



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΑΝΑΘΕΣΗ ΠΟΡΩΝ & ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΣΕ  
ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΡΑΤΟΥ  
ΦΩΤΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΓΙΑΛΑΓΚΟΛΙΔΗ ΙΑΚΩΒΟΥ

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2015





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΑΝΑΘΕΣΗ ΠΟΡΩΝ & ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΣΕ  
ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΡΑΤΟΥ  
ΦΩΤΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΓΙΑΛΑΓΚΟΛΙΔΗ ΙΑΚΩΒΟΥ

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την

.....

Συμεών Παπαβασιλείου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Μιχαήλ Θεολόγου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ιωάννα Ρουσσάκη

Επίκουρος Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2015



Γιαλαγκολίδης Ιάκωβος

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

Copyright © Γιαλαγκολίδης Ιάκωβος , 2015.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της κατανομής πόρων σε ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας με τη χρήση συχνοτήτων του ορατού φωτός (Visible Light Communication – VLC), στη ζεύξη ανόδου. Για τη μοντελοποίηση της λαμβανόμενης ικανοποίησης των χρηστών του δικτύου έχουμε υιοθετήσει τη συνάρτηση χρησιμότητας (utility function), η οποία εκφράζει το μέτρο της ευχαρίστησης που δέχονται οι χρήστες, ανάλογα με την ποιότητα υπηρεσίας που τους παρέχεται. Επιπρόσθετα, έχουμε προτείνει αλγόριθμους που στοχεύουν στη μεγιστοποίηση αυτής της συνάρτησης, για τον κάθε χρήστη ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους περιορισμούς για την ισχύ εκπομπής.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί αλγόριθμοι κατανομής πόρων, ο ένας βασισμένος στην Ορθογώνια Πολυπλεξία με Διαίρεση Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA), και ο άλλος στη Μη-Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση (Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA) και τα αποτελέσματά τους συγκρίθηκαν και αξιολογήθηκαν με κατάλληλες προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε.

Λέξεις κλειδιά: ασύρματη επικοινωνία ορατού φωτός (VLC), συνάρτηση χρησιμότητας, κατανομή πόρων, ζεύξη ανόδου, OFDMA, NOMA



# ABSTRACT

In this thesis, the problem of resource allocation in the uplink of wireless Visible Light Communication networks (VLC) is studied. Each user adopts a generic utility function, which reflects his degree of satisfaction based on the fulfillment of his Quality of Service (QoS) prerequisites. The problem of distributed resource allocation is formulated and solved, while the decision making process lies on the user. Furthermore, distributed and iterative algorithms are proposed aiming at maximizing each user's utility function considering the constraints of uplink transmission power.

Within the proposed analysis, two different resource allocation algorithms have been implemented. The first algorithm is based on Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) and the second one is based on Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA). Finally, detailed comparative numerical results are presented illustrating the operational characteristics of the proposed algorithms and their applicability in resource allocation scenarios in the uplink of Visible Light Communication networks.

Keywords: Visible Light Communication (VLC), utility function, resource allocation, uplink, OFDMA, NOMA





# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Συμεών Παπαβασιλείου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση ενός καινοτόμου και ιδιαίτερα απαιτητικού θέματος και τη μεταδιδάκτορα κα Ειρήνη- Ελένη Τσιροπούλου, για την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθειά της καθόλη τη διάρκεια της συγγραφής αυτής της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στους φίλους μου Αντρέα, Θανάση, Ηλία, Σεραφείμ, Φάνη, Τάκη, Φώτη, Νίκο, Μιχάλη, Γρηγόρη, Αλέξανδρο, Γιάννη, Βασίλη, Αποστόλη, για την αγάπη, τη στήριξη και την ανοχή που μου δείχνουν, όλα τα χρόνια που με ξέρουν.



*Αφιερώνεται στη μητέρα μου Ευαγγελία, στον πατέρα μου Δημήτρη  
και στην αδερφή μου Βίκη*

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	6
ABSTRACT .....	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	15
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> .....	17
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	17
1.1 Εισαγωγή.....	18
1.2 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας.....	19
1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> .....	22
ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΟΡΑΤΟΥ ΦΩΤΟΣ (VISIBLE LIGHT COMMUNICATION – VLC).....	22
2.1 Εισαγωγή-ιστορική αναδρομή.....	23
2.2 Περιγραφή συστήματος VLC.....	24
2.3 Σύγκριση VLC με RF Επικοινωνίες.....	30
2.4 Εφαρμογές VLC.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> .....	37
ΠΡΟΫΠΑΡΧΟΥΣΑ ΈΡΕΥΝΑ .....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> .....	48
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	48
4.1 Εισαγωγή.....	49
4.2 Ορισμός των Μεγεθών του Συστήματος.....	49
4.3 Αλγόριθμοι Κατανομής Πόρων.....	51
4.3.1 Αλγόριθμος Κατανομής Πόρων με Τεχνική OFDMA .....	51
4.3.1.1 Υπολογισμός OAP που Συνδέεται ο Κάθε Χρήστης.....	52
4.3.1.2 Κατανομή Υποφερουσών.....	52
4.3.1.3 Υπολογισμός Βέλτιστης Ισχύος Εκπομπής.....	53
4.3.1.4 Επανάληψη της Διαδικασίας.....	56
4.3.2 Αλγόριθμος Κατανομής Πόρων με Τεχνική NOMA .....	56
4.3.2.1 Διαφορές στην Υλοποίηση των Δύο Αλγορίθμων .....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	59
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	59
5.1 Εισαγωγή.....	60

5.2 Ορισμός Παραμέτρων του Συστήματος .....	60
5.3 Σενάρια Προσομοίωσης .....	61
5.3.1 1 <sup>ο</sup> Σενάριο Προσομοίωσης με Ομοιόμορφη Κατανομή των Χρηστών στο Χώρο. 61	
5.3.2 2 <sup>ο</sup> Σενάριο Προσομοίωσης με Πυκνή Κατανομή των Χρηστών στο Χώρο.....	67
5.4 Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων.....	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	84
ΕΠΙΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ.....	84
6.1 Επίλογος.....	85
6.2 Μελλοντική Εργασία.....	85
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	87

# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας .....	18
Σχήμα 2. Μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος VLC. ....	24
Σχήμα 3. Φωτοσυλλέκτης (Optical concentrator). ....	25
Σχήμα 4. Οπτικό φίλτρο (optical filter).....	25
Σχήμα 5. Πλήρες τερματικό σύστημα ενός πομποδέκτη VLC.....	25
Σχήμα 6. Τρόποι παραγωγής λευκού φωτός. ....	26
Σχήμα 7. Διαμόρφωση υποφερουσών στην OFDMA. ....	27
Σχήμα 8 Διαμόρφωση των υποφερουσών σε Resource Blocks (Subchannels).....	27
Σχήμα 9 Μπλοκ διάγραμμα OFDMA. ....	28
Σχήμα 10. Μοντέλο διάδοσης LOS και NLOS ζεύξης σε VLC.....	28
Σχήμα 11. Έξυπνος φωτισμός ενός σπιτιού. ....	33
Σχήμα 12. Συνδυασμός κλασσικών μεθόδων με VLC για το φωτισμό σπιτιού.....	34
Σχήμα 13. Προειδοποίηση αυτοκινήτων για την θέση τους σε περίπτωση απότομου φρεναρίσματος. ....	34
Σχήμα 14 Επικοινωνία αυτοκινήτου με το περιβάλλον μέσω VLC.....	35
Σχήμα 15. Χρησιμοποίηση VLC σε νοσοκομείο. ....	35
Σχήμα 16. Χρησιμοποίηση VLC σε αεροπλάνο. ....	36
Σχήμα 17. Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου υπολογισμού των παρεμβολών.....	55
Σχήμα 18. Τοπολογία με ομοιόμορφη κατανομή των χρηστών. ....	62
Σχήμα 19. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-1. ....	63
Σχήμα 20. Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών του OAP-1.....	63
Σχήμα 21. Παρεμβολές των χρηστών του OAP-1.....	64
Σχήμα 22. Μέση τιμή ισχύος εκπομπής για κάθε OAP.....	65
Σχήμα 23. Μέση τιμή ρυθμού μετάδοσης για κάθε OAP. ....	66
Σχήμα 24. Μέση τιμή παρεμβολών για κάθε OAP. ....	66
Σχήμα 25. Ανομοιόμορφη τοπολογία.....	67
Σχήμα 26. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-1. ....	68
Σχήμα 27. Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών του OAP-1.....	68
Σχήμα 28. Παρεμβολές των χρηστών του OAP-1.....	69
Σχήμα 29. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-2. ....	69
Σχήμα 30. Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών του OAP-2.....	70
Σχήμα 31. Παρεμβολές των χρηστών του OAP-2.....	70
Σχήμα 32. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-3. ....	71
Σχήμα 33. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-4. ....	72
Σχήμα 34. Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών του OAP-4.....	72
Σχήμα 35. Παρεμβολές των χρηστών του OAP-4.....	73
Σχήμα 36. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-5. ....	73
Σχήμα 37. Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών του OAP-5.....	74
Σχήμα 38. Παρεμβολές των χρηστών του OAP-5.....	74
Σχήμα 39. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-6. ....	75
Σχήμα 40. Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών του OAP-6.....	75
Σχήμα 41. Παρεμβολές των χρηστών του OAP-6.....	76
Σχήμα 42. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-7. ....	76
Σχήμα 43. Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών του OAP-7.....	77

Σχήμα 44. Παρεμβολές των χρηστών του OAP-7.....	77
Σχήμα 45. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-8. ....	78
Σχήμα 46. Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών του OAP-8.....	78
Σχήμα 47 . Παρεμβολές των χρηστών του OAP-8.....	79
Σχήμα 48. Μέση τιμή ισχύος εκπομπής για κάθε OAP.....	79
Σχήμα 49. Μέση τιμή ρυθμού μετάδοσης για τους χρήστες κάθε OAP. ....	80
Σχήμα 50. Μέση τιμή παρεμβολών για τους χρήστες κάθε OAP. ....	80
Σχήμα 51. Συνολική ισχύς εκπομπής του συστήματος για αυξανόμενο αριθμό χρηστών. ....	83
Σχήμα 52. Συνολικός επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης του συστήματος για αυξανόμενο αριθμό χρηστών.....	83

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Σύγκριση VLC με RF επικοινωνίες. ....	32
Πίνακας 2. Παράμετροι του συστήματος. ....	61

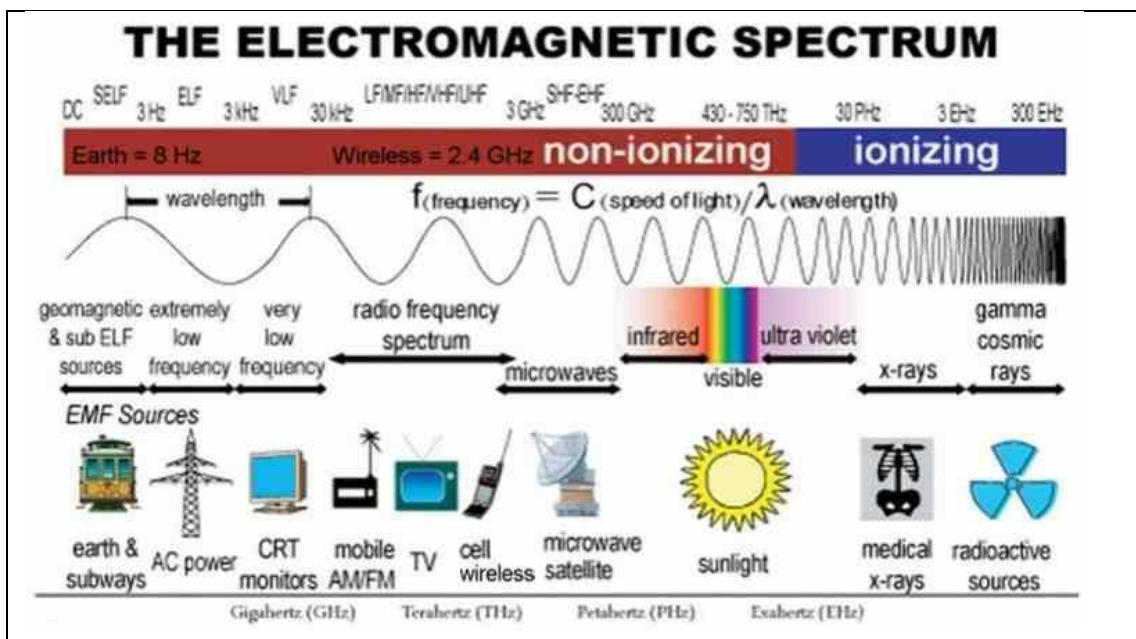


# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>**

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

# 1.1 Εισαγωγή

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας σε όλους τους τομείς τα τελευταία χρόνια, έχει επηρεάσει αναπόφευκτα και το κομμάτι των τηλεπικοινωνιών. Ο μεγάλος αριθμός νέων εφαρμογών και τεχνολογιών που έχουν δημιουργηθεί (ψηφιακή τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, video κλήση, Internet υψηλών ταχυτήτων, live streaming και video on demand), έχουν αυξήσει τον όγκο της μεταδιδόμενης υπηρεσίας, και έχουν καταστήσει ακόμα επιτακτικότερη την ανάγκη για μεγαλύτερο εύρος ζώνης μετάδοσης της πληροφορίας. Έτσι, με την συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για εύρος ζώνης, είναι προφανές πως τα υπάρχοντα ενσύρματα δίκτυα επικοινωνιών και τα ασύρματα δίκτυα σε RF συχνότητες δεν θα είναι αρκετά για να ικανοποιήσουν τους χρήστες. Για όλους αυτούς τους λόγους, τα τελευταία χρόνια έχει εντατικοποιηθεί η έρευνα για υπηρεσίες μέσω των συχνοτήτων του ορατού φωτός (οπτικές ίνες, ασύρματη επικοινωνία).



Σχήμα 1. Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Καθώς αυξάνεται το πλήθος των νέων διαθέσιμων εφαρμογών δημιουργούνται χρήστες με τεράστια ποικιλομορφία ως προς τις απαιτήσεις που έχουν από τις νέες τεχνολογίες, και με διαφορετικές ανάγκες για ποιότητα υπηρεσίας (QoS-Quality of Service). Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου θέματος, στην ανάλυση των χρηστών τέτοιων ασύρματων δικτύων χρησιμοποιείται ευρέως τόσο στην έρευνα όσο και στην βιβλιογραφία η έννοια της συνάρτησης χρησιμότητας-

ευχαρίστησης (utility function). Με τον τρόπο αυτόν είναι ευκολότερη η μοντελοποίηση των χρηστών ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις τους. Ο κάθε χρήστης ατομικά επιδιώκει την καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας που μπορεί να λάβει, με βελτιστοποίηση (ή σε άλλες περιπτώσεις ελαχιστοποίηση) της συνάρτησης ευχαρίστησής του. Έτσι έχουμε μια άπληστη (greedy) λογική που επιβαρύνει το σύστημα και καθιστά δυσκολότερη την αποδοτικότερη κατανομή των διαθέσιμων πόρων. Τέτοιες παράμετροι που βοηθούν στην ομαλή λειτουργία του συστήματος χρήστες-δίκτυο είναι το διαθέσιμο εύρος ζώνης, και άρα ο ρυθμός μετάδοσης για κάθε χρήστη, η ισχύς εκπομπής, και άλλες που δεν μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Πολλές μέθοδοι για τον προσδιορισμό των παραπάνω μεταβλητών έχουν μελετηθεί στην διεθνή βιβλιογραφία, κάποιες από τις οποίες θα αναλυθούν εκτενώς στη συνέχεια. [1], [2], [3], [4], [5]

Η κατανομή των διαθέσιμων πόρων σε ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας είναι ένα από τα βασικότερα ζητήματα στην ανάλυση τέτοιων δικτύων, αφού πρέπει να διασφαλίζεται η όσο το δυνατόν καλύτερη ποιότητα παρεχόμενης υπηρεσίας στους χρήστες. Ταυτόχρονα, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και κάποιος μηχανισμός διατήρησης της δικαιοσύνης στο σύστημα, καθώς ένας χρήστης δεν μπορεί να μονοπωλεί την χρησιμοποίηση των πόρων του συστήματος.

## 1.2 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την μελέτη ενός συστήματος ασύρματης επικοινωνίας μέσω του ορατού φωτός (Visible Light Communication-VLC). Η VLC είναι μια ιδιαίτερα καινοτόμα τεχνολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη σύνδεση συσκευών σε εξωτερικό χώρο, αλλά κυρίως σε εσωτερικούς χώρους. Συνδυάζει τον φωτισμό μιας περιοχής με την ταυτόχρονη μεταφορά δεδομένων (data, φωνή, video). Πιο συγκεκριμένα, έχουμε θεωρήσει ένα σύστημα με κατάλληλους πομποδέκτες που λειτουργούν στις συχνότητες του ορατού φωτός και πετυχαίνουν τη μετάδοση πληροφορίας. Μελετάμε την κατανομή των διαθέσιμων πόρων του συστήματος που είναι το εύρος ζώνης των συχνοτήτων και η ισχύς εκπομπής του τερματικού του κάθε χρήστη, με ενιαίο τρόπο (joint power and frequency allocation), δηλαδή για κάθε χρήστη υπολογίζουμε τις συχνότητες λειτουργίας και την ισχύ εκπομπής του με κριτήριο την μεγιστοποίηση μιας

κατάλληλης συνάρτησης ευχαρίστησης που έχουμε ορίσει. Έχουμε επικεντρωθεί στην ανάλυση της προς τα άνω ζεύξης (uplink), δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο αποστέλλει ο χρήστης την πληροφορία του προς τον σταθμό βάσης και όχι το αντίστροφο, δηλαδή την προς τα κάτω ζεύξη (downlink), η οποία έχει μελετηθεί διεξοδικά τα τελευταία χρόνια σε όλων των ειδών τα δίκτυα.

