με αποτέλεσμα κάποιοι να μένουν ανεκμετάλλευτοι και άλλοι να μην μπορούν να ικανοποιήσουν όλα τα αιτήματα των χρηστών . Αυτό έχει άμεσο αντίκτυπο στην ποιότητα της υπηρεσίας ( QoS ) που έχουν οι χρήστες του δικτύου .

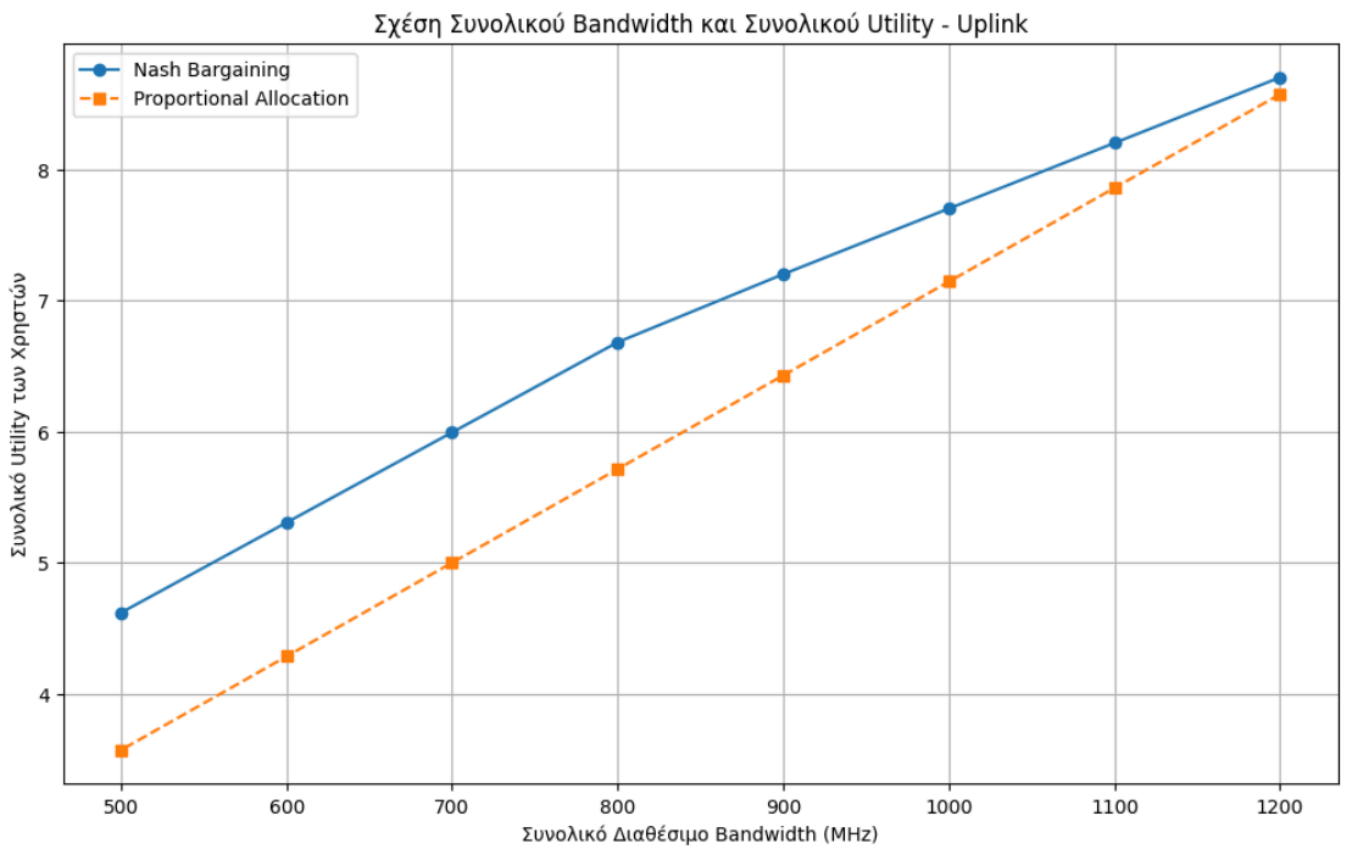
Όσον αφορά την ενεργειακή κατανάλωση η οποία έχει βασικό ρόλο στο utility των χρηστών , στην περίπτωση του Matching-Game μέσω του αλγόριθμου Gale-Shapley είναι χαμηλότερη σε σχέση με την τυχαία κατανομή . Αυτό συμβαίνει διότι οι χρήστες συνδέονται σε σταθμούς που βρίσκονται πιο κοντά, μειώνοντας την ενέργεια που απαιτείται για τη διατήρηση της σύνδεσης. Επιπλέον, η ισορροπημένη κατανομή των χρηστών διασφαλίζει ότι η ενέργεια κατανέμεται αποτελεσματικά μεταξύ όλων των σταθμών. Στην περίπτωση της τυχαίας κατανομής αυτή οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, κυρίως λόγω της υπερφόρτωσης συγκεκριμένων σταθμών και της ανάγκης για αυξημένη ισχύ για να καλυφθούν οι χρήστες που βρίσκονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Οι σταθμοί που υπερ φορτώνονται καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια για να εξυπηρετήσουν πολλούς χρήστες, ενώ οι απομακρυσμένοι χρήστες απαιτούν περισσότερη ισχύ για να διατηρηθεί η σύνδεσή τους.

Συνολικά, ο αλγόριθμος Gale-Shapley υπερτερεί όσον αφορά την αποδοτικότητα του δικτύου, προσφέροντας καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας στους χρήστες και εξοικονομώντας ενέργεια ενώ ταυτοχρόνως μειώνει τις πιθανότητες συμφόρησης των small cell ή macro cell. Αντίθετα, η τυχαία κατανομή οδηγεί σε χαμηλότερη απόδοση και μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση, με αποτέλεσμα χαμηλότερο τελικό utility. Η ενεργειακή αποδοτικότητα σε συνδυασμό με την έξυπνη κατανομή των χρηστών καθιστά τον αλγόριθμο Gale-Shapley σαφώς πιο αποτελεσματικό.

## 8.3 Αποτελέσματα κατανομής Bandwidth

### 8.3.1 Ανάλυση Αποτελεσμάτων για Uplink

Στην εικόνα 8.5 φαίνεται η σχέση ανάμεσα στα επιτυχανόμενα utility στις 2 περιπτώσεις. Για το uplink, παρατηρούμε μια συστηματική αύξηση του συνολικού utility καθώς το διαθέσιμο bandwidth αυξάνεται. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο Nash Bargaining αλγόριθμος επιτυγχάνει μεγαλύτερο συνολικό utility συγκριτικά με την αναλογική κατανομή.



Εικόνα 8.5: Σχέση Utility - Διαθέσιμου Bandwidth (Uplink)

Είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί ότι η διαφορά είναι πιο έντονη όταν το διαθέσιμο bandwidth είναι χαμηλό, γεγονός που δείχνει την αποτελεσματικότητα του Nash Bargaining σε περιπτώσεις περιορισμένων πόρων.

## **Συνολικό Utility των Χρηστών**

Το συνολικό utility των χρηστών είναι η πιο σημαντική μέτρηση, καθώς αντιπροσωπεύει την αποτελεσματικότητα της κατανομής bandwidth. Όπως φαίνεται ενδεικτικά στις εικόνες 8.6 , 8.7 ο Nash Bargaining επιτυγχάνει μεγαλύτερη συνολική utility στις περισσότερες περιπτώσεις, ιδίως όταν το διαθέσιμο bandwidth είναι περιορισμένο.