Για τον προσδιορισμό του εύρους συχνοτήτων στις οποίες θα μπορεί να λαμβάνει και να στέλνει δεδομένα ο κάθε χρήστης έχουμε χρησιμοποιήσει δύο διαφορετικές τεχνικές, την Ορθογώνια Πολυπλεξία με Διαίρεση Συχνότητας (OFDMA-Orthogonal Frequency Division Multiple Access), και τη Μη-Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση (Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA), χρησιμοποιώντας διαφορετικούς αλγόριθμους διαμοιρασμού των συχνοτήτων και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα. Παράλληλα, υπολογίζουμε την ισχύ εκπομπής, ώστε να μεγιστοποιείται η λαμβανόμενη ικανοποίησή του με βάση τη συνάρτηση ευχαρίστησης. Για τον υπολογισμό της ισχύος εκπομπής χρησιμοποιούμε έναν επαναληπτικό αλγόριθμο ο οποίος συγκλίνει, ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν χαμηλότερη κατανάλωση.

Για να επαληθεύουμε τη χρησιμότητα των αλγορίθμων που έχουμε χρησιμοποιήσει, τόσο για το διαμοιρασμό της συχνότητας, αλλά και τον επαναληπτικό αλγόριθμο για τον υπολογισμό της ισχύος εκπομπής, χρησιμοποιήσαμε το Matlab, όπου προσομοιώσαμε διαφορετικά σενάρια, έχοντας πλέον τους αλγόριθμους σε μορφή κώδικα. Τα αποτελέσματα παρατίθενται και σχολιάζονται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας

## **1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας**

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά στα κεφάλαια της παρούσας εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά όλες οι λεπτομέρειες ενός συστήματος VLC, μαζί με μια σύντομη ιστορική αναδρομή και μια αναφορά στις εφαρμογές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια επισκόπηση της προϋπάρχουσας έρευνας πάνω στο αντικείμενο που μελετάμε, για να βρεθούν τα σημεία στα οποία πρέπει να δοθεί περισσότερη ερευνητική σημασία. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζουμε αναλυτικά όλες τις παραμέτρους του προβλήματος

που αντιμετωπίζουμε, ορίζουμε τη συνάρτηση ευχαρίστησης και περιγράφουμε τους αλγορίθμους που θα χρησιμοποιήσουμε. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις που διεξήγαμε μαζί με σχόλια και συμπεράσματα. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο έχουμε τον επίλογο της εργασίας και γίνεται αναφορά στις προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν ακόμα και σε τομείς που μπορεί να υπάρξει μελλοντική έρευνα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>**

### **ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΟΡΑΤΟΥ ΦΩΤΟΣ (VISIBLE LIGHT COMMUNICATION – VLC)**

## 2.1 Εισαγωγή-ιστορική αναδρομή

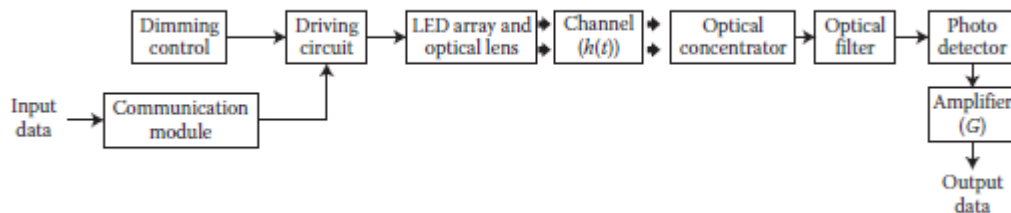
Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί η έρευνα πάνω στην ασύρματη επικοινωνία μέσω του ορατού φωτός (Visible Light Communication-VLC) και στη χρήση συσκευών τόσο για φωτισμό, όσο και για μετάδοση δεδομένων. Κύριος λόγος είναι το γεγονός πως με τη μεγάλη αύξηση των νέων εφαρμογών και τεχνολογιών που είναι πλέον διαθέσιμες στην αγορά, υπάρχει αυξημένη ανάγκη για περισσότερο αξιοποιήσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων, κάτι που οι κλασικές ραδιοεπικοινωνίες (RF) δεν μπορούν να προσφέρουν. Επιπλέον, η πρόοδος στην έρευνα για συσκευές που μπορούν να υποστηρίξουν την ταυτόχρονη μετάδοση πληροφορίας με τον φωτισμό (πχ LEDs-Light Emitting Diodes) και για συσκευές που μπορούν να δεχτούν και να αποκωδικοποιήσουν το παραπάνω σήμα (πχ φωτοανιχνευτές, φωτοδίοδοι, ενισχυτές), έχουν κάνει ακόμα πιο πρόσφορο το έδαφος για την περαιτέρω μελέτη και χρησιμοποίηση της VLC.

Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η VLC τεχνολογία είχε βρει τις πρώτες της εφαρμογές στην αρχαιότητα με τους φάρους φωτιάς να λειτουργούν ως προειδοποιητικά και ενημερωτικά σήματα. Αργότερα ακολούθησαν τα σήματα καπνού από τους ινδιάνους της Αμερικής μέχρι να φτάσουμε στο 1790 και τον οπτικό τηλέγραφο που επινοήθηκε από τον Claude Chappe στην Γαλλία και βρήκε εφαρμογές στη ναυσιπλοΐα. Το πρώτο όμως σοβαρό δείγμα οπτικής επικοινωνίας θεωρείται το πείραμα με το φωτόφωνο του Alexander Graham Bell το 1880, όπου έγινε μετάδοση φωνής μέσω μιας οπτικής δέσμης ηλιακού φωτός για περίπου 200 μέτρα, το οποίο όμως και πάλι δεν θεωρήθηκε ιδιαίτερα επιτυχές, καθώς βασιζόνταν σε μια πηγή φωτός η οποία είναι ασταθής, όπως ο ήλιος. Η πραγματική επανάσταση στις οπτικές επικοινωνίες ήρθε το 1960 με την ανακάλυψη των laser, τα οποία επέτρεψαν τη μεταφορά πληροφορίας σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις και με πολύ καλύτερα αποτελέσματα. Από τότε εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας έχουν χρησιμοποιηθεί από τον στρατό για μυστικές υπηρεσίες αλλά και από την NASA για διαστημικές αποστολές. Άλλες σημαντικές ημερομηνίες στην πορεία εξέλιξης των οπτικών επικοινωνιών είναι το 1993 όπου δημιουργείται το πρώτο πρότυπο για υπέρυθρες ακτινοβολίες (Open standard for IR data communications-The Infrared Data Association (IrDA)), το 2003 όπου έχουμε το πρώτο συνέδριο για VLC στην Ιαπωνία (The Visible Light Communications Consortium (VLCC)-Japan) και το 2009

όπου έχουμε το πρώτο επίσημο πρότυπο για VLC (IEEE802 15 7—Standard on VLC). [6], [7]

## 2.2 Περιγραφή συστήματος VLC

Στο Σχήμα 2 βλέπουμε σε μορφή μπλοκ διαγράμματος από τι αποτελείται μια VLC ζεύξη. Τα δεδομένα εισόδου κωδικοποιούνται με κάποιο κατάλληλο σχήμα διαμόρφωσης (Communication module) και εισέρχονται σε ένα κύκλωμα που ρυθμίζει πότε πρέπει να έχουμε εκπομπή φωτός και πότε όχι (Driving circuit), προκειμένου να έχουμε τον καλύτερο ρυθμό εκπομπής. Σε αυτό το βήμα είναι ιδιαίτερα σημαντική η ανάπτυξη των LEDs, καθώς έχουν πλέον τη δυνατότητα να τίθενται εντός και εκτός λειτουργίας πολύ γρήγορα και χωρίς να γίνονται αντιληπτά από το ανθρώπινο μάτι, πετυχαίνοντας έτσι ιδιαίτερα υψηλές συχνότητες λειτουργίας αλλά και παλμούς με χαμηλή ισχύ εκπομπής. Στη συνέχεια ο οπτικός παλμός φτάνει στους δέκτες, όπου χρησιμοποιείται ένας οπτικός συλλέκτης (Optical concentrator), ένα φίλτρο με φωτοανιχνευτή (Optical filter , photodetector) και τέλος ένας ενισχυτής (Amplifier).



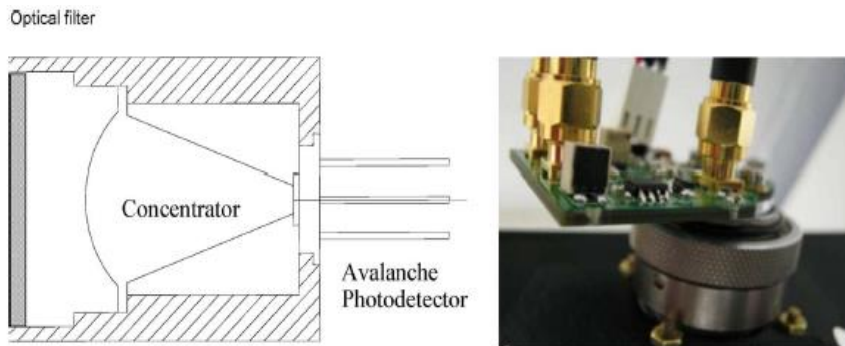
Σχήμα 2. Μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος VLC.

Στο Σχήμα 3 φαίνεται ένας φωτοσυλλέκτης, στο Σχήμα 4 ένα οπτικό φίλτρο και στο Σχήμα 5 πως μοιάζει ένα ολοκληρωμένο σύστημα πομποδέκτη. [8]





**Σχήμα 3. Φωτοσυλλέκτης (Optical concentrator).**



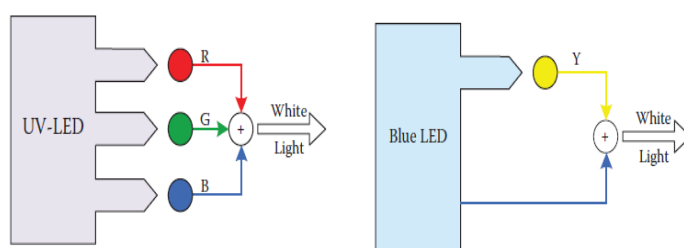
**Σχήμα 4. Οπτικό φίλτρο (optical filter).**



**Σχήμα 5. Πλήρες τερματικό σύστημα ενός πομποδέκτη VLC.**

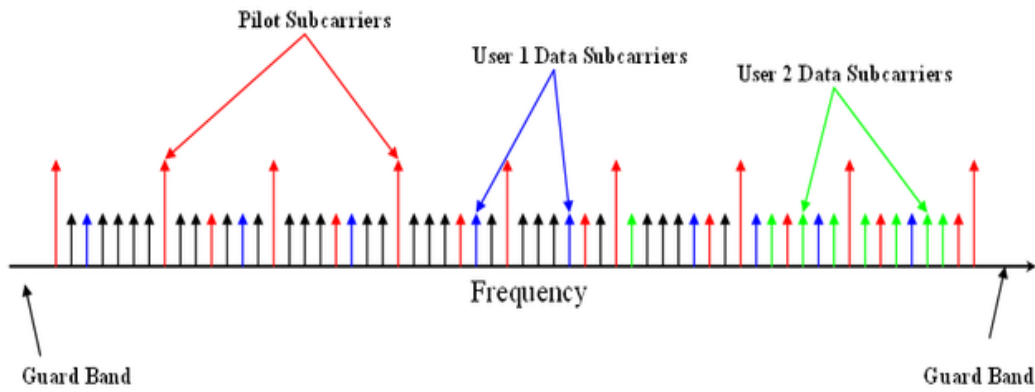
Τα LEDs εκπέμπουν την πληροφορία σε λευκό φως και αυτήν την στιγμή υπάρχουν δύο τρόποι για να το πετύχουμε αυτό, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6. Ο πρώτος τρόπος είναι συνδυάζοντας κατάλληλες αναλογίες κόκκινου (625 nm), πράσινου (525 nm) και μπλε φωτός (470 nm) με πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM-Wavelength Division Multiplexing). Έτσι, χρησιμοποιούμε τρεις εκπομπούς φωτός και παράγουμε το λευκό φως προς αποστολή. Ο δεύτερος τρόπος περιλαμβάνει τη χρήση ενός μπλε LED επικαλυμμένου με ένα στρώμα φωσφόρου που εκπέμπει κίτρινο χρώμα. Ο φωσφόρος απορροφά ένα τμήμα χαμηλού μήκους κύματος από την μπλε ακτινοβολία και το μετατρέπει σε υψηλότερο, εκπέμποντας έτσι κίτρινο φως. Στη συνέχεια έχουμε μίξη με το μη επικαλυμμένο αρχικό μπλε φως

και παράγεται έτσι το τελικό λευκό. Αυτός ο τρόπος είναι γενικά προτιμότερος καθώς έχει μικρότερη πολυπλοκότητα και χαμηλότερο κόστος. Η αργή απόκριση του φωσφόρου όμως περιορίζει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης σε μερικά MHz. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μπλε φίλτρο στο δέκτη για να εξισορροπήσει την αργή απόκριση των κίτρινων συνιστωσών εξαιτίας του φωσφόρου, ή πολυπλοκότερα σχήματα διαμόρφωσης της πληροφορίας. [6] Όλα αυτά όμως προϋποθέτουν πολύ υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR-Signal to Interference plus Noise Ratio), που είναι και μια από τις βασικότερες προκλήσεις στην VLC.

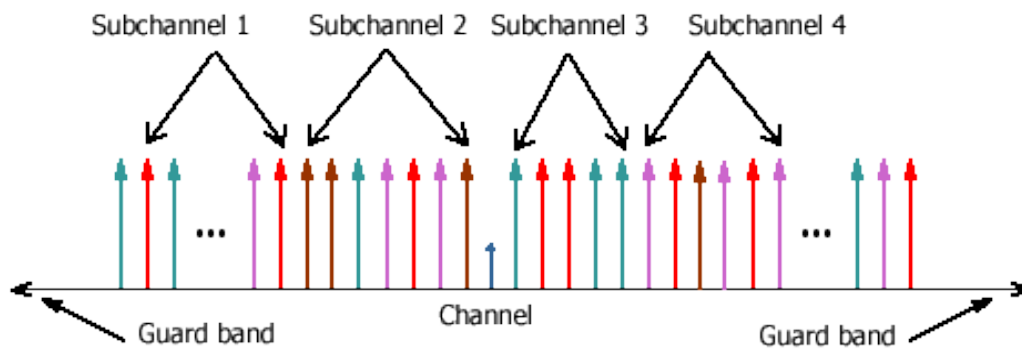


**Σχήμα 6. Τρόποι παραγωγής λευκού φωτός.**

Τα περισσότερα συστήματα VLC που έχουν μελετηθεί μέχρι στιγμής, αλλά και αυτό που θα εξετάσουμε εμείς χρησιμοποιούν Ορθογώνια Πολυπλεξία με Διαίρεση Συχνότητας (OFDMA-Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Η OFDMA βασίζεται στην κλασική OFDM, με τη διαφορά όμως ότι μπορεί να μεταφέρει πολλά σήματα ταυτόχρονα. Αυτό επιτυγχάνεται χωρίζοντας τις υποφέρουσες συχνότητες σε διακριτά ανεξάρτητα κομμάτια (RBs-Resource Blocks) τα οποία και αναθέτουν πλέον στους χρήστες, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 7 και 8. Στην OFDMA οι χρήστες μοιράζονται και σε διαφορετικές χρονοσχισμές, εκτός από τις διαφορετικές υποφέρουσες που έχουν, δηλαδή έχουμε συνδυασμό OFDM και TDM (Time Division Multiplexing). Έτσι συνδυάζονται τα πλεονεκτήματα και των δύο μεθόδων, δηλαδή ανθεκτικότητα σε φαινόμενα που αφορούν στην διάδοση του σήματος, αλλά και μειωμένη παρεμβολή αφού οι υποφέρουσες είναι μεταξύ τους ορθογώνιες. [9]