- Στην περίπτωση 1200 MHz διαθέσιμου bandwidth, το συνολικό utility για τον Nash Bargaining είναι 8.70, ενώ για την Αναλογική Κατανομή είναι 8.57. Η διαφορά είναι μικρή, καθώς το μεγάλο bandwidth επιτρέπει σε όλους τους χρήστες να λάβουν αρκετούς πόρους, αλλά η βελτιστοποίηση του Nash Bargaining εξακολουθεί να δίνει πλεονέκτημα.
- Όσο μειώνεται το διαθέσιμο bandwidth, η διαφορά στη συνολική utility γίνεται πιο εμφανής. Για παράδειγμα, με 600 MHz bandwidth, το συνολικό utility του Nash Bargaining είναι 5.31, ενώ της Αναλογικής Κατανομής είναι 4.29. Σε αυτές τις συνθήκες, ο Nash Bargaining καταφέρνει να εκμεταλλευτεί τους περιορισμένους πόρους πιο αποδοτικά.



--- Διαθέσιμο Bandwidth: 1200 MHz ---

Κατανομή με Nash Bargaining:

Χρήστης 1 (HD Streaming): 168.00 MHz, Utility: 0.84  
Χρήστης 2 (HD Streaming): 168.00 MHz, Utility: 0.84  
Χρήστης 3 (HD Streaming): 168.00 MHz, Utility: 0.84  
Χρήστης 4 (HD Streaming): 168.00 MHz, Utility: 0.84  
Χρήστης 5 (HD Streaming): 168.00 MHz, Utility: 0.84  
Χρήστης 6 (Web Browsing): 90.00 MHz, Utility: 0.90  
Χρήστης 7 (Web Browsing): 90.00 MHz, Utility: 0.90  
Χρήστης 8 (Web Browsing): 90.00 MHz, Utility: 0.90  
Χρήστης 9 (E-mail): 45.00 MHz, Utility: 0.90  
Χρήστης 10 (E-mail): 45.00 MHz, Utility: 0.90  
Συνολικό Utility Nash Bargaining: 8.70

Κατανομή με Αναλογική Κατανομή:

Χρήστης 1 (HD Streaming): 171.43 MHz, Utility: 0.86  
Χρήστης 2 (HD Streaming): 171.43 MHz, Utility: 0.86  
Χρήστης 3 (HD Streaming): 171.43 MHz, Utility: 0.86  
Χρήστης 4 (HD Streaming): 171.43 MHz, Utility: 0.86  
Χρήστης 5 (HD Streaming): 171.43 MHz, Utility: 0.86  
Χρήστης 6 (Web Browsing): 85.71 MHz, Utility: 0.86  
Χρήστης 7 (Web Browsing): 85.71 MHz, Utility: 0.86  
Χρήστης 8 (Web Browsing): 85.71 MHz, Utility: 0.86  
Χρήστης 9 (E-mail): 42.86 MHz, Utility: 0.86  
Χρήστης 10 (E-mail): 42.86 MHz, Utility: 0.86  
Συνολικό Utility Αναλογικής Κατανομής: 8.57

Εικόνα 8.6: Αναλυτικές κατανομές - 1200 MHz

--- Διαθέσιμο Bandwidth: 600 MHz ---

Κατανομή με Nash Bargaining:

Χρήστης 1 (HD Streaming): 63.75 MHz, Utility: 0.32  
Χρήστης 2 (HD Streaming): 63.75 MHz, Utility: 0.32  
Χρήστης 3 (HD Streaming): 63.75 MHz, Utility: 0.32  
Χρήστης 4 (HD Streaming): 63.75 MHz, Utility: 0.32  
Χρήστης 5 (HD Streaming): 63.75 MHz, Utility: 0.32  
Χρήστης 6 (Web Browsing): 63.75 MHz, Utility: 0.64  
Χρήστης 7 (Web Browsing): 63.75 MHz, Utility: 0.64  
Χρήστης 8 (Web Browsing): 63.75 MHz, Utility: 0.64  
Χρήστης 9 (E-mail): 45.00 MHz, Utility: 0.90  
Χρήστης 10 (E-mail): 45.00 MHz, Utility: 0.90  
Συνολικό Utility Nash Bargaining: 5.31

Κατανομή με Αναλογική Κατανομή:

Χρήστης 1 (HD Streaming): 85.71 MHz, Utility: 0.43  
Χρήστης 2 (HD Streaming): 85.71 MHz, Utility: 0.43  
Χρήστης 3 (HD Streaming): 85.71 MHz, Utility: 0.43  
Χρήστης 4 (HD Streaming): 85.71 MHz, Utility: 0.43  
Χρήστης 5 (HD Streaming): 85.71 MHz, Utility: 0.43  
Χρήστης 6 (Web Browsing): 42.86 MHz, Utility: 0.43  
Χρήστης 7 (Web Browsing): 42.86 MHz, Utility: 0.43  
Χρήστης 8 (Web Browsing): 42.86 MHz, Utility: 0.43  
Χρήστης 9 (E-mail): 21.43 MHz, Utility: 0.43  
Χρήστης 10 (E-mail): 21.43 MHz, Utility: 0.43  
Συνολικό Utility Αναλογικής Κατανομής: 4.29

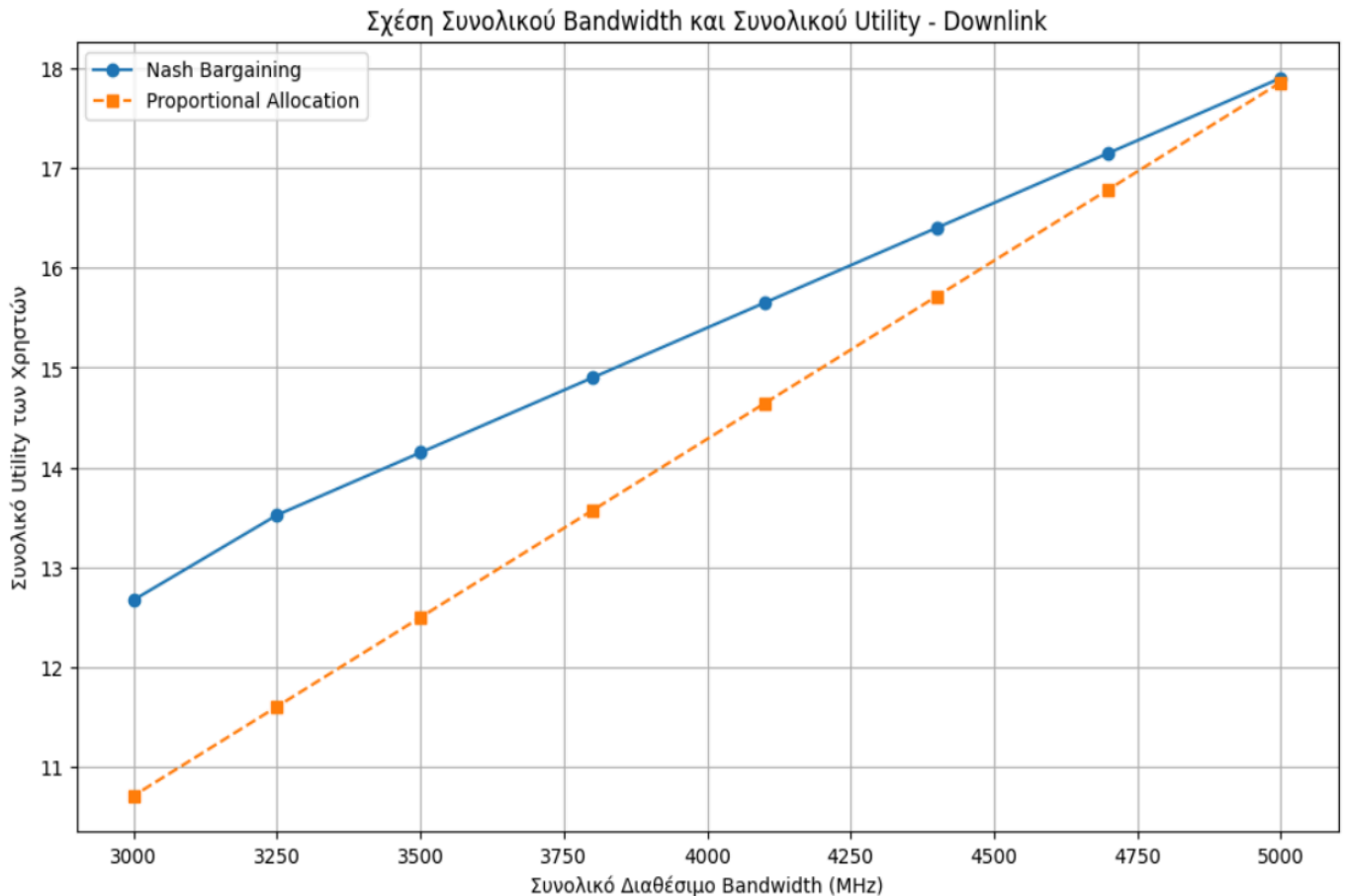
Εικόνα 8.7: Αναλυτικές κατανομές - 600 MHz