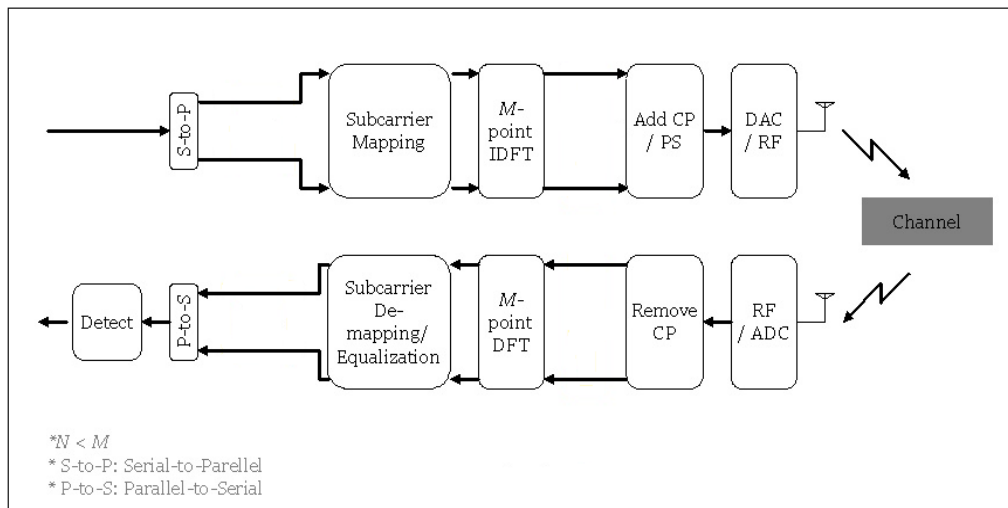


**Σχήμα 7. Διαμόρφωση υποφερουσών στην OFDMA.**



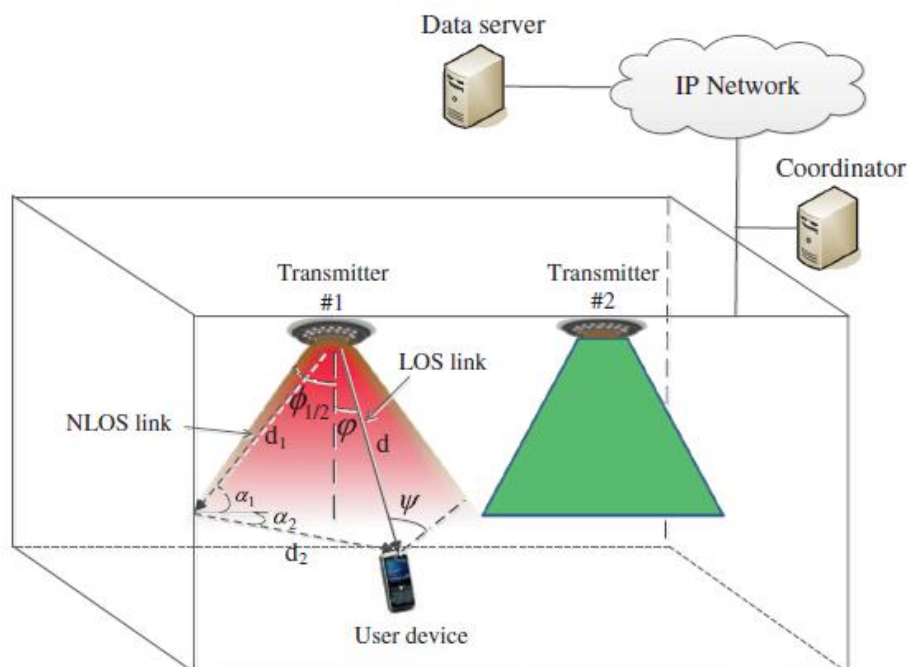
**Σχήμα 8 Διαμόρφωση των υποφερουσών σε Resource Blocks (Subchannels).**

Στο Σχήμα 9 βλέπουμε σε μορφή μπλοκ διαγράμματος από τι αποτελείται ένα σύστημα OFDMA. Παρατηρούμε ότι πριν παραχθεί το σύμβολο που τελικά θα μεταδοθεί γίνεται ανάθεση των υποφερουσών στους χρήστες (Subcarrier Mapping), στην πλευρά του πομπού, ενώ στην πλευρά του δέκτη έχουμε την αντίστροφη διαδικασία (Subcarrier De-mapping). [10]



**Σχήμα 9 Μπλοκ διάγραμμα OFDMA.**

Κατά τη διάδοση της πληροφορίας από τους Σταθμούς Βάσης (OAPs-Optical Access Points) προς τους δέκτες, αλλά και κατά την αντίστροφη διαδικασία, αφού και οι δέκτες στέλνουν σήματα προς τους OAPs, το φως ακολουθεί τόσο την ευθεία πορεία (LOS-Line-Of-Sight), αλλά φτάνει στον προορισμό του και μέσω άλλων διαδρομών (NLOS-Non-Line-Of-Sight) λόγω των φαινομένων διάδοσης (ανάκλαση, διάθλαση, περίθλαση, σκέδαση κλπ), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 10. [11]



**Σχήμα 10. Μοντέλο διάδοσης LOS και NLOS ζεύξης σε VLC.**

Η σχέση που συνδέει την ισχύ εκπομπής και την ισχύ λήψης δίνεται από τον τύπο

$$P_r = H(0) * P_t \quad (1) \quad , \text{ όπου}$$

$P_r$  είναι η ισχύς λήψης,  $P_t$  είναι η ισχύς εκπομπής και  $H(0)$  το κέρδος της ζεύξης.

Για LOS ζεύξεις έχουμε

$$H_{LOS}(0) = \frac{(m+1)*A}{2*\pi*d^2} * \cos^m(\varphi) * T_s(\psi) * g(\psi) * \cos(\psi) \quad , \quad 0 < \psi < \psi_c \quad (2)$$

και 0 άλλου , όπου

$m$  είναι η τάξη της Lambertian εκπομπής ,  $A$  είναι το εμβαδό του φωτοανιχνευτή ,  $d$  είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη ,  $\varphi$  είναι η γωνία ακτινοβολήσης (angle of irradiance) ,  $\psi$  είναι η γωνία πρόσπτωσης (angle of incidence) ,  $T_s(\psi)$  είναι ένας συντελεστής του οπτικού φίλτρου ,  $g(\psi)$  είναι το κέρδος του φωτοσυλλέκτη και  $\psi_c$  το οπτικό πεδίο του δέκτη (FOV-Field Of View).

Η τάξη της Lambertian εκπομπής ,  $m$  δίνεται από τον τύπο

$$m = - \frac{\ln 2}{\ln\left(\cos\varphi_{\frac{1}{2}}\right)} \quad (3) \quad , \quad \text{όπου}$$

$\varphi_{1/2}$  είναι η γωνία ημίσειας ισχύος του πομπού.

Το κέρδος του φωτοσυλλέκτη δίνεται από τον τύπο

$$g(\psi) = \frac{\alpha^2}{\sin^2(\psi_c)} \quad , \quad 0 \leq \psi \leq \psi_c \quad (4) \quad , \quad \text{όπου}$$

$\alpha$  είναι ο δείκτης διάθλασης του φωτοσυλλέκτη.

Για NLOS ζεύξεις έχουμε

$$H_{NLOS} = \frac{(m+1)*A}{2*\pi*d_1*d_2} * \Lambda * A_{wall} * \cos^m(\varphi) * \cos(a_1) * \cos(a_2) * T_s(\psi) * g(\psi) * \cos(\psi) \quad , \quad 0 \leq \psi \leq \psi_c \quad (5)$$

Όπου  $\Lambda$  είναι ο παράγοντας ανάκλασης ,  $A_{wall}$  είναι η ανακλαστική επιφάνεια ενός μικρού κομματιού ,  $a_1$  είναι η γωνία ακτινοβολήσης προς την ανακλαστική επιφάνεια,  $a_2$  είναι η γωνία από την ανακλαστική επιφάνεια προς τον δέκτη ,  $d_1$  είναι η απόσταση από τον πομπό μέχρι την ανακλαστική επιφάνεια και  $d_2$  είναι η απόσταση από την ανακλαστική επιφάνεια μέχρι τον δέκτη , όπως φαίνονται και στο Σχήμα 10.

Ο τύπος για NLOS ζεύξη δίνεται για λόγους πληρότητας καθώς στην περίπτωση του ορατού φωτός σε αντίθεση με σήματα πληροφορίας διαφορετικών

συχνοτήτων, η LOS ζεύξη είναι κατά πολύ επικρατέστερη από τις υπόλοιπες και έτσι δεν τις λαμβάνουμε υπόψη μας στη συνέχεια της μελέτης μας. [6]

## 2.3 Σύγκριση VLC με RF Επικοινωνίες

Είναι δεδομένο πως όταν έχουμε να κάνουμε με επικοινωνία σε εξωτερικό χώρο με μεγάλες αποστάσεις και σε εσωτερικούς χώρους με τους χρήστες να έχουν μεγάλη κινητικότητα, οι RF επικοινωνίες είναι αυτήν την στιγμή προτιμότερες καθώς μπορούν εγγυώνται σε μεγάλο βαθμό την κάλυψη των χρηστών (ενσύρματα ή ασύρματα). Με τη δημιουργία όμως πολλών νέων τεχνολογιών και εφαρμογών έχουν αυξηθεί και οι ανάγκες των χρηστών για καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας (ασύρματη κάλυψη, περισσότερο εύρος ζώνης για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, λιγότερες παρεμβολές κ.α.). Για όλους αυτούς τους λόγους έχει ενταθεί η έρευνα πάνω στις VLC επικοινωνίες, που μπορούν να καλύψουν κάποια από τα παραπάνω ζητήματα αφού έχουν μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα απέναντι στην κλασσική RF μετάδοση. [6]

Οι διαφορές και τα πλεονεκτήματα της VLC έναντι των RF επικοινωνιών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Ιδιότητα	VLC	RF	Σχολιασμός
Εύρος ζώνης	400THZ-800THz	3kHz-300GHz	Πρακτικά το εύρος ζώνης για VLC είναι απεριόριστο, ενώ στις RF είναι περιορισμένο.
Ρυθμός μετάδοσης	Έως 10Gbps	Έως 200Mbps	Το πολύ μεγάλο εύρος ζώνης που διαθέτει η VLC σε συνδυασμό με τις μικρές αποστάσεις που έχει να καλύψει το σήμα, αφού αναφερόμαστε σε εσωτερικού χώρου εφαρμογές κυρίως, δίνουν τη δυνατότητα για επίτευξη πολύ μεγαλύτερων ρυθμών μετάδοσης από τις RF.
Παρεμβολές	Όχι	Ναι	Οι RF ζεύξεις υφίστανται μεγάλη παρεμβολή, καθώς λειτουργούν πολλές εφαρμογές σε κοντινές συχνότητες, κάτι που δεν συμβαίνει στην VLC όπου

			έχουμε απεριόριστο εύρος ζώνης.
Κίνδυνος για την υγεία	Όχι	Ναι	Η VLC λειτουργώντας σε συχνότητες ορατού φωτός δεν προκαλούν ζημιές στον άνθρωπο σε αντίθεση με τις RF συχνότητες όπου υπάρχουν κίνδυνοι από την ακτινοβολία.
Line Of Sight	Ναι	Όχι	Η VLC βασίζεται στην LOS ζεύξη, σε αντίθεση με την RF.
Απόσταση κάλυψης	Μικρή	Μικρή έως αρκετά μεγάλη	Η VLC προτιμάται κυρίως για εφαρμογές εσωτερικού χώρου και μικρής απόστασης, ενώ η RF μπορεί να εξυπηρετήσει πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις.
Ασφάλεια δεδομένων	Καλή	Μέτρια έως κακή	Στην VLC η ασφάλεια της ζεύξης είναι αυξημένη καθώς για να κλαπούν τα δεδομένα χρειάζεται κάποιος δέκτης ευθυγραμμισμένος με την πηγή, σε αντίθεση με την RF που είναι εκτεθειμένη.
Πρότυπα	Σε εξέλιξη	Ολοκληρωμένα	Τα πρότυπα για VLC δεν έχουν ολοκληρωθεί ακόμα, ενώ για τις RF έχουμε αυστηρά πρότυπα και κανονισμούς.
Προσφερόμενες υπηρεσίες	Φωτισμός και επικοινωνία	Επικοινωνία	Η VLC συνδυάζει τον ταυτόχρονο φωτισμό μιας περιοχής με τη μετάδοση πληροφορίας, που είναι και ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματά της σε σχέση με την RF.
Εστίες θορύβου	Ηλιακό φως και φως του περιβάλλοντος	Ηλεκτρονικές εφαρμογές σε παραπλήσιες συχνότητες	Στην VLC μοναδική πηγή θορύβου είναι το φως πέραν αυτού των LEDs, ενώ στην RF κάθε συσκευή που λειτουργεί σε κοντινές συχνότητες προκαλεί θόρυβο.
Κατανάλωση ισχύος	Σχετικά χαμηλή	Μέτρια	Στην RF η ισχύς είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους του σήματος, ενώ στην VLC ανάλογη της απόλυτης τιμής του.

Κινητικότητα χρηστών	Περιορισμένη	Ελεύθερη	Στην VLC δεν είναι εύκολο να υπάρχει μεγάλη κίνηση των χρηστών καθώς πρέπει να διατηρείται η ευθυγράμμιση με κάποιον σταθμό βάσης. Αντίθετα στην RF υπάρχει κάλυψη παρά την κίνηση των χρηστών.
Κάλυψη	Στενή	Ευρεία	Τα LEDs που χρησιμοποιούνται στην VLC έχουν μικρή επιφάνεια κάλυψης, έτσι για να εξυπηρετηθεί μια μεγαλύτερη περιοχή χρειάζονται περισσότερα και κατάλληλα τοποθετημένα. Στην RF έχουμε ευρύτερη κάλυψη από μια κεραία εκπομπής.
Αδειοδότηση	Ελεύθερη	Περιορισμένη και ακριβή	Γενικά, είναι αρκετά δύσκολο να δοθεί άδεια σε κάποιον να χρησιμοποιήσει συχνότητες στο RF φάσμα, ενώ στην περίπτωση της VLC και του ορατού φωτός το φάσμα είναι ελεύθερο.
Κόστος εξοπλισμού	Σχετικά χαμηλό	Σχετικά υψηλό	Το κόστος για του πομποδέκτες σε μια ζεύξη VLC είναι γενικά χαμηλότερο από το αντίστοιχο για RF. Αναμένεται δε να γίνει και μικρότερο όσο βελτιώνεται η έρευνα σε LEDs και φωτοανιχνευτές.
Υποδομές	Αυτόνομος εξοπλισμός	Μεγάλες κεραίες και καλώδια	Στην VLC ο μόνος εξοπλισμός που χρειάζεται είναι κατάλληλοι πομποδέκτες και ένα έξυπνο σύστημα συντονισμού, ενώ στην RF μεγάλες κεραίες λήψης και εκπομπής, ακόμα και καλώδια σε ορισμένες περιπτώσεις.

**Πίνακας 1. Σύγκριση VLC με RF επικοινωνίες.**

Είναι φανερό πως τα πολλά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η VLC σε σχέση με την RF επικοινωνία την καθιστούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για το μέλλον. Ο συνδυασμός του φωτισμού ενός δωματίου, με την ταυτόχρονη μετάδοση πληροφορίας σε πολύ υψηλούς ρυθμούς και μάλιστα με ασφάλεια των δεδομένων και



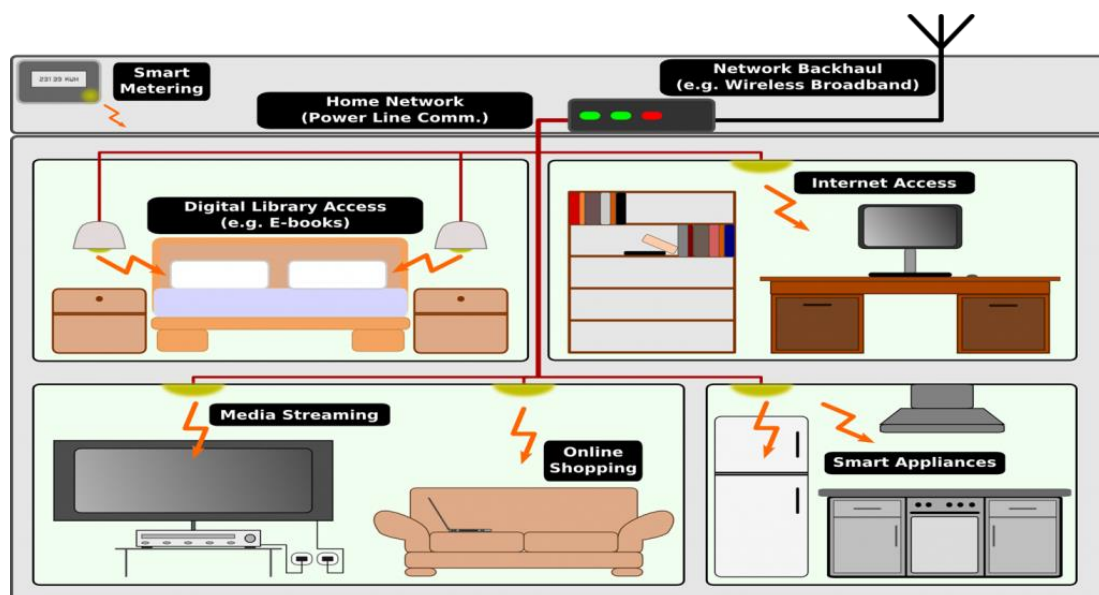
χωρίς να προκαλεί βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό, είναι ιδιότητες ιδιαίτερα χρήσιμες και σημαντικές. Τα πρότυπα και οι κανονισμοί δεν έχουν ωριμάσει ακόμα, αλλά μπορεί ήδη να χρησιμοποιηθεί σε μια πληθώρα ανεξάρτητων εφαρμογών, αλλά και συμπληρωματικά ως προς τις RF εφαρμογές. Οι κυριότερες εφαρμογές VLC παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