### **Ενεργειακή Αποδοτικότητα**

Σημαντικό παράγοντα στην αξιολόγηση της αποδοτικότητας του Nash Bargaining παίζει εξίσου και η ενεργειακή κατανάλωση. Ο αλγόριθμος καταφέρνει να μειώσει την κατανομή του bandwidth σε χρήστες με υψηλές απαιτήσεις (π.χ. HD Streaming) όταν αυτό δεν είναι αποδοτικό, κάτι που συνεισφέρει στη μείωση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης των σταθμών βάσης. Σε αντίθεση, η Αναλογική Κατανομή, παρόλο που εξυπηρετεί τις ανάγκες των χρηστών με υψηλές απαιτήσεις, οδηγεί σε υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση καθώς δεν προσαρμόζεται στις συνθήκες και τις ανάγκες του δικτύου.

### 8.3.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων για Downlink

Στην περίπτωση της κατανομής Bandwidth στο Downlink, η ανάλυση του Nash Bargaining και της Αναλογικής Κατανομής εμφανίζει παρόμοια μοτίβα με το Uplink, με συγκεκριμένες διαφορές λόγω του μεγαλύτερου διαθέσιμου εύρους ζώνης και της αυξημένης σημασίας του Downlink στη συνολική απόδοση του δικτύου.



Εικόνα 8.8: Σχέση Utility - Διαθέσιμου Bandwidth (Downlink)

Τα αποτελέσματα δείχνουν:

#### 1. Απόδοση Nash Bargaining:

- Όπως φαίνεται από τις τιμές των utility στην εικόνα 8.8 το Nash Bargaining διατηρεί πλεονέκτημα, αποδίδοντας υψηλότερο συνολικό utility, ειδικά όταν το διαθέσιμο bandwidth αυξάνεται, όπως στην περίπτωση των 4400 MHz. Σε αυτή την περίπτωση, το συνολικό utility φτάνει το 16.40, έναντι του 15.71 της Αναλογικής Κατανομής.

- Το utility των χρηστών με υπηρεσίες HD Streaming και Web Browsing αυξάνεται σταδιακά με την αύξηση του διαθέσιμου bandwidth, ενώ οι χρήστες που εκτελούν E-mail (με χαμηλές απαιτήσεις bandwidth) παραμένουν σε υψηλό επίπεδο utility (0.90).

## 2. Αναλογική Κατανομή:

- Η αναλογική κατανομή ακολουθεί μια πιο ισομερή προσέγγιση στην κατανομή του bandwidth, αλλά υστερεί σε σύγκριση με το Nash Bargaining, λόγω του ότι δεν λαμβάνει υπόψη την ισορροπία των απαιτήσεων μεταξύ των χρηστών και των διαφορετικών υπηρεσιών. Αν και η απόδοση βελτιώνεται με το διαθέσιμο bandwidth, δεν φτάνει τα επίπεδα του Nash Bargaining.

## 3. Συνολικό Utility και Κατανομή Εύρους Ζώνης:

- Όπως και στο Uplink, το Nash Bargaining καταφέρνει να προσφέρει καλύτερη ισορροπία μεταξύ χρηστών με υψηλές και χαμηλές απαιτήσεις. Ειδικότερα, οι χρήστες που εκτελούν απαιτητικές λειτουργίες όπως HD Streaming επωφελοούνται από την πιο δίκαιη κατανομή του εύρους ζώνης, σε αντίθεση με την Αναλογική Κατανομή που δίνει μεγαλύτερη προσοχή στην ίση κατανομή χωρίς να εξετάζει τις συγκεκριμένες ανάγκες κάθε χρήστη.



# Κεφάλαιο 9 : Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

## 9.1 Συμπεράσματα

Η εργασία αυτή επικεντρώθηκε στη χρήση τεχνικών θεωρίας παιγνίων για την αποδοτικότερη διαχείριση πόρων σε ασύρματα δίκτυα 5G, ενσωματώνοντας την τεχνολογία DUDe (Downlink-Uplink Decoupling). Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε υλοποίηση και ανάλυση δύο διαφορετικών αλγορίθμων από τη θεωρία παιγνίων, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της κατανομής των χρηστών, της ενέργειας και του bandwidth σε δίκτυα 5G. Ο αλγόριθμος Gale-Shapley και ο αλγόριθμος Nash Bargaining, που αναπτύχθηκε για αυτήν την εφαρμογή, ενσωματώθηκαν σε προσομοιώσεις σε διαφορετικά σενάρια δικτύων με διαφορετικές απαιτήσεις και περιορισμούς για αξιολόγηση.

Ο στόχος της εφαρμογής του αλγόριθμου Gale-Shapley ήταν η βέλτιστη αντιστοίχιση μεταξύ χρηστών και σταθμών βάσης (macro και small cells), λαμβάνοντας υπόψη τις προτιμήσεις και τις χωρητικότητες τους. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος προσομοιώνει την αντιστοίχιση των χρηστών με σταθμούς βάσης μέσω ενός "παιχνιδιού αντιστοίχισης", όπου κάθε χρήστης προσπαθεί να συνδεθεί με τον καλύτερο δυνατό σταθμό, ενώ κάθε σταθμός επιλέγει τους χρήστες που εξυπηρετούν την καλύτερη χρήση των πόρων του. Αυτό το μοντέλο διασφαλίζει μια αποτελεσματική και δίκαιη κατανομή των χρηστών, διατηρώντας παράλληλα την ισορροπία μεταξύ ποιότητας υπηρεσίας και αποδοτικότητας στη διαχείριση των πόρων του δικτύου. Επιπλέον, δίνεται έμφαση στην ενεργειακή κατανάλωση, καθώς κάθε απόφαση αντιστοίχισης λαμβάνει υπόψη και την ενέργεια που καταναλώνεται τόσο από τον χρήστη όσο και από τον σταθμό βάσης. Οι προσομοιώσεις αποδεικνύουν ότι ο αλγόριθμος Gale-Shapley επιτυγχάνει βέλτιστη χρήση των πόρων και μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση στο δίκτυο.