## 2.4 Εφαρμογές VLC

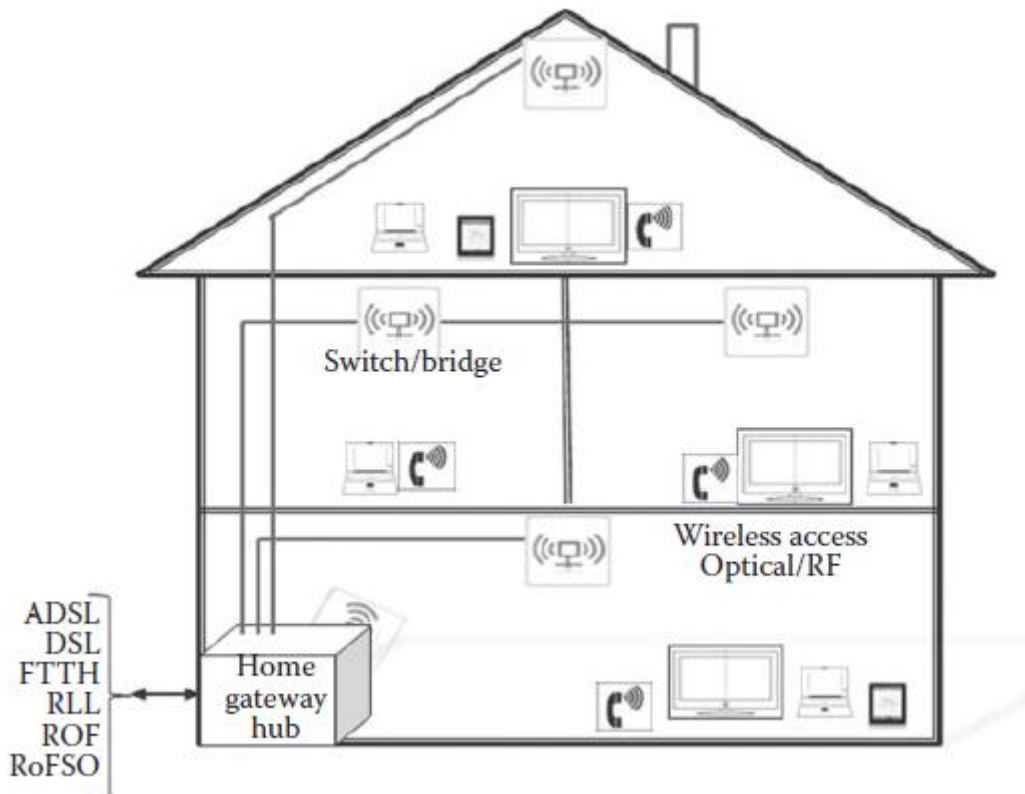
Η VLC είναι μια καινοτόμα τεχνολογία που η έρευνά της δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα. Παρόλα αυτά μπορεί να βρει πολλές εφαρμογές είτε αυτούσια, είτε συμπληρωματικά με άλλες μορφές RF επικοινωνιών. [12]

### ➤ Έξυπνος φωτισμός

Υπάρχει η δυνατότητα να οργανωθούν τα σημεία φωτισμού σε κάποιο δωμάτιο ενός σπιτιού, ενός γραφείου ή και ολόκληρων κτιρίων, με κατάλληλες λάμπες LED, μαζί με τους αντίστοιχους δέκτες και τα κυκλώματα συντονισμού που θα υποστηρίζουν VLC και έτσι να έχουμε ταυτόχρονο φωτισμό αλλά και μετάδοση διαφόρων ειδών πληροφορίας (Σχήμα 12). Όλο αυτό μπορεί να γίνει σε συνδυασμό με κλασικές εφαρμογές των RF επικοινωνιών (Σχήμα 13).



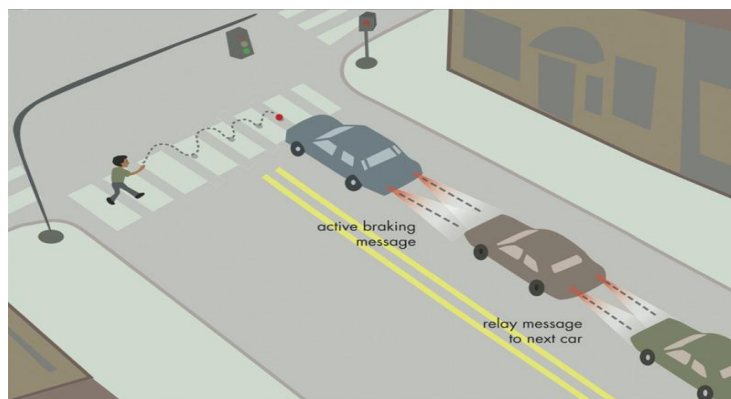
Σχήμα 11. Έξυπνος φωτισμός ενός σπιτιού.



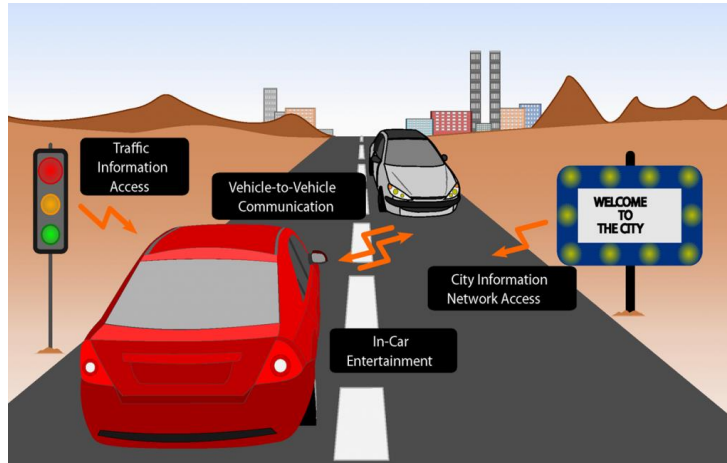
Σχήμα 12. Συνδυασμός κλασικών μεθόδων με VLC για το φωτισμό σπιτιού.

➤ Επικοινωνία αυτοκινήτων

Πολλά αυτοκίνητα χρησιμοποιούν ήδη λάμπες LED για τον φωτισμό. Με κατάλληλες τροποποιήσεις αυτά τα LED θα μπορούν να επικοινωνούν με το περιβάλλον και να λαμβάνουν χρήσιμες πληροφορίες, όπως τη θέση άλλων αμαξιών σε περίπτωση απότομου φρεναρίσματος, το χρώμα του σηματοδότη και άλλες.



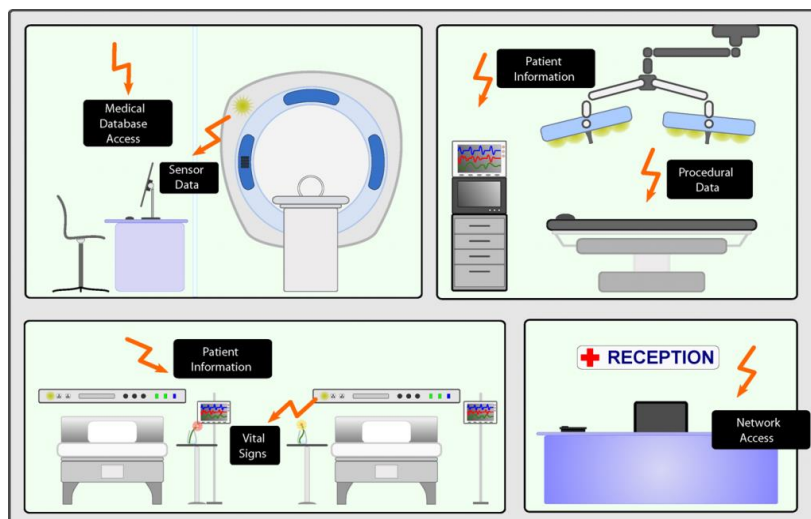
Σχήμα 13. Προειδοποίηση αυτοκινήτων για την θέση τους σε περίπτωση απότομου φρεναρίσματος.



Σχήμα 14 Επικοινωνία αυτοκινήτου με το περιβάλλον μέσω VLC.

- Χρησιμοποίηση σε νοσοκομεία και περιοχές υψηλού κίνδυνου

Στα νοσοκομεία η χρήση κινητών τηλεφώνων και άλλων RF εφαρμογών είναι προτιμότερο να αποφεύγεται καθώς μπορεί να προκαλέσουν παρεμβολές σε μηχανήματα του νοσοκομείου (αξονικοί και μαγνητικοί τομογράφοι). Ακόμα οι κλασσικές επικοινωνίες έχουν υψηλό κίνδυνο πρόκλησης εκρήξεων σε ορυχεία και εργοστάσια εξόρυξης πετρελαίου. Η VLC προσφέρει έναν ασφαλή τρόπο για ταυτόχρονο φωτισμό και μετάδοση πληροφορίας.



Σχήμα 15. Χρησιμοποίηση VLC σε νοσοκομείο.

➤ Χρησιμοποίηση σε αεροπλάνα

Όμοια με τα νοσοκομεία, έτσι και στα αεροπλάνα πρέπει να αποφεύγεται η λειτουργία εφαρμογών που χρησιμοποιούν RF συχνότητες κατά την διάρκεια της πτήσης. Κατάλληλα LEDs μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να παρέχουν πολυμεσικό περιεχόμενο στους επιβάτες μέσω VLC.



**Σχήμα 16. Χρησιμοποίηση VLC σε αεροπλάνο.**

➤ Ελάφρυνση της χρησιμοποίησης RF συχνοτήτων

Οι κλασικές RF εφαρμογές προσφέρουν υψηλό ποσοστό κάλυψης στους χρήστες και αρκετά καλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Παρόλα αυτά, δεν αρκούν για να ανταπεξέλθουν στις διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών για περισσότερο εύρος ζώνης και ασύρματες εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων. Η VLC μπορεί να λειτουργήσει συνδυαστικά σε αυτόν τομέα και να βελτιώσει την κατάσταση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΠΡΟΫΠΑΡΧΟΥΣΑ ΈΡΕΥΝΑ

Το ενδιαφέρον για το επιστημονικό πεδίο της ασύρματης επικοινωνίας μέσω του ορατού φωτός (VLC) είναι αρκετά πρόσφατο, καθώς τα τελευταία χρόνια έχουν δημιουργηθεί οι προϋποθέσεις για την ανάπτυξη των κατάλληλων συσκευών (LEDs, smart coordinators, optical filters). Είναι επομένως λογικό, να μην έχουν καλυφθεί πλήρως όλα τα αντικείμενα που είναι απαραίτητα για την πλήρη μελέτη και λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος. Ανατρέχοντας στην υπάρχουσα βιβλιογραφία των τελευταίων δέκα χρόνων, θα παρουσιάσουμε στη συνέχεια τα κυριότερα σημεία της έρευνας που έχει ήδη γίνει.

- **“A novel link switching scheme using pre-scanning and RSS prediction in visible light communication networks” – Ένα νέο σχήμα μεταγωγής βασισμένο σε πρόβλεψη βασισμένη στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος πριν τη σάρωση για ασύρματα δίκτυα ορατού φωτός. [11]**

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα σχήμα το οποίο επιτρέπει την αλλαγή του σημείου πρόσβασης (Optical Access Point – OAP) που εξυπηρετεί τον κάθε χρήστη, όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο. Πιο αναλυτικά, το μοντέλο που προτείνεται διενεργεί συνεχείς ελέγχους του επιπέδου της λαμβανόμενης ισχύος εκπομπής και σε συνδυασμό με την ύπαρξη κατάλληλων κατωφλίων επιτυγχάνεται η ομαλή μετάβαση του χρήστη από ένα σημείο πρόσβασης σε άλλο, προκειμένου να υπάρχει η καλύτερη δυνατή ποιότητα υπηρεσίας.

Έχουν οριστεί τρία διαφορετικά κατώφλια, Scanning threshold ( $Scan\_thr = -67\text{dBm}$ ), Association threshold ( $Assoc\_thr = -80\text{ dBm}$ ), Link switching threshold ( $LS\_thr = -86\text{ dBm}$ ), και συγκρίνοντας κάθε φορά με τη λαμβανόμενη ισχύ λαμβάνεται η απόφαση για τη λειτουργία του μοντέλου.

➤ Αν ισχύει:  $Assoc\_thr < P_{curr} < Scan\_thr$ , τότε το τερματικό του χρήστη πραγματοποιεί σάρωση ώστε να βρει τους γειτονικούς σταθμούς που μπορούν να τον εξυπηρετήσουν και να είναι έτοιμο για πιθανή αλλαγή.

➤ Αν ισχύει:  $LS\_thr < P_{curr} < Assoc\_thr$  τότε το τερματικό του χρήστη βρίσκει και αποθηκεύει τις τιμές της λαμβανόμενης ισχύος από τα

γειτονικά τερματικά των σταθμών εξυπηρέτησης και προσπαθεί να προβλέψει πιο από όλα θα του παρέχει καλύτερη υπηρεσία σε περίπτωση αλλαγής.

➤ Τέλος αν ισχύει:  $P_{curr} < LS\_thr$  τότε το τερματικό του χρήστη αρχικά αποσυνδέεται από τον σταθμό που τον εξυπηρετούσε και ξεκινά να επικοινωνεί με τον γειτονικό σταθμό που έχει επιλέξει στο προηγούμενο βήμα. Η αλλαγή αυτή είναι αρκετά γρήγορη εξαιτίας του γεγονότος πως ο χρήστης γνωρίζει ήδη με ποιον καινούργιο σταθμό θα συνδεθεί.

Οι συγγραφείς έχουν χρησιμοποιήσει ως μετρικές για να παρουσιάσουν τα αποτελέσματα του μοντέλου τους, τον χρόνο καθυστέρησης της αλλαγής, τις απαραίτητες αλλαγές, την πιθανότητα απόρριψης μιας καινούργιας σύνδεσης, και την πιθανότητα διακοπής μιας παλιάς.

- **“Dynamic Resource Allocation for Visible Light based Wireless Sensor Network” – Δυναμική ανάθεση πόρων σε ασύρματα δίκτυα βασισμένα στο ορατό φως. [13]**

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος για ταυτόχρονη κατανομή ισχύος εκπομπής και εύρους ζώνης (που είναι και οι πόροι του συστήματος που μελετώνται), σε χρήστες ενός ασύρματου δικτύου που λειτουργεί σε συχνότητες του ορατού φωτός. Εξετάζεται η ζεύξη καθόδου (downlink), δηλαδή από τον πομπό προς τους δέκτες και έχει θεωρηθεί ότι οι χρήστες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις για πόρους, ανάλογα με τα κριτήριά τους για ποιότητα υπηρεσίας (QoS).

Το σύστημα αποτελείται από έναν Έξυπνο Συντονιστή (Smart Coordinator - SC), που είναι υπεύθυνος να διατηρεί τη σωστή λειτουργία του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται λαμβάνοντας περιοδικές αναφορές από όλους τους χρήστες για την ποιότητα του καναλιού που χρησιμοποιούν (Channel Quality Indicator – CQI). Το CQI εξαρτάται κυρίως από τον λόγο σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR) και ο SC πρέπει να πραγματοποιεί την ανάθεση των πόρων του συστήματος έτσι ώστε όλοι οι χρήστες να ικανοποιούν τα κριτήριά τους για QoS, όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια.

$$B_i \geq B_{min}$$

$$P_i \geq P_{min}$$

$$R_i \geq R_{min}$$

Ο αλγόριθμος λειτουργεί «άπληστα» (greedily) καθώς πρώτα επιλέγει τον χρήστη που μεγιστοποιεί μια αντικειμενική συνάρτηση ευχαρίστησης, παραμένοντας όμως στα όρια που έχουν οριστεί για ισχύ (P) και εύρος ζώνης (B).

$$\sum_{i=1}^N P_i \leq P$$
$$\sum_{i=1}^N B_i \leq B$$

Τέλος, πρέπει να εξασφαλίζεται πως όλοι οι χρήστες διατηρούν τις απαιτήσεις τους για QoS καθ'όλη τη διάρκεια της εξυπηρέτησής τους, έτσι αν ένας κόμβος εκπομπής δεχτεί μια αίτηση για σύνδεση την οποία δεν μπορεί να εξυπηρετήσει πλήρως, την απορρίπτει.

Ως μετρικές για να αξιολογήσουν την επίδοση του μοντέλου τους έχουν χρησιμοποιήσει την ρυθμοαπόδοση του συστήματος (στην ζεύξη καθόδου) συναρτήσει της πιθανότητας απόρριψης νέων αιτήσεων, και την πιθανότητα αποδοχής νέων αιτήσεων για σύνδεση συναρτήσει του κατωφλίου για επιτεύξιμο εύρος ζώνης.

- **“Opportunistic Channel Reuse for a Self-organized Visible Light Communication Personal Area Network” – Ευκαιριακή επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων για τους χρήστες ενός προσωπικού δικτύου ασύρματης επικοινωνίας μέσω του ορατού φωτός. [14]**

Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται ένα σχήμα που στοχεύει στην επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων του διαθέσιμου εύρους ζώνης από χρήστες γειτονικών σταθμών εξυπηρέτησης, προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, ο κάθε χρήστης μπορεί να στείλει ένα σήμα (Busy Burst signal – BB signal) σε κάποιον γειτονικό σταθμό του, από τον οποίο θέλει να χρησιμοποιήσει ένα επιπλέον τμήμα συχνοτήτων για να βελτιώσει την ποιότητα της υπηρεσίας του. Ο σταθμός εξυπηρέτησης θα εξετάσει την ενδεχόμενη παρεμβολή που



θα προκαλούσε μια τέτοια κίνηση για τους χρήστες που ήδη εξυπηρετεί και αν είναι κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο θα επιτρέψει την επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας.