Ο αλγόριθμος Nash Bargaining, ο οποίος αναπτύχθηκε για την κατανομή του bandwidth, επέδειξε σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την προσαρμοστικότητα και την αποδοτικότητα. Ο μηχανισμός αυτός βασίζεται στη λογική της διαπραγμάτευσης (Bargaining Games), όπου κάθε χρήστης προσπαθεί να μεγιστοποιήσει το "utility" του, με στόχο την ισορροπημένη κατανομή των διαθέσιμων πόρων (bandwidth). Σε σύγκριση με απλούστερες μεθόδους κατανομής, όπως η αναλογική κατανομή, ο αλγόριθμος Nash Bargaining επιτρέπει την εξισορρόπηση των συμφερόντων μεταξύ χρηστών, εξασφαλίζοντας καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας, ιδιαίτερα σε συνθήκες περιορισμένου διαθέσιμου bandwidth. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η κατανομή μέσω Nash Bargaining επιτυγχάνει

υψηλότερο συνολικό utility για τους χρήστες, σε σύγκριση με την απλή αναλογική κατανομή, ιδιαίτερα όταν οι διαθέσιμοι πόροι είναι περιορισμένοι. Η δυνατότητα προσαρμογής του αλγορίθμου σε διαφορετικά σενάρια χρήσης και η ευελιξία του να ανταποκρίνεται στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις των χρηστών, τον καθιστούν ιδανικό για την κατανομή bandwidth σε δίκτυα επόμενης γενιάς.

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των παραπάνω μηχανισμών κατέδειξαν τη σαφή αποδοτικότητα των προτεινόμενων μηχανισμών σε περιβάλλοντα 5G. Η εφαρμογή των αλγορίθμων σε πραγματικά σενάρια δικτύων έδειξε ότι μπορούν να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση του δικτύου, τόσο από άποψη ποιότητας υπηρεσίας όσο και από άποψη ενεργειακής αποδοτικότητας. Το matching game του Gale-Shapley και ο μηχανισμός Nash Bargaining απέδειξαν ότι είναι εξαιρετικά εργαλεία για τη βέλτιστη διαχείριση των πόρων σε δίκτυα υψηλής πυκνότητας αναδεικνύοντας την δυναμική μιας επιστήμης όπως η Θεωρία Παιγνίων στην τεχνολογία DUE.

## 9.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα εργασία δείχνει πώς η θεωρία παιγνίων χρησιμοποιείται δυναμικά στην κατανομή πόρων, επιδεικνύοντας την αποδοτικότητα μηχανισμών όπως το matching game και το Nash bargaining στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης χρηστών, ενέργειας και bandwidth. Ωστόσο, η εξέλιξη των δικτυακών συστημάτων οδηγεί σε νέες απαιτήσεις και δυνατότητες που ανοίγουν νέους ορίζοντες για περαιτέρω έρευνα. Δίνονται τρεις βασικές προτάσεις για πιθανές μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις.

Μια σημαντική προοπτική για μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να είναι η ανάπτυξη προηγμένων μοντέλων παιγνίων για τη διαχείριση πόρων με εστίαση στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Καθώς αυξάνεται η ανάγκη για βιώσιμα και ενεργειακά αποδοτικά δίκτυα, απαιτείται η δημιουργία αλγορίθμων που μειώνουν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου. Αυτοί οι αλγόριθμοι χρησιμοποιούν τη θεωρία παιγνίων για να βελτιστοποιήσουν ταυτόχρονα την κατανομή ενέργειας και bandwidth, με στόχο τη μείωση της ενεργειακής σπατάλης. Συγκεκριμένα, ένα παιχνίδι που είναι υβριδικό και επιτρέπει στους χρήστες και τους σταθμούς βάσης να προσαρμόζονται δυναμικά για να αποφεύγουν καταστάσεις υψηλής κατανάλωσης, θα μπορούσε να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση, ενισχύοντας την αποδοτικότητα των τηλεπικοινωνιακών δικτύων και συμβάλλοντας σε πιο «πράσινες» υποδομές.

Μια διαφορετική προσέγγιση μελέτης εστιάζει στη δίκαιη κατανομή του bandwidth σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα χρηστών, μέσω της χρήσης παιγνίων ενισχυμένης μάθησης. Σε τέτοιες περιστάσεις, η δικαιοσύνη στην κατανομή των

πόρων είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ποιότητας της υπηρεσίας. Η ένωση ερευνητικών προσεγγίσεων που συνδυάζουν παιγνιο θεωρητικά μοντέλα με αλγόριθμους ενισχυμένης μάθησης μπορεί να εξασφαλίσει αυτόματη ρύθμιση του bandwidth σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβαλλόμενες συνθήκες και τις ανάγκες των χρηστών. Αυτοί οι αλγόριθμοι επιτρέπουν στα δίκτυα να μαθαίνουν από τη συμπεριφορά των χρηστών, παρέχοντας λογικές κατανομές που ελαχιστοποιούν τη συμφόρηση και μεγιστοποιούν την ικανοποίηση των χρηστών κατά την αύξηση της ζήτησης.

Τέλος, η χρήση υβριδικών μηχανισμών που συνδυάζουν συνεργατικά και μη συνεργατικά παιχνίδια αποτελεί μια ελκυστική κατεύθυνση έρευνας για πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Η απαίτηση για υβριδικά μοντέλα κατανομής πόρων προκύπτει από την πολυπλοκότητα των δικτύων και τις διαφοροποιημένες ανάγκες των χρηστών. Αυτά τα μοντέλα μπορεί να λάβουν υπόψη τους ταυτόχρονα την κατανάλωση ενέργειας, το διαθέσιμο bandwidth και τις ανάγκες για ποιότητα υπηρεσίας, επιτυγχάνοντας ισορροπία μεταξύ της ανταγωνιστικής και συνεργατικής συμπεριφοράς των χρηστών. Οι υβριδικοί μηχανισμοί θα προσαρμόζονται δυναμικά για να παρέχουν αυξημένη ανθεκτικότητα και αποδοτικότητα, ακόμα και σε περιβάλλοντα με πολύπλοκες απαιτήσεις.

Οι προαναφερθείσες κατευθύνσεις ερευνών ενδέχεται να συμβάλλουν σημαντικά στην ανάπτυξη αποδοτικών και βιώσιμων δικτύων, ενισχύοντας την ευελιξία και ανθεκτικότητα των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών υποδομών.



# Κεφάλαιο 10 : Βιβλιογραφία - Αναφορές

- [1] Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C., & Zhang, J. C. "What will 5G be?" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 2014
- [2] Xin Liu , Ran Li , Kai Luo , Tao Jiang  
"Downlink\_and\_Uplink\_Decoupling\_in\_Heterogeneous\_Networks\_for\_5G\_and\_Beyond" 2018
- [3] Niu, Z., Zhang, Y., & Pan, Z. "Energy-efficient resource management in 5G." *IEEE Wireless Communications* 2015
- [4] Humayun Zubair Khan , Mudassar Ali , Muhammad Naeem , Imran Rashid , Adil Masood Siddiqui , Muhammad Imran  
"Resource\_Allocation\_and\_Throughput\_Maximization\_in\_Decoupled\_5G" IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) 2020
- [5] Sun, S., Yin, C., Gao, Y., Wang, Z., & Han, C. "Interference management through joint resource allocation in 5G heterogeneous networks." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 2019
- [6] Han, Z., Niyato, D., Saad, W., Basar, T., & Debbah, M. "Game theory in wireless and communication networks: Theory, models, and applications." Cambridge University Press 2012
- [7] Zhu, Y., Zhu, W., & Gong, W. "Energy-efficient resource allocation for 5G ultra-dense networks." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 2019
- [8] Niyato, D., Xiao, L., & Hossain, E. "Game-theoretic modeling of traffic in 5G networks." *IEEE Wireless Communications* 2016
- [9] Gupta, A., & Jha, R. K. "A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies." *IEEE Access* 2015
- [10] Taleb, T., Samdanis, K., Mada, B., Flinck, H., Dutta, S., & Sabella, D. "On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5G network edge cloud architecture and orchestration." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 2017
- [11] Agiwal, M., Roy, A., & Saxena, N. "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 2016
- [12] Al-Falahy, N., & Alani, O. Y. "Technologies for 5G networks: Challenges and opportunities." *IT Professional* 2017