Κάθε σταθμός βάσης είναι εξοπλισμένος με έναν Έξυπνο Συντονιστή (Smart Coordinator - SC) που δέχεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα σήματα αναφοράς ποιότητας καναλιού από τους χρήστες (color channel quality indicator - CCQI) και μπορεί να κατηγοριοποιήσει τα διαθέσιμα κανάλια ως μεγάλης, μέσης ή μικρής παρεμβολής, έτσι ώστε να φτιάξει μια λίστα προτεραιότητας ως προς την πιθανή επαναχρησιμοποίησή τους. Για την υλοποίηση του περιορισμού βάσει των παρεμβολών γίνεται και ένας έλεγχος για την συνολική καταναλισκόμενη ισχύ σε κάθε κανάλι, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται μια συνάρτηση ευχαρίστησης του χρήστη και ταυτόχρονα να βρισκόμαστε κάτω από το αποδεκτό κατώφλι για τις παρεμβολές

$$\begin{aligned} & \text{maximize } R(P_{n,k}) \\ & \text{s. t. } \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K H_{n,k} * P_{n,k} \leq \Gamma \end{aligned}$$

Υπολογίζεται δηλαδή η ισχύς στη ζεύξη καθόδου (downlink) ούτως ώστε να μεγιστοποιείται ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης (R) του χρήστη (n) στο συγκεκριμένο κανάλι (k) και ταυτόχρονα η παρεμβολή που δημιουργεί για τους άλλους χρήστες στο ίδιο κανάλι να είναι μικρότερη από ένα κατώφλι Γ.

Για να αξιολογήσουν το μοντέλο τους συγκρίνουν τον αλγόριθμο που έχουν προτείνει με έναν τυχαίο τρόπο διαμοιρασμού των καναλιών, χωρίς επαναχρησιμοποίηση κάποιων συχνοτήτων και χρησιμοποιούν ως μετρικές την πιθανότητα απόρριψης κάποιου χρήστη λόγω μη ύπαρξης διαθέσιμου καναλιού, συναρτήσει του αριθμού των χρηστών, και τον ρυθμό μετάδοσης που πετυχαίνει ο κάθε χρήστης, συναρτήσει του αριθμού ανάθεσης καναλιών από κάθε σταθμό εξυπηρέτησης.

- **“Efficient Resource Allocation for Rapid Link Recovery and Visibility in Visible-Light Local Area Networks” – Αποτελεσματική κατανομή πόρων για άμεση επανασταθεροποίηση της ζεύξης και της οπτικής επαφής σε συστήματα ασύρματης επικοινωνίας ορατού φωτός. [15]**

Σε αυτήν την εργασία οι συγγραφείς παρουσιάζουν έναν τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται γρήγορα η επαναφορά της σύνδεσης ενός χρήστη με τον σταθμό εκπομπής που το εξυπηρετεί, αν χαθεί η επικοινωνία τους για κάποιο λόγο (π.χ. εμπόδιο, κακός προσανατολισμός πομπού και δέκτη). Συγκεκριμένα, προτείνουν την χρησιμοποίηση ενός Πρωτοκόλλου Ελέγχου Μέσου (Medium Access Control – MAC protocol). Το πρωτόκολλο αυτό θα είναι δυνατό να ξεχωρίσει τον τύπο της λειτουργίας του συστήματος, καθώς διακρίνονται τρεις περιπτώσεις :

- Λειτουργία ως τοπικό δίκτυο (Visible-light Local Area Network), όταν τα τερματικά των χρηστών επικοινωνούν με τους σταθμούς βάσης στέλνοντάς τους πληροφορία.
- Λειτουργία πολυεκπομπής πληροφορίας (Broadcast Information), όταν ο σταθμός βάσης στέλνει πληροφορία στα τερματικά των χρηστών.
- Λειτουργία περιφερειακής επικοινωνίας (Peripheral Interface), όταν δύο ή περισσότερα τερματικά χρηστών ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους.

Για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις οργανώνονται διαφορετικά τα πλαίσια που μεταφέρουν την πληροφορία, καθώς προστίθενται σε αυτά επιπλέον τμήματα που περιέχουν πληροφορίες για την κατάσταση της σύνδεσης, δηλαδή αν είναι εφικτή η μετάδοση δεδομένων. Αντί για επιπρόσθετα τμήματα στα ήδη υπάρχοντα πλαίσια προτείνουν και την χρησιμοποίηση ξεχωριστών σημάτων ειδοποίησης (point-shot signals). Αυτό βεβαίως μειώνει την απόδοση του συστήματος, καθώς μειώνεται και το διαθέσιμο εύρος ζώνης για μετάδοση δεδομένων.

Για αυτόν το λόγο εξετάζονται τρία διαφορετικά σενάρια μετάδοσης των point-shot signals, αρχικά χωρίς δέσμευση κάποιας συγκεκριμένης χρονοσχισμής, με αποτέλεσμα να υπάρχει σύγκρουση με τη μεταφορά δεδομένων από κάποιον άλλο χρήστη, στη συνέχεια με πλήρη δέσμευση συγκεκριμένων χρονοσχισμών για αποκλειστική μετάδοση αυτών των σημάτων, και τέλος με ημι-δέσμευση χρονοσχισμών για ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων και σημάτων ειδοποίησης.

Στον πρώτο τρόπο χάνεται μεγάλο μέρος της πληροφορίας λόγω των συγκρούσεων, στον δεύτερο έχουμε αισθητά μειωμένη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης για μετάδοση δεδομένων, αφού δεσμεύονται ολόκληρες χρονοσχισμές, ενώ στον τρίτο τρόπο πετυχαίνουμε ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα.

Για να αξιολογήσουν το μοντέλο τους χρησιμοποιούν ως μετρικές την πιθανότητα σύγκρουσης δεδομένων με σήματα ειδοποίησης, την πιθανότητα απώλειας κάποιας σύνδεσης και την χρησιμοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, όλα συναρτήσει του αριθμού της κίνησης των χρηστών στο δίκτυο.

- **“SINR-Constrained Joint Scheduling and Optimal Resource Allocation in VLC Based WPAN System” – Βέλτιστη ανάθεση πόρων και προγραμματισμός ενός συστήματος ασύρματης επικοινωνίας ορατού φωτός με βάση περιορισμούς του SINR.[16]**

Στην εργασία αυτή γίνεται μια προσπάθεια να συνδυαστούν το Φυσικό Στρώμα (Physical Layer) και το Πρωτόκολλο Ελέγχου Μέσου (Medium Access Control – MAC protocol) σε μια διαστρωματική πλατφόρμα για καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων του συστήματος σε μια ζεύξη VLC. Πιο αναλυτικά, οι συγγραφείς προτείνουν τη χρησιμοποίηση ενός ενιαίου αλγορίθμου για προγραμματισμό του συστήματος και κατανομή πόρων (joint scheduling and rate allocation algorithm – JSRA), που θα στοχεύει στη μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης του συστήματος τηρώντας ταυτόχρονα κάποιους περιορισμούς για το SINR.

Ο αλγόριθμός τους αποτελείται από τρία στάδια :

➤ Αρχικά, για κάθε διαθέσιμο κανάλι ορίζεται ένας δείκτης ποιότητας (wavelength quality indication - WQI) που εξαρτάται από το SINR που μπορεί να επιτευχθεί και τον ρυθμό λαθών (bit error rate - BER). Ο WQI λειτουργεί ως μια διαστρωματική παράμετρος που μεταφέρει την πληροφορία από το Physical Layer στο MAC Protocol, όπου εισέρχεται σε έναν προγραμματιστή (scheduler). Ο scheduler εκτός από το WQI λαμβάνει επιπλέον πληροφορίες από τα χαρακτηριστικά των χρηστών (απαιτήσεις τους για QoS) και αναθέτει δυναμικά μια σειρά χρησιμοποίησης των καναλιών για όλους τους χρήστες. Σε αυτό το βήμα έχει θεωρηθεί ότι η κατανομή της ισχύος είναι ομοιόμορφη για όλους τους χρήστες.

➤ Σε αυτό το βήμα έχουμε τον έλεγχο της ισχύος που χρησιμοποιείται για κάθε χρήστη (εξετάζεται και εδώ η ζεύξη καθόδου) . Αφού έχει γίνει η

επιλογή καναλιού στο πρώτο βήμα, προσπαθούμε τώρα να μεγιστοποιήσουμε τη χρησιμοποίηση του συγκεκριμένου καναλιού φροντίζοντας η συνολική ισχύς που δαπανάται να είναι μικρότερη από κάποιο όριο. Αυτός ο τρόπος κατανομής δημιουργεί κάποια προβλήματα στους χρήστες που βρίσκονται σε επικαλυπτόμενα σημεία ανάμεσα στις κυψέλες αλλά λειτουργεί ικανοποιητικά για τους χρήστες που βρίσκονται κοντά στα κέντρα των κυψελών.

➤ Στο τελευταίο στάδιο γίνεται ο υπολογισμός του ρυθμού μετάδοσης του κάθε χρήστη. Αφού έχει βρεθεί διαθέσιμο κανάλι που επιτρέπει μέγιστη χρησιμοποίηση, εντός των περιορισμών της ισχύος, ο αλγόριθμος προσπαθεί να βρει τον μέγιστο ρυθμό που μπορεί να επιτύχει ο κάθε χρήστης και να του αναθέσει πλέον το τελικό κανάλι που θα εκπέμψει.

Ως μετρικές για να παρουσιάσουν τα αποτελέσματά τους έχουν χρησιμοποιήσει την πιθανότητα απόρριψης μιας σύνδεσης συναρτήσει του επιτεύξιμου SINR, το ρυθμό μετάδοσης των χρηστών, τη μέση ρυθμοαπόδοση του συστήματος και την μέγιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος.

- **“High-Speed Optical Wireless Demonstrators: Conclusions and Future Directions” – Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις για την έρευνα σε ασύρματες συσκευές που επιτρέπουν την οπτική επικοινωνία και πετυχαίνουν υψηλές ταχύτητες.[8]**

Στη δημοσίευση αυτή γίνεται μια υλισμική (hardware) προσέγγιση στις συσκευές που λειτουργούν ως πομποί και δέκτες σε ένα δίκτυο ασύρματης επικοινωνίας ορατού φωτός. Αρχικά γίνεται αναφορά στα συγκεκριμένα μέρη που αποτελούν ένα σύστημα VLC και αναφέρονται ορισμένες χαρακτηριστικές τιμές των παραμέτρων που επηρεάζουν τη λειτουργία του. Πιο αναλυτικά, το τερματικό του πομπού που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από 7 εστίες LEDs και το αντίστοιχο του δέκτη από 7 σημεία υποδοχής. Αν κάποια εστία του πομπού δεν ήταν ευθυγραμμισμένη με κάποιο σημείο υποδοχής δέκτη τότε απενεργοποιούνταν για να εξοικονομηθούν πόροι του συστήματος, και όμοια, οι δέκτες θα έπρεπε να

ικανοποιούν συγκεκριμένα κατώφλια ανιχνεύσιμου σήματος πληροφορίας. Αυτό επιτεύχθηκε με τη χρησιμοποίηση ενός Πρωτοκόλλου Ελέγχου Μέσου (Medium Access Control – MAC protocol).

Στην πειραματική τους μελέτη χρησιμοποίησαν δύο συστήματα πομποδεκτών τοποθετημένα κατάλληλα το ένα απέναντι στο άλλο και σαν αποτελέσματα παρουσιάζουν την επιφάνεια που παρέχεται κάλυψη μέσα στο χώρο που χρησιμοποίησαν, και την πιθανότητα απώλειας σύνδεσης συναρτήσει διαφορετικών παραμέτρων του συστήματος. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως δεν παρατηρήθηκε επηρεασμός των αποτελεσμάτων από εξωτερικές πηγές φωτός.

- **“Non-Orthogonal Multiple Access for Visible Light Communications” – Μη-Ορθογώνια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης σε ασύρματα δίκτυα ορατού φωτός.[17]**

Σε αυτήν την εργασία γίνεται μια προσπάθεια εφαρμογής Μη-Ορθογώνιας τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA) σε δίκτυα VLC. Η τεχνική αυτή επιτρέπει στους χρήστες τη χρησιμοποίηση ολόκληρου του διαθέσιμου εύρους ζώνης συχνοτήτων, προκειμένου να επιτευχθούν υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνονται οι παρεμβολές για τους χρήστες της ίδιας κυψέλης, και για αυτό έχει χρησιμοποιηθεί ένα σχήμα διαδοχικής ακύρωσης των παρεμβολών (successive interference cancellation – SIC), που βασίζεται στη σειρά αποκωδικοποίησης των δεδομένων. Τέλος, οι συγγραφείς έχουν χρησιμοποιήσει και έναν τρόπο υπολογισμού της ισχύος που χρειάζεται ο κάθε χρήστης (για την προς τα κάτω ζεύξη). Ο αλγόριθμός τους αποτελείται από τρία στάδια :

- Αρχικά οι χρήστες συνδέονται με τον σταθμό βάσης στον οποίο είναι πιο κοντά. Το σενάριο που έχουν προσομοιώσει θεωρεί χρήστες με δυνατότητα κίνησης στο χώρο του δωματίου, οπότε υπάρχει μια κεντρική μονάδα ελέγχου (central control unit – CCU) που είναι υπεύθυνη να ενημερώνει για τις αλλαγές στην τοποθεσία των χρηστών, έτσι ώστε να γίνει γρήγορη σύνδεση με άλλον σταθμό βάσης αν αυτό είναι απαραίτητο.

- Στη συνέχεια ορίζεται η σειρά αποκωδικοποίησης για τους χρήστες με βάση την απόσταση, δηλαδή οι χρήστες με την μικρότερη απόσταση από τον σταθμό εξυπηρέτησης είναι χαμηλότερα στην ουρά αποκωδικοποίησης. Το σχήμα SIC ορίζει πως ένα χρήστης δέχεται παρεμβολές μόνο από τους χρήστες που βρίσκονται υψηλότερα από αυτόν στην ουρά αποκωδικοποίησης.
- Τέλος γίνεται ο υπολογισμός της ισχύος που χρειάζεται να διατεθεί για τον κάθε χρήστη με έναν τρόπο που συνδυάζει το κέρδος του (αντιστρόφως ανάλογη η ισχύς με το κέρδος), με το κέρδος του πρώτου χρήστη στη σειρά αποκωδικοποίησης.

Για να αξιολογήσουν τη λειτουργικότητα του αλγορίθμου τους σε σύγκριση με προηγούμενους αλγορίθμους, έχουν προσομοιώσει διαφορετικά σενάρια, αλλάζοντας κάθε φορά λειτουργικές παραμέτρους του συστήματος και έχουν χρησιμοποιήσει σαν μετρικές το ρυθμό μετάδοσης που επιτυγχάνουν οι χρήστες, και τον αριθμό λαθών.

Μελετώντας τις παραπάνω δημοσιεύσεις παρατηρούμε πως η έρευνα για δίκτυα VLC έχει κινηθεί σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Πιο αναλυτικά, στα [11], [15] βλέπουμε πως γίνεται μια προσπάθεια αντιμετώπισης του φαινομένου της απώλειας επικοινωνίας μεταξύ πομπού και δέκτη σε μια ζεύξη VLC, λόγω της παρουσίας εμποδίων στο χώρο, του κακού προσανατολισμού των τερματικών και της κίνησης των χρηστών. Στα [13], [14] γίνεται μια μελέτη διαμοιρασμού πόρων στην ζεύξη καθόδου (downlink) συστημάτων VLC. Στο [16] παρουσιάζεται μια διαστρωματική πλατφόρμα ανάμεσα στο Φυσικό Στρώμα ενός πομπού VLC και στο Πρωτόκολλο Ελέγχου Μέσου που συνδυάζει τις πληροφορίες και από τα δύο επίπεδα και πετυχαίνει καλύτερη ανάθεση καναλιών για τους χρήστες, στην προς τα κάτω ζεύξη και εδώ. Στο [8] παρουσιάζεται ένα πλήρες μοντέλο VLC με τερματικά πομπού και δέκτη και γίνεται μια ανάλυση των τιμών των χαρακτηριστικών παραμέτρων λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος. Τέλος, στο [17] γίνεται μια προσέγγιση για διαμοιρασμό πόρων σε δίκτυο VLC με την τεχνική NOMA σε αντίθεση με την

πλεονότητα των προηγούμενων ερευνών που είχαν χρησιμοποιήσει την τεχνική OFDMA.

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα, πως υπάρχει ένα κενό στην υπάρχουσα βιβλιογραφία όσο αφορά στη ζεύξη ανόδου (uplink) σε συστήματα VLC, για αυτό και στη συνέχεια της εργασίας προτείνουμε έναν αλγόριθμο για ανάθεση πόρων που θα προσπαθεί να λύσει αυτό το πρόβλημα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>**

### **ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ**



## 4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου που μοντελοποιήσαμε, καθώς και τους αλγορίθμους που χρησιμοποιήσαμε για να πετύχουμε την κατανομή πόρων. Σε κάθε χρήστη που μελετάμε αναθέτουμε αρχικά ένα συγκεκριμένο, διακριτό τμήμα συχνοτήτων από το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης, και στη συνέχεια υπολογίζουμε την ελάχιστη ισχύ εκπομπής (για τη ζεύξη ανόδου – uplink) που χρειάζεται, προκειμένου να μεγιστοποιήσει μια συνάρτηση ευχαρίστησης (utility function) που έχουμε θεωρήσει. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα ορίσουμε το πρόβλημα βελτιστοποίησης και θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τα βήματα των αλγορίθμων που χρησιμοποιήσαμε.

## 4.2 Ορισμός των Μεγεθών του Συστήματος

Προτού παρουσιάσουμε τους αλγορίθμους κατανομής πόρων, είναι απαραίτητο να περιγράψουμε το σύστημα και να ορίσουμε τα κατάλληλα μεγέθη που θα χρησιμοποιήσουμε.

Η VLC είναι μια τεχνολογία που ενδείκνυται κυρίως για εφαρμογές εσωτερικών χώρων, οπότε ως σύστημα προς μελέτη έχουμε θεωρήσει ένα δωμάτιο το οποίο αποτελείται από  $M$  σημεία οπτικής πρόσβασης (Optical Access Points – OAPs) και  $N$  χρήστες. Το συνολικό εύρος ζώνης που μπορεί να διαθέσει κάθε OAP  $W$  για να εξυπηρετήσει τους χρήστες του είναι  $B$  Hz. Κάθε χρήστης  $i$ ,  $i \in N$  έχει ένα κέρδος ως προς κάθε OAP  $j$ ,  $j \in M$  το οποίο μπορεί να του παρέχει οπτική κάλυψη,  $G_{i,j}$  και ισχύ εκπομπής ζεύξης ανόδου  $P_i$ . Ο λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (Signal to Noise plus Interference Ratio – SINR) του χρήστη  $i$  δίνεται από τον τύπο

$$\gamma_i = \frac{R_{PD} * P_i * G_{i,j}}{\xi + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N I_{k,j}}$$

όπου  $\xi$  είναι η ισχύς του θορύβου,  $R_{PD}$  είναι μια χαρακτηριστική παράμετρος στο τερματικό του δέκτη και  $\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N I_{k,j}$  είναι η παρεμβολή που προκαλούν οι υπόλοιποι

χρήστες του συστήματος στο χρήστη  $i$ . Ο τρόπος υπολογισμού των παρεμβολών θα εξηγηθεί στη συνέχεια, όπου γίνεται και η αναλυτική παρουσίαση των αλγορίθμων που χρησιμοποιήσαμε.

Έχουμε θεωρήσει ακόμα και μια συνάρτηση ευχαρίστησης  $U$  (utility function), που δείχνει πόσο «ικανοποιημένος» είναι ο χρήστης από την εξυπηρέτηση που δέχεται από το δίκτυο. Την έχουμε ορίσει ως :

$$U_i = \frac{W * f(\gamma_i)}{P_i}$$

όπου  $W$  είναι το εύρος ζώνης που διατίθεται στον κάθε χρήστη και  $f(\gamma_i)$  είναι η συνάρτηση αποδοτικότητας και εκφράζει την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης ενός πακέτου που εκπέμπει ο χρήστης. Πιο αναλυτικά για τη συνάρτηση  $f$  μπορούμε να πούμε :

- Ο συγκεκριμένος τύπος ορισμού της είναι  $f(\gamma) = (1 - e^{-A*\gamma})^M$ , όπου οι παράμετροι  $A$ ,  $M$  εξαρτώνται από το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των δεδομένων.
- Είναι σιγμοειδής συνάρτηση, αύξουσα, συνεχής και δύο φορές παραγωγίσιμη ως προς το σηματοθορυβικό λόγο.
- Ισχύει  $f(0) = 0$  έτσι ώστε όταν η ισχύς εκπομπής κάποιου χρήστη είναι μηδενική, να είναι μηδενική και η ευχαρίστησή του.
- Ισχύει  $\lim_{\gamma \rightarrow \infty} f(\gamma) = 1$  [1], [3]

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που έχουμε να επιλύσουμε είναι η μεγιστοποίηση της συνάρτησης ευχαρίστησης  $U_i$ , με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ισχύος:

$$\max(U_i(P_i)) , i = 1, \dots, N$$

Σαν περιορισμό θεωρούμε πως η συνολική ισχύς με την οποία εκπέμπει ο κάθε χρήστης, ανάλογα με το εύρος ζώνης που του διατίθεται κάθε φορά, να είναι μικρότερη ή ίση από μια μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή δηλαδή

$$P_i \leq P_{max}, \forall i \in N$$

Στη συνέχεια της εργασίας χρησιμοποιήσαμε δύο διαφορετικούς αλγορίθμους κατανομής πόρων, οπότε το παραπάνω πρόβλημα θα διατυπωθεί αναλυτικότερα για την κάθε περίπτωση.

## 4.3 Αλγόριθμοι Κατανομής Πόρων

Έχουμε χρησιμοποιήσει δύο διαφορετικούς αλγορίθμους διαμοιρασμού του διαθέσιμου εύρους ζώνης στους χρήστες, έναν που βασίζεται στην τεχνική OFDMA και έναν που βασίζεται στην τεχνική NOMA, και έχουμε συγκρίνει τα αποτελέσματα.

### 4.3.1 Αλγόριθμος Κατανομής Πόρων με Τεχνική OFDMA

**Βήμα 1** : Αρχικά βρίσκουμε σε ποιο OAP θα συνδεθεί ο κάθε χρήστης με βάση το κέρδος του. Αν δηλαδή έχει οπτική επαφή με περισσότερα του ενός OAPs θα επιλέξει να συνδεθεί με εκείνο στο οποίο έχει το μεγαλύτερο κέρδος καναλιού.

**Βήμα 2** : Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον τρόπο που θα ανατεθούν στους χρήστες τα διακριτά τμήματα συχνότητας (RBs), για να εκπέμψουν και πάλι με βάση το μεγαλύτερο κέρδος καναλιού.

**Βήμα 3** : Για κάθε χρήστη υπολογίζουμε την ισχύ εκπομπής, με βάση τις υποφέρουσες που μπορεί να χρησιμοποιήσει, έτσι ώστε να μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητάς του. Έχουμε λάβει υπόψη τον περιορισμό, ότι για κάθε χρήστη η συνολική ισχύς εκπομπής ανεξαρτήτως του πλήθους των υποφερουσών που χρησιμοποιεί δεν θα πρέπει να ξεπερνά μια συγκεκριμένη μέγιστη τιμή που έχουμε ορίσει.

**Βήμα 4** : Ανανεώνουμε τη μέγιστη ισχύ του χρήστη, με βάση την τιμή που υπολογίσαμε στο Βήμα 3, ώστε τελικά ο αλγόριθμος να συγκλίνει στην μικρότερη δυνατή τιμή ισχύος που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητας.

**Βήμα 5** : Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία μέχρι να έχουν εξυπηρετηθεί όλοι οι χρήστες.

Στη συνέχεια θα εξηγήσουμε αναλυτικά τα επιμέρους βήματα του αλγορίθμου.

### **4.3.1.1 Υπολογισμός OAP που Συνδέεται ο Κάθε Χρήστης**

Με βάση την τοπολογία που έχουμε θεωρήσει, αλλά και με τη φύση της VLC, όπου πρέπει να υπάρχει οπτική επαφή ανάμεσα στον πομπό και στο δέκτη, κάθε χρήστης μπορεί να συνδέεται με ένα ή δύο OAPs. Αν έχει κάλυψη μόνο από ένα OAP τότε συνδέεται αναγκαστικά με αυτό, αλλά αν βρίσκεται σε περιοχή που υπάρχει επικάλυψη ανάμεσα στις περιοχές εξυπηρέτησης δύο OAPs τότε επιλέγει να συνδεθεί με εκείνο στο οποίο έχει μεγαλύτερο κέρδος, αφού εκεί είναι και πιθανότερο να έχει την καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας.

### **4.3.1.2 Κατανομή Υποφερουσών**

Ταξινομούμε τους χρήστες που ανήκουν σε κάθε OAP με βάση πάλι το μεγαλύτερο κέρδος καναλιού, δηλαδή από το μεγαλύτερο προς το μικρότερο. Έτσι, ξεκινάμε να μοιράζουμε τα RBs του συνολικού εύρους ζώνης που μπορεί να διαθέσει το κάθε OAP σειριακά, από τον πρώτο χρήστη μέχρι τον τελευταίο. Ο αριθμός των RBs είναι πεπερασμένος για κάθε OAP, έτσι αν σε κάποιο υπάρχουν λιγότεροι χρήστες από τον αριθμό των RBs, τότε κάποιοι θα χρησιμοποιήσουν παραπάνω τους ενός για να εκπέμψουν, ενώ αν σε κάποιο άλλο υπάρχουν περισσότεροι, τότε κάποιοι δεν θα χρησιμοποιήσουν κανένα. Δεν επιτρέπεται σε χρήστες του ίδιου OAP να χρησιμοποιούν το ίδιο RB. Έχουμε θεωρήσει κανάλια με επίπεδες διαλείψεις (flat fading), οπότε η συμπεριφορά των χρηστών δεν εξαρτάται από το είδος του RB που θα χρησιμοποιήσουν, παρά μόνο από το πλήθος.

### 4.3.1.3 Υπολογισμός Βέλτιστης Ισχύος Εκπομπής

Σε αυτό το βήμα υπολογίζουμε την ισχύ με την οποία πρέπει να εκπέμψει ο κάθε χρήστης, ανάλογα με τα RBs που του έχουν διατεθεί, προκειμένου να μεγιστοποιήσει τη συνάρτηση χρησιμότητάς του. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης, που αναφέρθηκε και παραπάνω είναι το εξής :

$$\max(U_i(P_i)) , i = 1, \dots, N$$

με τον περιορισμό 
$$\sum_{s=1}^S P_{i,s} \leq P_{max}$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση  $s$  είναι το κάθε RB που χρησιμοποιεί ο χρήστης  $i$  και  $S$  ο συνολικός αριθμός που μπορεί να διαθέσει το OAP. Δηλαδή, η συνολική ισχύς για όλα τα RBs δεν πρέπει να ξεπερνάει ένα συγκεκριμένο όριο.

Για να λυθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα πρέπει να ζητήσουμε να μηδενίζεται η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης χρησιμότητας ως προς την ισχύ, δηλαδή :

$$\frac{\partial U_i(P_i)}{\partial P_i} = 0$$

Το διαθέσιμο εύρος ζώνης που διαθέτει ο κάθε χρήστης εξαρτάται από τα RBs που μπορεί να χρησιμοποιήσει και είναι  $W * N_i = W * \frac{s_i}{S}$ , όπου  $s_i$  είναι ο αριθμός RBs που χρησιμοποιεί και  $S$  ο συνολικός διαθέσιμος αριθμός.

Κάνοντας αντικατάσταση και εκτελώντας τις πράξεις έχουμε διαδοχικά :

$$\frac{W * N_i * P_i * \frac{\partial f\{\gamma_i(P_i)\}}{\partial P_i} - W * N_i * f\{\gamma_i(P_i)\}}{(P_i)^2} = 0 \quad (6) \Leftrightarrow$$

$$P_i * \frac{\partial f\{\gamma_i(P_i)\}}{\partial P_i} - f\{\gamma_i(P_i)\} = 0 \quad (7)$$

Σύμφωνα με τον κανόνα της αλυσίδας έχουμε :

$$\frac{\partial f\{\gamma_i(P_i)\}}{\partial P_i} = \frac{\partial f\{\gamma_i(P_i)\}}{\partial \gamma_i} * \frac{\partial \gamma_i}{\partial P_i} \quad (8)$$

Είναι

$$\gamma_i = \frac{R_{PD} * P_i * G_{i,j}}{\xi + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N I_{k,j}}$$

Οπότε

$$\frac{\partial \gamma_i}{\partial P_i} = \frac{R_{PD} * G_{i,j}}{\xi + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N I_{k,j}} = \frac{\gamma_i}{P_i} \quad (9)$$

Έτσι, η (7) λόγω των (8) , (9) γίνεται :

$$\gamma_i * \frac{\partial f\{\gamma_i(P_i)\}}{\partial \gamma_i} - f\{\gamma_i(P_i)\} = 0 \quad (10)$$

Αποδεικνύεται ότι λόγω της σιγμοειδούς φύσης της συνάρτησης  $f$  ως προς το  $\gamma_i$  η (10) έχει μοναδική λύση,  $\gamma_i^*$  που δίνεται από τον τύπο :

$$\gamma_i^* * A * M + 1 = \exp(\gamma_i^* * A) \quad (11)$$

Η μοναδική ισχύς εκπομπής που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητας  $U_i$  θα δίνεται από τον τύπο :

$$P_i^* = \frac{\gamma_i^* (\xi + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N I_{k,j})}{R_{PD} * G_{i,j}}$$

Για να είμαστε σίγουροι ότι ισχύει ο περιορισμός  $\sum_{S=1}^S P_{i,S} \leq P_{max}$  η τελική ισχύς εκπομπής που θα αναθέσουμε σε κάθε χρήστη για το σύνολο των υποφερουσών που θα χρησιμοποιήσει θα είναι :

$$P_i^{final} = \min(P_i^*, P_{max})$$

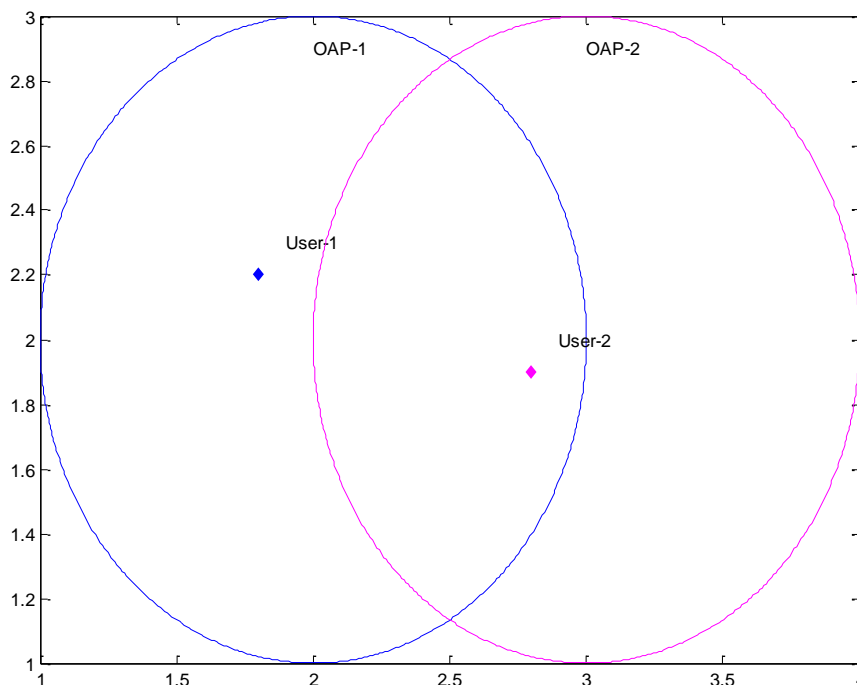
Για τον υπολογισμό των παρεμβολών έπρεπε να λάβουμε υπόψη μας τα εξής :

- Δεν υπάρχει παρεμβολή ανάμεσα στους χρήστες του ίδιου OAP που χρησιμοποιούν διαφορετικό RB του συνολικού εύρους ζώνης, λόγω

ορθογωνιότητας του OFDMA. Επίσης δεν επιτρέπεται στους χρήστες του ίδιου OAP να χρησιμοποιούν το ίδιο RB.

- Παρεμβολή μπορούν να προκαλέσουν μόνο χρήστες που εκπέμπουν στα ίδια RBs και ανήκουν σε διαφορετικά OAPs.
- Πρέπει να υπάρχει οπτική επαφή του χρήστη που θα προκαλέσει την παρεμβολή, με το OAP που εξυπηρετεί τον χρήστη που θα την υποστεί.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι ένας χρήστης  $i$  που εξυπηρετείται από το OAP  $k$ , θα δέχεται παρεμβολή από κάθε χρήστη  $j$  που εξυπηρετείται από κάποιο OAP  $l$ ,  $l \neq k$ , αν και μόνο αν, υπάρχει επικάλυψη στις περιοχές κάλυψης των δύο OAPs και ο χρήστης  $j$  βρίσκεται τοποθετημένος στην περιοχή της επικάλυψης (Δυνητικά δηλαδή ο χρήστης  $j$  θα μπορούσε να εξυπηρετείται από το OAP  $k$  του χρήστη  $i$ , αλλά έχει επιλέξει τελικά το OAP  $l$  επειδή έχει μεγαλύτερο κέρδος ως προς εκείνο  $G_{j,l} > G_{j,k}$ ). Έτσι ο χρήστης  $j$  που «φαίνεται» από το OAP  $k$  θα προκαλεί παρεμβολή στο χρήστη  $i$  στο κοινό RB που χρησιμοποιούν, με τιμή  $I_{i,k} = G_{j,k} * P_j$ . Για να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος υπολογισμού των παρεμβολών ακολουθεί το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 17).



Σχήμα 17. Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου υπολογισμού των παρεμβολών.

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε ένα υποθετικό σενάριο στο οποίο έχουμε θεωρήσει δύο OAPs και δύο χρήστες. Ο χρήστης-1 ανήκει στο OAP-1 και ο χρήστης-2 ανήκει στο OAP-2. Παρατηρούμε ότι ο χρήστης-2 ανήκει στην περιοχή κάλυψης και του OAP-1. Αν θεωρήσουμε ότι οι δύο παραπάνω χρήστες έχουν κάποιο ή κάποια κοινά RBs τότε ο χρήστης-2 προκαλεί παρεμβολή στον χρήστη-1 στα συγκεκριμένα RBs.