- [13] P. Rost, C. Mannweiler, D. S. Michalopoulos, C. Sartori, V. Sciancalepore, N. Sastry, O. Holland, S. Tayade, B. Han, D. Bega, D. Aziz, H. Bakker “Network slicing to enable scalability and flexibility in 5G mobile networks.” *IEEE Communications Magazine* 2016
- [14] Bennis, M., Debbah, M., & Poor, H. V. “Ultra-reliable and low-latency wireless communication: Tail, risk, and scale.” *Proceedings of the IEEE* 2018
- [15] Li, X., Li, J., Zhang, Z., Liu, X., & Zhang, S. “Joint downlink and uplink resource allocation for 5G decoupled access networks.” *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 2021
- [16] Xu, H., Wei, Z., Wu, H., & Ding, G. “Performance analysis of downlink and uplink decoupled access in 5G heterogeneous networks.” *IEEE Communications Magazine* 2020
- [17] Lin, X., Li, A., Gao, Y., & Popovski, P. “On the decoupling of downlink and uplink in 5G heterogeneous networks.” *Journal of Telecommunication Systems* 2021
- [18] Meng, Y., Zheng, L., & Guo, S. “Energy-efficient uplink and downlink decoupling in ultra-dense networks.” *Elsevier Computer Networks* 2022
- [19] Katz, D., & Chowdhury, A. “Architectural challenges of decoupled uplink and downlink communications in 5G systems.” *Telecommunications Policy* 2020
- [20] Boccardi, F., Heath, R. W., Lozano, A., Marzetta, T. L., & Popovski, P. “Five disruptive technology directions for 5G.” *IEEE Communications Magazine* 2021
- [21] Ye, Q., Jin, S., Wong, K. K., Duong, T. Q., & Zhu, H. “Game theory and resource allocation for 5G cellular networks: A survey.” *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 2016
- [22] Sun, Y., Peng, M., Mao, S., Wang, C., & Vucetic, B. “Resource allocation for network slicing in 5G telecommunication networks: A survey of principles and models.” *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 2018
- [23] Liu, G., Lv, T., Lu, Y., & Yang, Y. (2018) “Downlink and uplink decoupling in 5G heterogeneous networks: Challenges, solutions, and future directions.” *IEEE Wireless Communications* 2018
- [24] Bennis, M., Debbah, M., & Poor, H. V. “Ultra-reliable and low-latency wireless communication: Tail, risk, and scale.” *Proceedings of the IEEE* 2018
- [25] Saad, W., Han, Z., Poor, H. V., & Basar, T. “Game theory-based dynamic resource management in 5G heterogeneous cellular networks.” *IEEE Transactions on Wireless Communications* 2019
- [26] Basar, T., & Olsder, G. J. “*Dynamic noncooperative game theory*” 1999
- [27] Nash, J. “Two-person cooperative games.” *Econometrica* 1953
- [28] Saad, W., Han, Z., Debbah, M., Hjørungnes, A., & Basar, T. “Coalitional game theory for communication networks: A tutorial and survey of recent advances.” *IEEE Signal Processing Magazine* 2019

- [29] Samson L., Hamidou T. "Game Theory and Learning for Wireless Networks Fundamentals and Applications" 2011
- [30] Liu, G., Lv, T., Lu, Y., & Yang, Y. "Bargaining theory for resource allocation in 5G networks: Algorithms and applications." *IEEE Wireless Communications* 2021
- [31] Wang, R., Wang, Y., & Liu, H. "Dynamic game theory models for resource allocation in 5G networks." *IEEE Access* 2020
- [32] Gale, D., & Shapley, L. S. "College admissions and the stability of marriage." *The American Mathematical Monthly* 1962
- [33] Nash, J. "The bargaining problem." *Econometrica* 1950
- [34] Katerina Smiljkovikj, Liljana Gavrilovska, Petar Popovski "Efficiency Analysis of Downlink and Uplink Decoupling in Heterogeneous Networks" *IEEE ICC* 2015
- [35] Yingjie Ma , Nan Zhang , Jie Li. "Improved Sequential Least Squares Programming–Driven Feasible Path Algorithm for Process Optimisation" 2022

# Παράρτημα A: < Κώδικας υλοποίησης αλγόριθμου Gale-Shapley σε matching game >

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Αρχικές συνθήκες
num_users = 70
num_macro_cells = 4
num_small_cells = 16
capacity_macro = 20
capacity_small = 5
area_size = 100

# Σταθερές θέσεις για τα macro cells και small cells
macro_positions = np.array([[2, 2], [2, 8], [8, 2], [8, 8]])
small_positions = np.array([
    [1, 9], [3, 9], [1, 7], [3, 7],
    [7, 9], [9, 9], [7, 7], [9, 7],
    [1, 3], [3, 3], [7, 3], [9, 3],
    [1, 1], [3, 1], [7, 1], [9, 1]
])

# Δημιουργία τυχαίων θέσεων για τους χρήστες
np.random.seed(0)
user_positions = np.random.uniform(0, np.sqrt(area_size), size=(num_users, 2))

# Παράμετροι ισχύος
transmit_power_macro = 40 # dBm για macro cells
transmit_power_small = 30 # dBm για small cells

# Υπολογισμός απόστασης με προσαρμογή στις διαστάσεις
def calculate_distance(pos1, pos2):
    if pos1.ndim == 1:
        pos1 = pos1[np.newaxis, :]
```

```

if pos2.ndim == 1:
    pos2 = pos2[np.newaxis, :]
return np.linalg.norm(pos1 - pos2, axis=1)

# Υπολογισμός SINR
def calculate_sinr(power, distance):
    path_loss = 10 * np.log10(distance + 1) # Απλό μοντέλο path loss
    noise = -90 # dBm, θόρυβος
    sinr = power - path_loss - noise
    return 10 ** (sinr / 10) # Μετατροπή σε αναλογία

# Υπολογισμός throughput με βάση το SINR
def calculate_throughput(sinr, bandwidth):
    return bandwidth * np.log2(1 + sinr)

# Συνάρτηση υπολογισμού utility
def calculate_utility(throughput_ul, throughput_dl):
    return throughput_ul + throughput_dl

# Προσαρμοσμένος αλγόριθμος Gale-Shapley για περιορισμένη χωρητικότητα
def gale_shapley_capacity(user_prefs, bs_prefs, capacities, ul_connections,
max_iterations=1000):
    num_users = user_prefs.shape[0]
    num_bs = capacities.shape[0]
    user_engaged = -np.ones(num_users, dtype=int)
    bs_engaged = [[] for _ in range(num_bs)]
    user_proposals = np.zeros(num_users, dtype=int)
    iterations = 0

    while np.any(user_engaged == -1) and np.any(user_proposals < num_bs) and
iterations < max_iterations:
        iterations += 1
        for user in range(num_users):
            if user_engaged[user] == -1 and user_proposals[user] < num_bs:
                bs = user_prefs[user, user_proposals[user]]
                user_proposals[user] += 1

                if len(bs_engaged[bs]) < capacities[bs] and (ul_connections is None or
ul_connections[user] != bs):
                    bs_engaged[bs].append(user)
                    user_engaged[user] = bs
                else:

```