#### 4.3.1.4 Επανάληψη της Διαδικασίας

Για τον αρχικό υπολογισμό των μεγεθών που επηρεάζουν το σύστημα (στην ουσία των παρεμβολών) έχουμε θεωρήσει ότι όλοι οι χρήστες εκπέμπουν με τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Κάθε φορά που ολοκληρώνεται ένας κύκλος των βημάτων του αλγορίθμου αυτή η τιμή ανανεώνεται και γίνεται ίση με  $P_i^{final}$ . Έτσι, όταν ο αλγόριθμος έχει τρέξει για ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων, θα έχει συγκλίνει στην επιθυμητή τιμή ισχύος που ζητάμε. Ο αλγόριθμος συνεχίζει να εκτελείται μέχρι να έχουν υπολογιστεί οι τελικές τιμές για την ισχύ όλων των χρηστών. Σαν κριτήριο για τη σύγκλιση της ισχύος και το τέλος των επαναλήψεων, έχουμε θεωρήσει τη διαφορά δύο διαδοχικών τιμών που υπολογίζει ο αλγόριθμός μας.

### 4.3.2 Αλγόριθμος Κατανομής Πόρων με Τεχνική NOMA

Ο δεύτερος αλγόριθμος που χρησιμοποιήσαμε βασίζεται στην τεχνική NOMA και η φιλοσοφία του είναι παρόμοια με του πρώτου αλγορίθμου, με κάποιες ουσιαστικές διαφορές. Ακολουθούν τα επιμέρους βήματα που χρησιμοποιεί και στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των σημείων που υπάρχει διαφοροποίηση με τον προηγούμενο.

**Βήμα 1** : Αρχικά βρίσκουμε σε ποιο OAP θα συνδεθεί ο κάθε χρήστης με βάση το κέρδος του. Αν δηλαδή έχει οπτική επαφή με περισσότερα του ενός OAPs θα επιλέξει να συνδεθεί με εκείνο στο οποίο έχει το μεγαλύτερο κέρδος (όπως ακριβώς και το Βήμα 1 του πρώτου αλγορίθμου).



**Βήμα 2** : Ο κάθε χρήστης έχει στη διάθεσή του το συνολικό εύρος ζώνης  $W$  για να εκπέμψει.

**Βήμα 3** : Για κάθε χρήστη υπολογίζουμε την ισχύ εκπομπής, έτσι ώστε να μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητάς του, λαμβάνοντας πάντα υπόψη μας να τηρείται ο περιορισμός για τη μέγιστη ισχύ.

**Βήμα 4** : Ανανεώνουμε τη μέγιστη ισχύ του χρήστη, με βάση την τιμή που υπολογίσαμε στο Βήμα 3, ώστε τελικά ο αλγόριθμος να συγκλίνει στην μικρότερη δυνατή τιμή ισχύος που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητας (όπως ακριβώς και το Βήμα 4 του πρώτου αλγορίθμου).

**Βήμα 5** : Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία μέχρι να έχουν εξυπηρετηθεί όλοι οι χρήστες (όπως ακριβώς και το Βήμα 5 του πρώτου αλγορίθμου).

### 4.3.2.1 Διαφορές στην Υλοποίηση των Δύο Αλγορίθμων

Οι δύο αλγόριθμοι έχουν πολλά κοινά βήματα και χρησιμοποιούν εν γένει τις ίδιες τεχνικές για τον υπολογισμό της ελάχιστης ισχύος εκπομπής που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητας των χρηστών. Έχουν όμως και δύο βασικές διαφορές.

Πιο συγκεκριμένα, οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης για να εκπέμψουν στο NOMA μοντέλο. Αυτό, αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης που μπορούν να επιτύχουν, αλλά αυξάνει και την απαραίτητη ισχύ, καθώς πλέον υπάρχουν παρεμβολές ανάμεσα στους χρήστες μέσα στο ίδιο OAP, αφού όλοι χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες και έχει χαθεί η ορθογωνιότητα που υπήρχε προηγουμένως. Αυτό το γεγονός δημιουργεί και μια διαφοροποίηση στον αλγόριθμο υπολογισμού της ισχύος εκπομπής, καθώς πλέον οι χρήστες έχουν στη διάθεσή τους το συνολικό εύρος ζώνης  $W$  και έτσι το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει τώρα τη μορφή

$$\max(U_i(P_i)) , i = 1, \dots, N$$

με τον περιορισμό

$$P_i \leq P_{max}, \forall i \in N$$

δηλαδή η ισχύς εκπομπής του κάθε χρήστη, που είναι πλέον ενιαία για ολόκληρο το εύρος ζώνης, να είναι μικρότερη από κάποιο όριο.

Το μοντέλο NOMA για να αντιμετωπίσει τις αυξημένες αυτές παρεμβολές χρησιμοποιεί ένα σχήμα διαδοχικής ακύρωσης των παρεμβολών (successive interference cancellation – SIC). Το SIC βασίζεται στη σειρά αποκωδικοποίησης των δεδομένων από τους χρήστες. Πιο αναλυτικά, ορίζεται μια ουρά αποκωδικοποίησης με βάση την απόσταση των χρηστών από το OAP. Σε αυτήν την ουρά οι χρήστες με την μικρότερη απόσταση, και άρα με το μεγαλύτερο κέρδος, βρίσκονται χαμηλότερα. Σύμφωνα με το σχήμα SIC, κάποιο χρήστης δέχεται παρεμβολές μόνο από τους χρήστες που βρίσκονται πιο ψηλά από αυτόν στην ουρά αποκωδικοποίησης. Έτσι για παράδειγμα ο χρήστης που έχει το μεγαλύτερο κέρδος δέχεται παρεμβολή από όλους τους υπόλοιπους, ενώ ο χρήστης με το μικρότερο κέρδος από κανέναν. [17] Τα υπόλοιπα βήματα του αλγορίθμου γίνονται όπως ακριβώς και πριν, με μοναδικές διαφοροποιήσεις το διαθέσιμο εύρος ζώνης και τον τρόπο υπολογισμού των παρεμβολών.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα συγκεκριμένα σενάρια που προσομοιώσαμε για να δείξουμε τη χρησιμότητα του αλγορίθμου μας και να παρατηρήσουμε τις διαφορές ανάμεσα στους δύο τρόπους.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

## 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα ορίσουμε τις αριθμητικές τιμές των παραμέτρων του συστήματος που αναλύσαμε και θα περιγράψουμε τα διαφορετικά σενάρια τοπολογιών που χρησιμοποιήσαμε για να αποδείξουμε τη χρησιμότητα των αλγορίθμων που προτάθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και θα προσπαθήσουμε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα τόσο για τους αλγορίθμους μας, όσο και για τη γενικότερη συμπεριφορά ασύρματων δικτύων ορατού φωτός..

## 5.2 Ορισμός Παραμέτρων του Συστήματος

Στον παρακάτω πίνακα θα αναφέρουμε αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του συστήματος και τις αριθμητικές τους τιμές. [8], [11], [14], [15]

Αριθμός χρηστών του συστήματος $N$	56
Αριθμός Σημείων Οπτικής Πρόσβασης (OAPs) $M$	8
Συνολικός αριθμός RBs που μπορεί να διαθέσει το κάθε OAP $S$	7
Συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης $W$ για κάθε OAP	20 MHz
Μέγιστη ισχύς εκπομπής για κάθε χρήστη $P_{max}$	1 W
Ισχύς θορύβου $\xi$	$0.03 * 10^{-18} W$
Γωνία ημίσειας ισχύος του πομπού	$\pi/6$ rad
Εμβαδό του φωτοανιχνευτή	$3 * 10^{-6} m^2$
Συντελεστής ανάκλασης του δέκτη	1.5
Οπτικό πεδίο του δέκτη (Field Of View - FOV)	$\pi/3$ rad
Αποκρισιμότητα της φωτοδιόδου του δέκτη (R_PD)	0.63
Κέρδος του δέκτη	1
Στόχος SINR	6.5 dB
Παράμετροι της συνάρτησης αποδοτικότητας $f$	A=0.2 M=1.61
Διαστάσεις δωματίου	$10m x 6m^2$

Ύψος τοποθέτησης των OAPs	3 m
---------------------------	-----

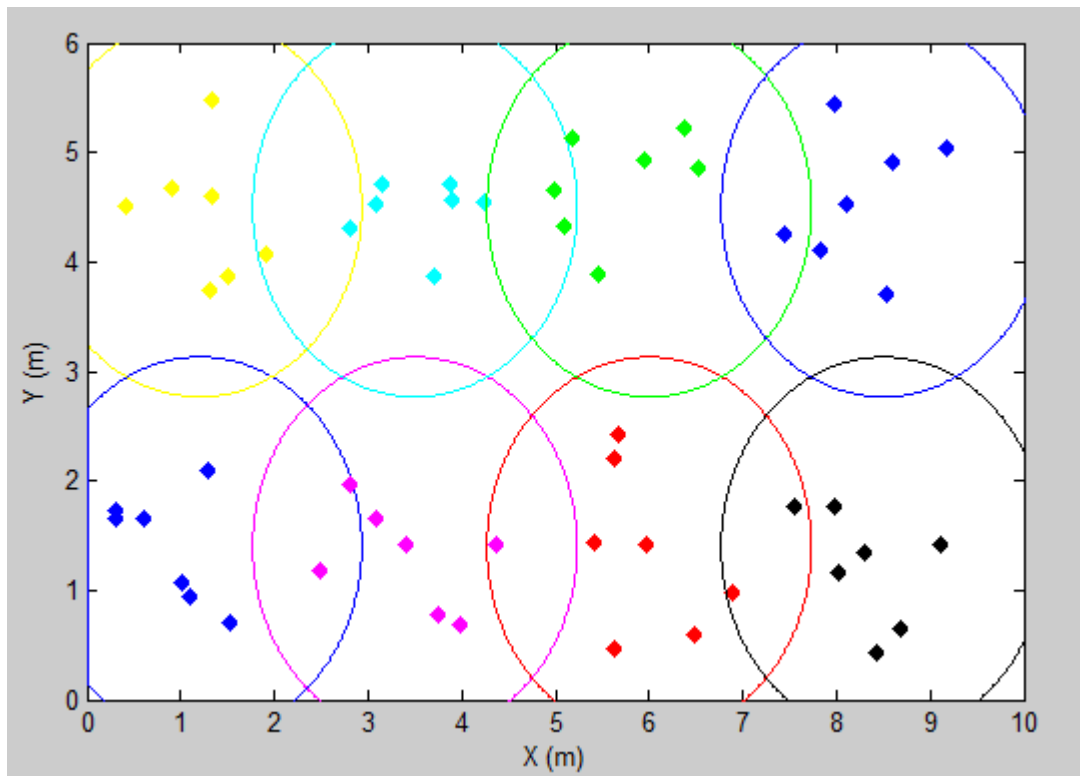
Πίνακας 2. Παράμετροι του συστήματος.

## 5.3 Σενάρια Προσομοίωσης

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιάσουμε τα δύο διαφορετικά σενάρια που χρησιμοποιήσαμε για να προσομοιώσουμε το σύστημά μας.

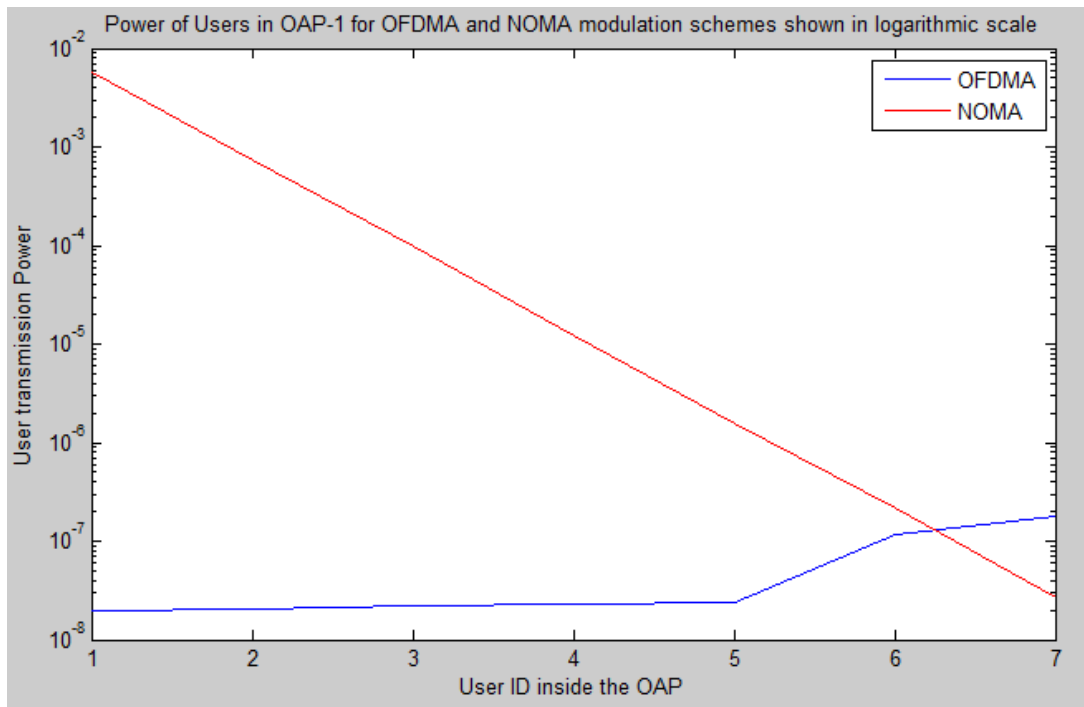
### 5.3.1 1<sup>ο</sup> Σενάριο Προσομοίωσης με Ομοιόμορφη Κατανομή των Χρηστών στο Χώρο

Σε αυτό το σενάριο θεωρήσαμε τους 56 χρήστες ομοιόμορφα κατανεμημένους στα 8 OAPs, έχουμε δηλαδή από 7 χρήστες σε κάθε OAP. Αυτή μπορούμε να πούμε πως είναι και η πλήρης χωρητικότητα του συστήματος στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε τεχνική OFDMA, καθώς όπως είδαμε παραπάνω κάθε OAP μπορεί να διαχωρίσει το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε 7 RBs, και δεν επιτρέπεται επαναχρησιμοποίηση του ίδιου RB από διαφορετικούς χρήστες μέσα στο ίδιο OAP. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε την τεχνική NOMA το σύστημα δεν διαθέτει κάποια μέγιστη χωρητικότητα αφού κάθε χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης για να εκπέμψει. Η αρίθμηση των OAPs και για τις δύο τοπολογίες έχει γίνει από το κάτω αριστερά OAP προς το πάνω δεξιά σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 18) φαίνεται η τοπολογία που μελετήσαμε