```

        current_users = bs_engaged[bs]
        if current_users:
            worst_user = max(current_users, key=lambda x: np.where(bs_prefs[:,
bs] == x)[0][0])
            worst_user_rank = np.where(bs_prefs[:, bs] == worst_user)[0][0]
            new_user_rank = np.where(bs_prefs[:, bs] == user)[0][0]

            if new_user_rank < worst_user_rank and (ul_connections is None or
ul_connections[user] != bs):
                bs_engaged[bs].remove(worst_user)
                bs_engaged[bs].append(user)
                user_engaged[user] = bs
                user_engaged[worst_user] = -1

    return user_engaged, bs_engaged

```

```

# Δυναμική προσαρμογή συνδέσεων προς επίτευξη ισορροπίας Nash
def nash_equilibrium(users, macro_positions, small_positions, macro_capacities,
small_capacities, max_iters=100):

```

```

    # Αρχικές συνδέσεις με Gale-Shapley
    ul_engaged, ul_bs_engaged = gale_shapley_capacity(users['prefs_ul'],
users['bs_prefs_ul'], small_capacities, ul_connections=None)
    dl_engaged, dl_bs_engaged = gale_shapley_capacity(users['prefs_dl'],
users['bs_prefs_dl'], macro_capacities, ul_connections=ul_engaged)

```

```

    for _ in range(max_iters):
        changes = False

```

```

        for user in range(len(users['positions'])):
            current_ul = ul_engaged[user]
            current_dl = dl_engaged[user]

```

```

            # Υπολογισμός του τρέχοντος utility
            if current_ul != -1:
                dist_ul = calculate_distance(users['positions'][user],
small_positions[current_ul]).item()
                sinr_ul = calculate_sinr(transmit_power_small, dist_ul).item()
                throughput_ul = calculate_throughput(sinr_ul, 10).item() # Bandwidth UL
            else:
                throughput_ul = 0

```

```

            if current_dl != -1:

```

```

        dist_dl = calculate_distance(users['positions'][user],
macro_positions[current_dl]).item()
        sinr_dl = calculate_sinr(transmit_power_macro, dist_dl).item()
        throughput_dl = calculate_throughput(sinr_dl, 20).item() # Bandwidth DL
    else:
        throughput_dl = 0

    current_utility = calculate_utility(throughput_ul, throughput_dl)

    # Έλεγχος εναλλακτικών συνδέσεων για βελτίωση
    for new_ul in range(len(small_positions)):
        if new_ul != current_ul and len(ul_bs_engaged[new_ul]) <
small_capacities[new_ul]:
            new_dist_ul = calculate_distance(users['positions'][user],
small_positions[new_ul]).item()
            new_sinr_ul = calculate_sinr(transmit_power_small, new_dist_ul).item()
            new_throughput_ul = calculate_throughput(new_sinr_ul, 10).item()

            new_utility = calculate_utility(new_throughput_ul, throughput_dl)
            if new_utility > current_utility:
                # Έλεγχος αν ο χρήστης βρίσκεται στη λίστα πριν την αφαίρεση
                if user in ul_bs_engaged[current_ul]:
                    ul_bs_engaged[current_ul].remove(user)
                ul_bs_engaged[new_ul].append(user)
                ul_engaged[user] = new_ul
                current_utility = new_utility
                changes = True
                print(f"Χρήστης {user+1} άλλαξε UL σύνδεση - Νέο Utility:
{current_utility:.2f}")

            for new_dl in range(len(macro_positions)):
                if new_dl != current_dl and len(dl_bs_engaged[new_dl]) <
macro_capacities[new_dl]:
                    new_dist_dl = calculate_distance(users['positions'][user],
macro_positions[new_dl]).item()
                    new_sinr_dl = calculate_sinr(transmit_power_macro, new_dist_dl).item()
                    new_throughput_dl = calculate_throughput(new_sinr_dl, 20).item()

                    new_utility = calculate_utility(throughput_ul, new_throughput_dl)
                    if new_utility > current_utility:
                        # Έλεγχος αν ο χρήστης βρίσκεται στη λίστα πριν την αφαίρεση
                        if user in dl_bs_engaged[current_dl]:

```

```

        dl_bs_engaged[current_dl].remove(user)
        dl_bs_engaged[new_dl].append(user)
        dl_engaged[user] = new_dl
        current_utility = new_utility
        changes = True
        print(f"Χρήστης {user+1} άλλαξε DL σύνδεση - Νέο Utility:
{current_utility:.2f}")

    if not changes:
        print("Ισορροπία Nash επιτεύχθηκε.")
        break # Αν δεν υπάρχουν αλλαγές, έχουμε φτάσει σε ισορροπία Nash

return ul_engaged, dl_engaged

# Δημιουργία χρηστών με αρχικές προτιμήσεις
users = {
    'positions': user_positions,
    'prefs_ul': np.argsort([calculate_distance(user, small_positions) for user in
user_positions], axis=1),
    'prefs_dl': np.argsort([-calculate_sinr(transmit_power_macro,
calculate_distance(user, macro_positions)) for user in user_positions], axis=1),
    'bs_prefs_ul': np.argsort(np.argsort([calculate_distance(user, small_positions) for
user in user_positions], axis=0), axis=0),
    'bs_prefs_dl': np.argsort(np.argsort([-calculate_sinr(transmit_power_macro,
calculate_distance(user, macro_positions)) for user in user_positions], axis=0),
axis=0)
}

# Εκτέλεση της διαδικασίας επίτευξης ισορροπίας Nash
ul_final, dl_final = nash_equilibrium(users, macro_positions, small_positions,
np.full(num_macro_cells, capacity_macro), np.full(num_small_cells, capacity_small))

# Εμφάνιση των τελικών αποτελεσμάτων και του τελικού utility κάθε χρήστη
print("\nΤελικά Utilities όλων των χρηστών:")
utilities = [] # Λίστα για αποθήκευση των utilities όλων των χρηστών

for i in range(num_users):
    current_ul = ul_final[i]
    current_dl = dl_final[i]

    if current_ul != -1:

```



```

    dist_ul = calculate_distance(users['positions'][i],
small_positions[current_ul]).item()
    sinr_ul = calculate_sinr(transmit_power_small, dist_ul).item()
    throughput_ul = calculate_throughput(sinr_ul, 10).item() # Bandwidth UL
else:
    throughput_ul = 0

if current_dl != -1:
    dist_dl = calculate_distance(users['positions'][i],
macro_positions[current_dl]).item()
    sinr_dl = calculate_sinr(transmit_power_macro, dist_dl).item()
    throughput_dl = calculate_throughput(sinr_dl, 20).item() # Bandwidth DL
else:
    throughput_dl = 0

final_utility = calculate_utility(throughput_ul, throughput_dl)
utilities.append(final_utility) # Αποθήκευση του utility στη λίστα

# Εκτύπωση των τελικών utilities όλων των χρηστών
for i, utility in enumerate(utilities):
    print(f"Χρήστης {i+1}: Utility = {utility:.2f}")

# Υπολογισμός του συνολικού utility όλων των χρηστών
total_utility = sum(utilities)
print(f"\nΣυνολικό Utility όλων των χρηστών: {total_utility:.2f}")

# Οπτικοποίηση του δικτύου
plt.figure(figsize=(10, 10))

# Σχεδίαση των macro και small cells
plt.scatter(macro_positions[:, 0], macro_positions[:, 1], c='red', marker='s', s=200,
label='Macro Cells')
plt.scatter(small_positions[:, 0], small_positions[:, 1], c='green', marker='^', s=150,
label='Small Cells')

# Σχεδίαση των χρηστών
plt.scatter(user_positions[:, 0], user_positions[:, 1], c='blue', marker='o', s=100,
label='Users')

# Σχεδίαση των συνδέσεων UL και DL
for i in range(num_users):
    ul_cell = ul_final[i]

```

```
dl_cell = dl_final[i]

if ul_cell != -1: # Σχεδίαση σύνδεσης UL
    plt.plot([user_positions[i, 0], small_positions[ul_cell, 0]],
             [user_positions[i, 1], small_positions[ul_cell, 1]], 'g--', linewidth=0.8)

if dl_cell != -1: # Σχεδίαση σύνδεσης DL
    plt.plot([user_positions[i, 0], macro_positions[dl_cell, 0]],
             [user_positions[i, 1], macro_positions[dl_cell, 1]], 'r-', linewidth=0.8)

plt.title("Οπτικοποίηση Δικτύου με Συνδέσεις UL και DL")
plt.xlabel("X Position")
plt.ylabel("Y Position")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

# Παράρτημα Β: < Κώδικας υλοποίησης αλγόριθμου Nash Bargaining στην κατανομή Bandwidth >

## UPLINK

```
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize
import matplotlib.pyplot as plt

# Αριθμός χρηστών που είναι συνδεδεμένοι στο small cell
num_users_in_cell = 10 # Παράδειγμα με 10 χρήστες στο small cell

# Κατηγορίες απαιτήσεων bandwidth (MHz)
bandwidth_requirements = {
    'HD Streaming': 200, # Κατηγορία HD Streaming: 200 MHz
    'Web Browsing': 100, # Κατηγορία Web Browsing: 100 MHz
    'E-mail': 50      # Κατηγορία E-mail: 50 MHz
}

# Χειροκίνητη κατανομή των χρηστών σε κατηγορίες απαιτήσεων bandwidth
# 5 χρήστες στην κατηγορία HD Streaming, 3 στην κατηγορία Web Browsing, και 2
# στην κατηγορία E-mail
user_bandwidth_category = np.array(['HD Streaming']*5 + ['Web Browsing']*3 +
['E-mail']*2)

# Όριο ικανοποίησης - κανένας χρήστης δεν παίρνει πάνω από το 90% του
# ζητούμενου bandwidth
satisfaction_limit = 0.9

# Υπολογισμός utility για τον κάθε χρήστη βάσει του allocated bandwidth
def calculate_utility(bandwidth_allocated, bandwidth_required):
    return min(bandwidth_allocated, bandwidth_required) / bandwidth_required #
Utility μεταξύ 0 και 1

# Συνάρτηση απωλειών για το Nash Bargaining
```

```

def nash_bargaining_loss(allocations, bandwidth_requirements,
user_bandwidth_category):
    # Υπολογίζουμε τα utilities για όλους τους χρήστες
    utilities = [calculate_utility(allocations[i],
bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[i]]) for i in
range(num_users_in_cell)]
    # Στόχος είναι να μεγιστοποιήσουμε το προϊόν των utilities (logarithmic)
    log_utilities = np.log(utilities)
    return -np.sum(log_utilities) # Χρησιμοποιούμε αρνητικό για να κάνουμε
ελαχιστοποίηση (αντί για μεγιστοποίηση)

# Περιορισμοί για το optimization: το άθροισμα των κατανομών πρέπει να είναι <=
small_cell_bandwidth
def bandwidth_constraint(allocations, small_cell_bandwidth):
    return small_cell_bandwidth - np.sum(allocations)

# Περιορισμός για το 90% ικανοποίησης
def satisfaction_constraint(allocations, bandwidth_requirements,
user_bandwidth_category):
    constraints = []
    for i in range(num_users_in_cell):
        required_bandwidth = bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[i]]
        allocated_bandwidth = allocations[i]
        max_allowed_bandwidth = satisfaction_limit * required_bandwidth
        constraints.append(max_allowed_bandwidth - allocated_bandwidth) #
Διασφαλίζουμε ότι allocated <= 90% του required
    return np.array(constraints)

# ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ 2: ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ
def proportional_allocation(user_bandwidth_category, bandwidth_requirements,
small_cell_bandwidth):
    # Υπολογισμός συνολικής ζήτησης
    total_demand = sum(bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[user]]
for user in range(num_users_in_cell))

    # Αν η συνολική ζήτηση είναι μικρότερη από το διαθέσιμο bandwidth, όλοι
παίρνουν το πλήρες
    if total_demand <= small_cell_bandwidth:
        return [bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[i]] for i in
range(num_users_in_cell)]

    # Αναλογική κατανομή με 90% satisfaction limit

```

```

    scaling_factor = small_cell_bandwidth / total_demand
    allocations = [min(bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[i]] *
scaling_factor,
                    satisfaction_limit *
bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[i]])
                    for i in range(num_users_in_cell)]
    return allocations

# Διαθέσιμες τιμές bandwidth για το πείραμα
bandwidth_values = [1200, 1100, 1000, 900, 800, 700, 600, 500]

# Λίστες για την αποθήκευση των συνολικών utilities
total_utilities_nash = []
total_utilities_prop = []

# Υπολογισμός του συνολικού utility για κάθε τιμή bandwidth
for small_cell_bandwidth in bandwidth_values:
    print(f"\n--- Διαθέσιμο Bandwidth: {small_cell_bandwidth} MHz ---")

    # Nash Bargaining Allocation
    initial_allocations = np.full(num_users_in_cell, small_cell_bandwidth /
num_users_in_cell)
    bounds = [(0, bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[i]]) for i in
range(num_users_in_cell)]
    constraints = [{'type': 'ineq', 'fun': bandwidth_constraint, 'args':
(small_cell_bandwidth,)},
                  {'type': 'ineq', 'fun': satisfaction_constraint, 'args':
(bandwidth_requirements, user_bandwidth_category)}]

    result = minimize(nash_bargaining_loss, initial_allocations,
args=(bandwidth_requirements, user_bandwidth_category),
                    method='SLSQP', bounds=bounds, constraints=constraints)

    user_allocations_nash = result.x
    user_utilities_nash = [calculate_utility(user_allocations_nash[i],
bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[i]]) for i in
range(num_users_in_cell)]
    total_utility_nash = sum(user_utilities_nash)
    total_utilities_nash.append(total_utility_nash)

    print("\nΚατανομή με Nash Bargaining:")
    for i in range(num_users_in_cell):

```

```

    print(f"Χρήστης {i+1} ({user_bandwidth_category[i]}):
{user_allocations_nash[i]:.2f} MHz, Utility: {user_utilities_nash[i]:.2f}")
    print(f"Συνολικό Utility Nash Bargaining: {total_utility_nash:.2f}")

# Proportional Allocation
user_allocations_prop = proportional_allocation(user_bandwidth_category,
bandwidth_requirements, small_cell_bandwidth)
user_utilities_prop = [calculate_utility(user_allocations_prop[i],
bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[i]]) for i in
range(num_users_in_cell)]
total_utility_prop = sum(user_utilities_prop)
total_utilities_prop.append(total_utility_prop)

print("\nΚατανομή με Αναλογική Κατανομή:")
for i in range(num_users_in_cell):
    print(f"Χρήστης {i+1} ({user_bandwidth_category[i]}):
{user_allocations_prop[i]:.2f} MHz, Utility: {user_utilities_prop[i]:.2f}")
    print(f"Συνολικό Utility Αναλογικής Κατανομής: {total_utility_prop:.2f}")

# Σχεδίαση του γραφήματος
plt.figure(figsize=(12, 7))
plt.plot(bandwidth_values, total_utilities_nash, marker='o', linestyle='-', label='Nash
Bargaining')
plt.plot(bandwidth_values, total_utilities_prop, marker='s', linestyle='--',
label='Proportional Allocation')
plt.xlabel('Συνολικό Διαθέσιμο Bandwidth (MHz)')
plt.ylabel('Συνολικό Utility των Χρηστών')
plt.title('Σχέση Συνολικού Bandwidth και Συνολικού Utility - Uplink')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

```

## DOWNLINK

```
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize
import matplotlib.pyplot as plt

# Αριθμός χρηστών που είναι συνδεδεμένοι στο macro cell
num_users_in_cell = 20 # Παράδειγμα με 20 χρήστες στο macro cell

# Κατηγορίες απαιτήσεων bandwidth (MHz)
bandwidth_requirements = {
    'HD Streaming': 400, # Κατηγορία HD Streaming: 400 MHz
    'Web Browsing': 200, # Κατηγορία Web Browsing: 200 MHz
    'E-mail': 100      # Κατηγορία E-mail: 100 MHz
}

# Χειροκίνητη κατανομή των χρηστών σε κατηγορίες απαιτήσεων bandwidth
# 10 χρήστες στην κατηγορία HD Streaming, 6 στην κατηγορία Web Browsing, και 4
# στην κατηγορία E-mail
user_bandwidth_category = np.array(['HD Streaming']*10 + ['Web Browsing']*6 +
['E-mail']*4)

# Όριο ικανοποίησης - κανένας χρήστης δεν παίρνει πάνω από το 90% του
# ζητούμενου bandwidth
satisfaction_limit = 0.9

# Υπολογισμός utility για τον κάθε χρήστη βάσει του allocated bandwidth
def calculate_utility(bandwidth_allocated, bandwidth_required):
    return min(bandwidth_allocated, bandwidth_required) / bandwidth_required #
Utility μεταξύ 0 και 1

# Συνάρτηση απωλειών για το Nash Bargaining
def nash_bargaining_loss(allocations, bandwidth_requirements,
user_bandwidth_category):
    # Υπολογίζουμε τα utilities για όλους τους χρήστες
    utilities = [calculate_utility(allocations[i],
bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[i]]) for i in
range(num_users_in_cell)]
    # Στόχος είναι να μεγιστοποιήσουμε το προϊόν των utilities (logarithmic)
    log_utilities = np.log(utilities)
```

```

    return -np.sum(log_utilities) # Χρησιμοποιούμε αρνητικό για να κάνουμε
ελαχιστοποίηση (αντί για μεγιστοποίηση)

# Περιορισμοί για το optimization: το άθροισμα των κατανομών πρέπει να είναι <=
small_cell_bandwidth
def bandwidth_constraint(allocations, small_cell_bandwidth):
    return small_cell_bandwidth - np.sum(allocations)

# Περιορισμός για το 90% ικανοποίησης
def satisfaction_constraint(allocations, bandwidth_requirements,
user_bandwidth_category):
    constraints = []
    for i in range(num_users_in_cell):
        required_bandwidth = bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[i]]
        allocated_bandwidth = allocations[i]
        max_allowed_bandwidth = satisfaction_limit * required_bandwidth
        constraints.append(max_allowed_bandwidth - allocated_bandwidth) #
Διασφαλίζουμε ότι allocated <= 90% του required
    return np.array(constraints)

# ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ 2: ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ
def proportional_allocation(user_bandwidth_category, bandwidth_requirements,
small_cell_bandwidth):
    # Υπολογισμός συνολικής ζήτησης
    total_demand = sum(bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[user]]
for user in range(num_users_in_cell))

    # Αν η συνολική ζήτηση είναι μικρότερη από το διαθέσιμο bandwidth, όλοι
παίρνουν το πλήρες
    if total_demand <= small_cell_bandwidth:
        return [bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[i]] for i in
range(num_users_in_cell)]

    # Αναλογική κατανομή με 90% satisfaction limit
    scaling_factor = small_cell_bandwidth / total_demand
    allocations = [min(bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[i]] *
scaling_factor,
satisfaction_limit *
bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[i]])
for i in range(num_users_in_cell)]
    return allocations

```



```

# Διαθέσιμες τιμές bandwidth για το πείραμα
bandwidth_values = [5000, 4700, 4400 , 4100, 3800, 3500, 3250, 3000, ]

# Λίστες για την αποθήκευση των συνολικών utilities
total_utilities_nash = []
total_utilities_prop = []

# Υπολογισμός του συνολικού utility για κάθε τιμή bandwidth
for small_cell_bandwidth in bandwidth_values:
    print(f"\n--- Διαθέσιμο Bandwidth: {small_cell_bandwidth} MHz ---")

    # Nash Bargaining Allocation
    initial_allocations = np.full(num_users_in_cell, small_cell_bandwidth /
num_users_in_cell)
    bounds = [(0, bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[i]]) for i in
range(num_users_in_cell)]
    constraints = [{'type': 'ineq', 'fun': bandwidth_constraint, 'args':
(small_cell_bandwidth,)},
{'type': 'ineq', 'fun': satisfaction_constraint, 'args':
(bandwidth_requirements, user_bandwidth_category)}]

    result = minimize(nash_bargaining_loss, initial_allocations,
args=(bandwidth_requirements, user_bandwidth_category),
method='SLSQP', bounds=bounds, constraints=constraints)

    user_allocations_nash = result.x
    user_utilities_nash = [calculate_utility(user_allocations_nash[i],
bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[i]]) for i in
range(num_users_in_cell)]
    total_utility_nash = sum(user_utilities_nash)
    total_utilities_nash.append(total_utility_nash)

    print("\nΚατανομή με Nash Bargaining:")
    for i in range(num_users_in_cell):
        print(f"Χρήστης {i+1} ({user_bandwidth_category[i]}):
{user_allocations_nash[i]:.2f} MHz, Utility: {user_utilities_nash[i]:.2f}")
    print(f"Συνολικό Utility Nash Bargaining: {total_utility_nash:.2f}")

    # Proportional Allocation
    user_allocations_prop = proportional_allocation(user_bandwidth_category,
bandwidth_requirements, small_cell_bandwidth)

```

```

    user_utilities_prop = [calculate_utility(user_allocations_prop[i],
bandwidth_requirements[user_bandwidth_category[i]]) for i in
range(num_users_in_cell)]
    total_utility_prop = sum(user_utilities_prop)
    total_utilities_prop.append(total_utility_prop)

    print("\nΚατανομή με Αναλογική Κατανομή:")
    for i in range(num_users_in_cell):
        print(f"Χρήστης {i+1} ({user_bandwidth_category[i]}):
{user_allocations_prop[i]:.2f} MHz, Utility: {user_utilities_prop[i]:.2f}")
        print(f"Συνολικό Utility Αναλογικής Κατανομής: {total_utility_prop:.2f}")

```

# Σχεδίαση του γραφήματος

```

plt.figure(figsize=(12, 7))
plt.plot(bandwidth_values, total_utilities_nash, marker='o', linestyle='-', label='Nash
Bargaining')
plt.plot(bandwidth_values, total_utilities_prop, marker='s', linestyle='--',
label='Proportional Allocation')
plt.xlabel('Συνολικό Διαθέσιμο Bandwidth (MHz)')
plt.ylabel('Συνολικό Utility των Χρηστών')
plt.title('Σχέση Συνολικού Bandwidth και Συνολικού Utility - Downlink')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

```