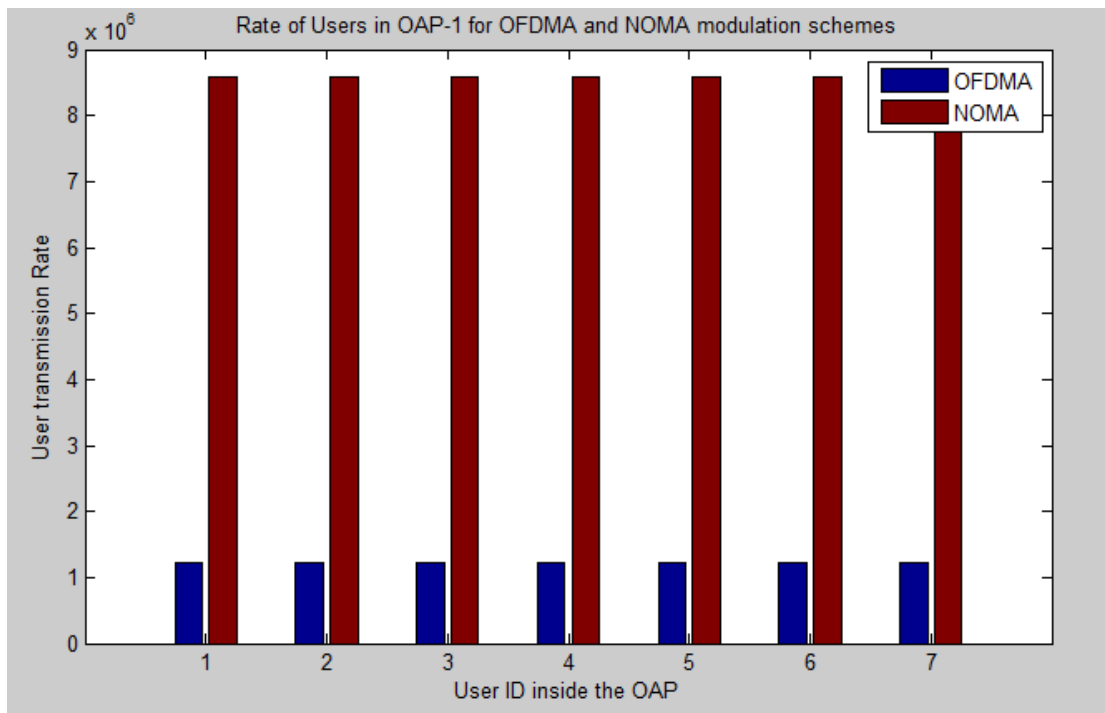


**Σχήμα 18. Τοπολογία με ομοιόμορφη κατανομή των χρηστών.**

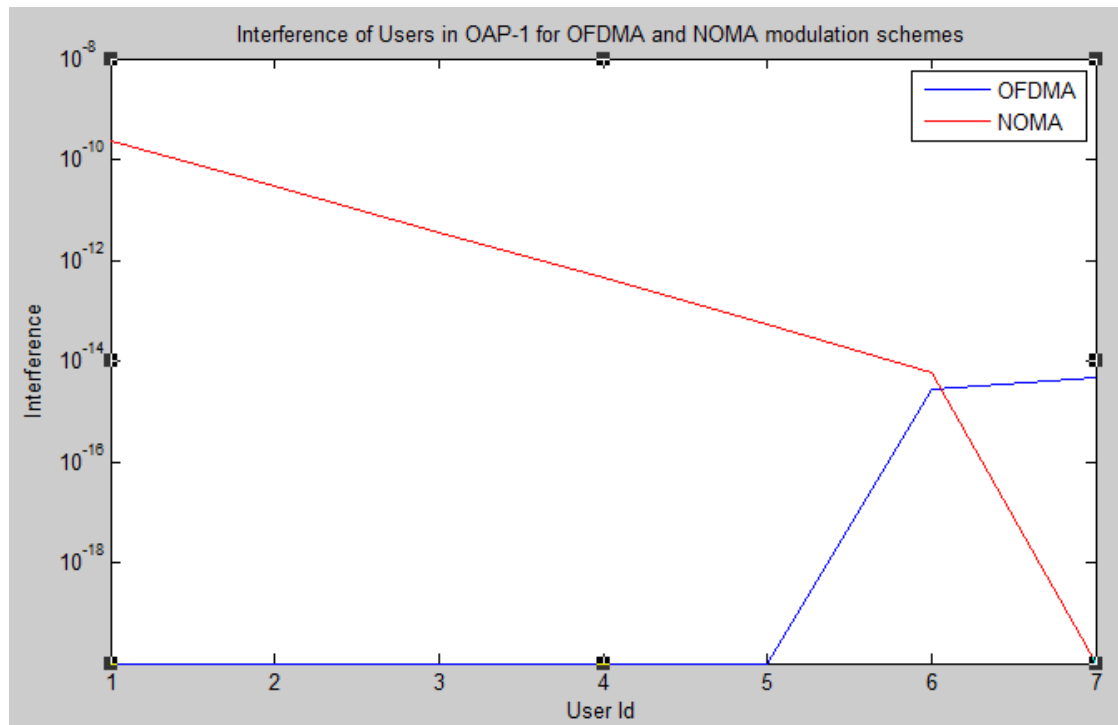
Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η κάτοψη του δωματίου που μοντελοποιήσαμε. Ως χρωματιστοί κύκλοι απεικονίζονται οι περιοχές κάλυψης του κάθε OAP και με το ίδιο χρώμα στο εσωτερικό τους οι χρήστες τους οποίους εξυπηρετεί (7 σε κάθε OAP). Οι χρήστες αφού « διαλέξουν » από ποιο OAP θα εξυπηρετηθούν με βάση το μεγαλύτερο κέρδος καναλιού όπως εξηγήθηκε παραπάνω, στη συνέχεια ταξινομούνται με φθίνουσα σειρά κέρδους για να ξεκινήσει η κατανομή των πόρων του συστήματος. Στην περίπτωση της τεχνικής OFDMA κάθε χρήστης έχει στη διάθεσή του ένα RB του συνολικού εύρους ζώνης, ενώ στην περίπτωση του NOMA έχει ολόκληρο το φάσμα. Οι παρεμβολές υπολογίστηκαν ξεχωριστά για τα δύο μοντέλα όπως αναλύθηκε προηγουμένως και στη συνέχεια παρατίθενται κάποια χαρακτηριστικά αποτελέσματα που αφορούν στην ισχύ εκπομπής, στον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης και στις παρεμβολές των χρηστών του κάθε OAP, αλλά και κάποια πιο συγκεντρωτικά διαγράμματα του μοντέλου.



Σχήμα 19. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-1.



Σχήμα 20. Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών του OAP-1.



**Σχήμα 21. Παρεμβολές των χρηστών του OAP-1.**

Στο Σχήμα 19 βλέπουμε πως κατανέμεται η ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-1 για τους δύο διαφορετικούς αλγορίθμους κατανομής πόρων που χρησιμοποιήσαμε, παρουσιασμένη σε λογαριθμική κλίμακα για καλύτερη εποπτεία. Παρατηρούμε ότι στο μοντέλο OFDMA όλοι οι χρήστες έχουν παραπλήσιες τιμές ισχύος που κυμαίνονται στα επίπεδα του  $10^{-6} - 10^{-8} \text{ W}$ . Στο μοντέλο NOMA υπάρχει μια μείωση των τιμών της ισχύος όσο μικραίνει το κέρδος των χρηστών, κάτι που είναι αναμενόμενο, δεδομένης της τεχνικής επικοινωνίας που χρησιμοποιείται. Οι τιμές κυμαίνονται από  $10^{-2} - 10^{-8} \text{ W}$  και για κάποιους χρήστες είναι αισθητά μεγαλύτερες σε σύγκριση με το OFDMA μοντέλο.

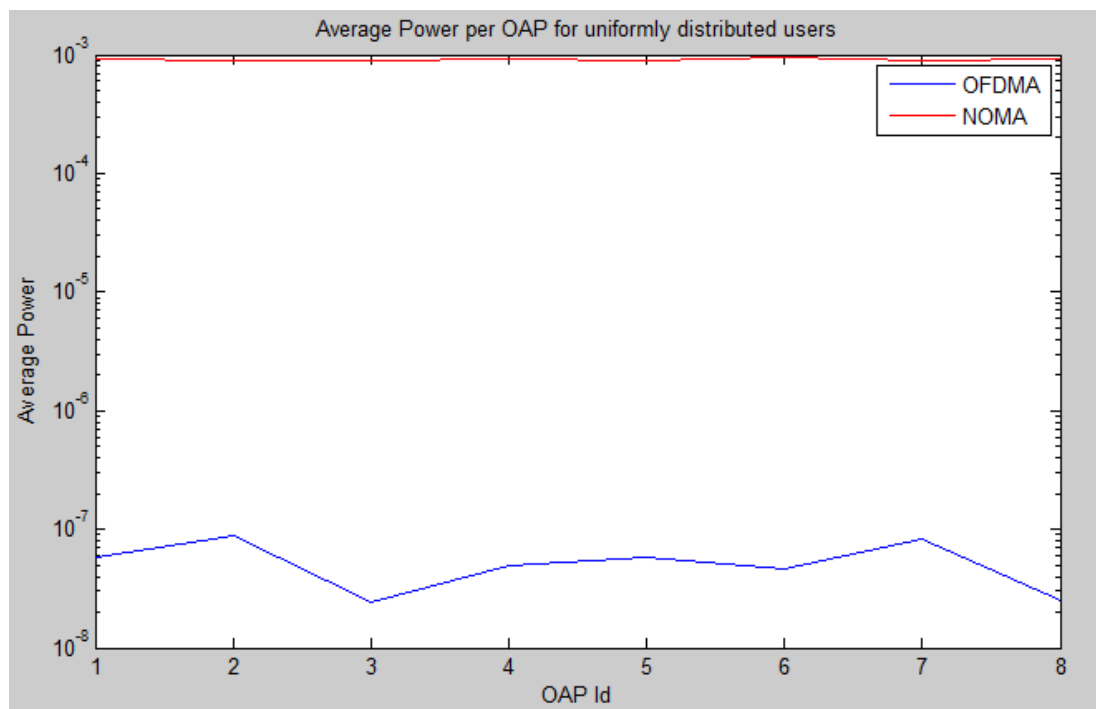
Στο Σχήμα 20 φαίνονται οι αντίστοιχες τιμές των ρυθμών μετάδοσης για τους ίδιους χρήστες. Παρατηρούμε πως όλοι οι χρήστες επιτυγχάνουν τον μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που θα μπορούσαν, ανάλογα με το εύρος ζώνης που διαθέτουν για να εκπέμψουν. Το μοντέλο NOMA αποδίδει σημαντικά μεγαλύτερους ρυθμούς.

Στο Σχήμα 21 παρουσιάζονται οι παρεμβολές που δέχονται οι χρήστες του OAP-1. Παρατηρούμε ότι στο μοντέλο NOMA οι τιμές των παρεμβολών μειώνονται όσο μειώνεται και το κέρδος καναλιού, σύμφωνα με το μοντέλο SIC που έχει

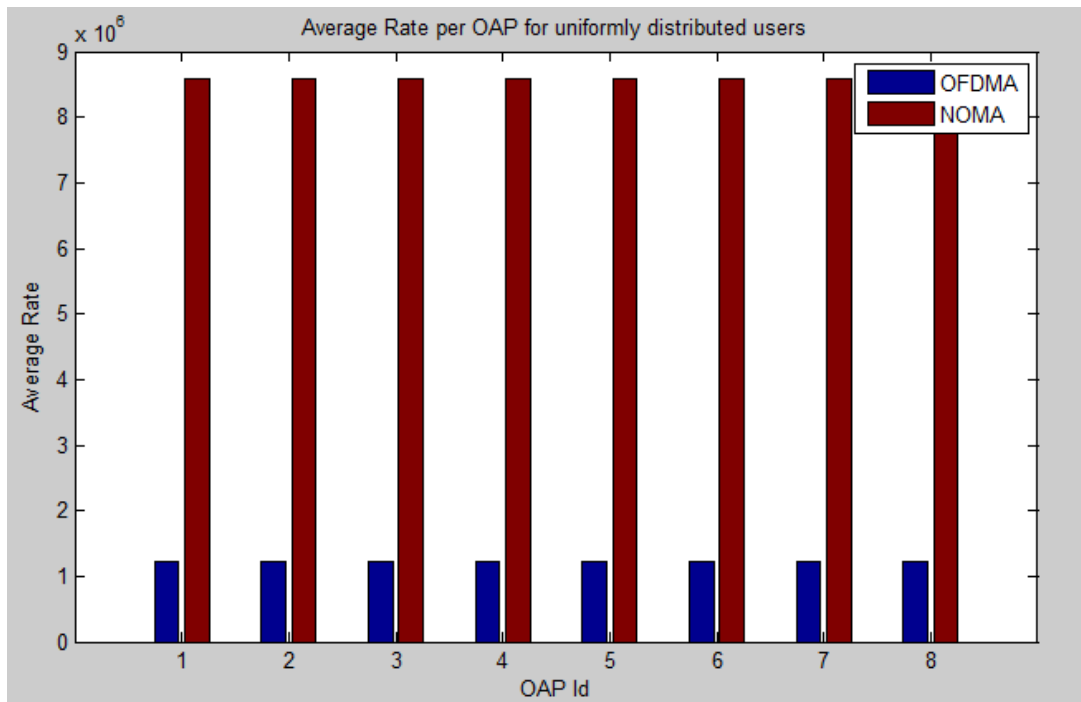


αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στην περίπτωση του OFDMA παρεμβολές δέχονται μόνο οι χρήστες 6 και 7 για τους λόγους που αναφέραμε σε προηγούμενη ενότητα. Γενικά, οι παρεμβολές στο μοντέλο NOMA είναι μεγαλύτερες από ότι στο OFDMA, με μοναδική εξαίρεση τον τελευταίο χρήστη, με το μικρότερο κέρδος καναλιού ως προς το OAP, ο οποίος στο μοντέλο NOMA δεν δέχεται παρεμβολές, ενώ στο OFDMA δέχεται.

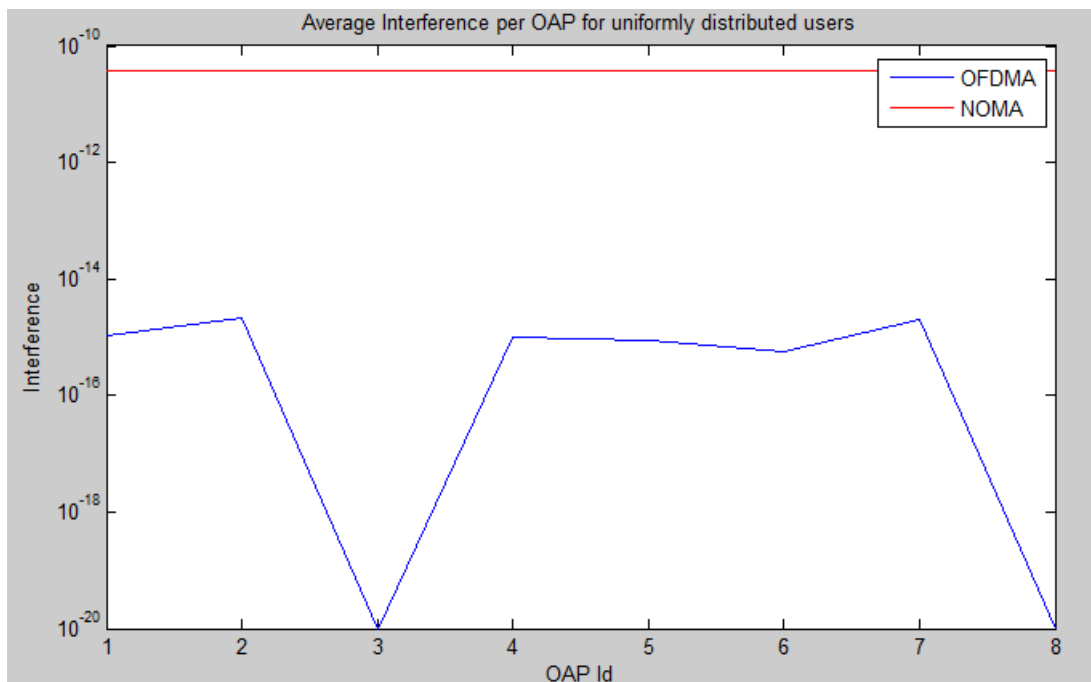
Τα αποτελέσματα για τους χρήστες των υπόλοιπων OAPs για την ομοιόμορφη τοπολογία είναι παρόμοια, καθώς οι παρεμβολές που δέχονται είναι γενικά παραπλήσιες, οπότε δεν κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν όλα αναλυτικά. Στη συνέχεια ακολουθούν κάποια πιο συγκεντρωτικά διαγράμματα για την ομοιόμορφη τοπολογία.



Σχήμα 22. Μέση τιμή ισχύος εκπομπής για κάθε OAP.



**Σχήμα 23. Μέση τιμή ρυθμού μετάδοσης για κάθε OAP.**

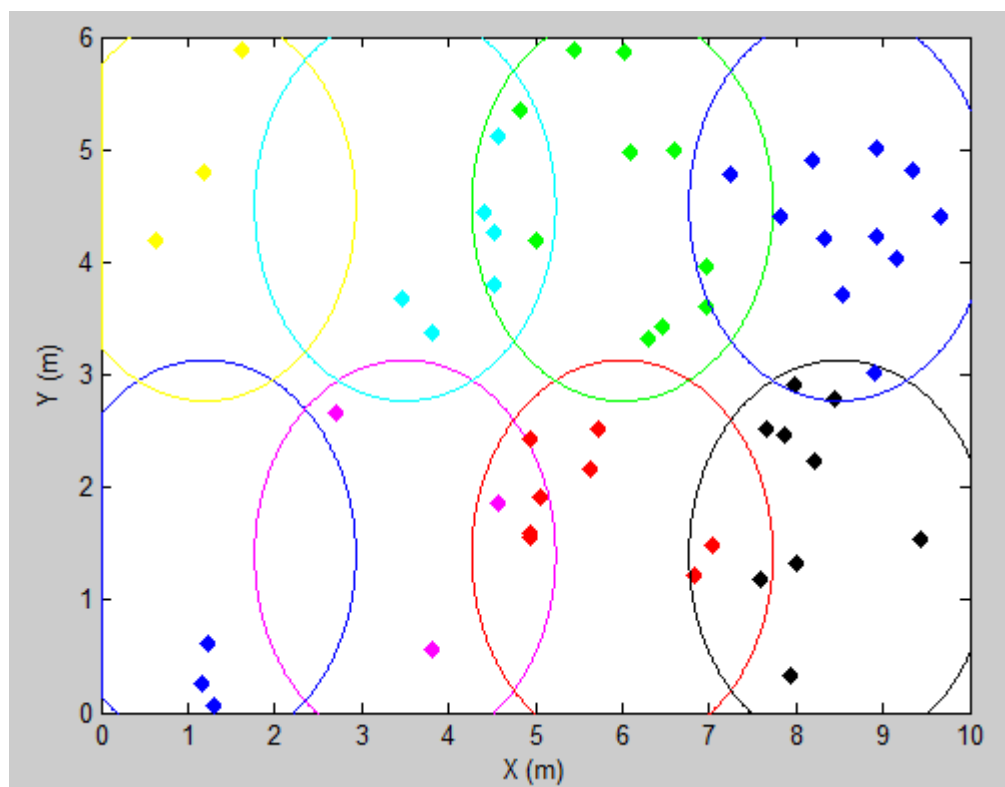


**Σχήμα 24. Μέση τιμή παρεμβολών για κάθε OAP.**

Παρατηρούμε πως οι μέσες τιμές των μεγεθών που μελετάμε, για όλα τα OAPs, και φαίνονται στα Σχήματα 22-24 είναι αυτές που αναμέναμε με βάση τα αποτελέσματα για τους χρήστες του κάθε OAP ξεχωριστά.

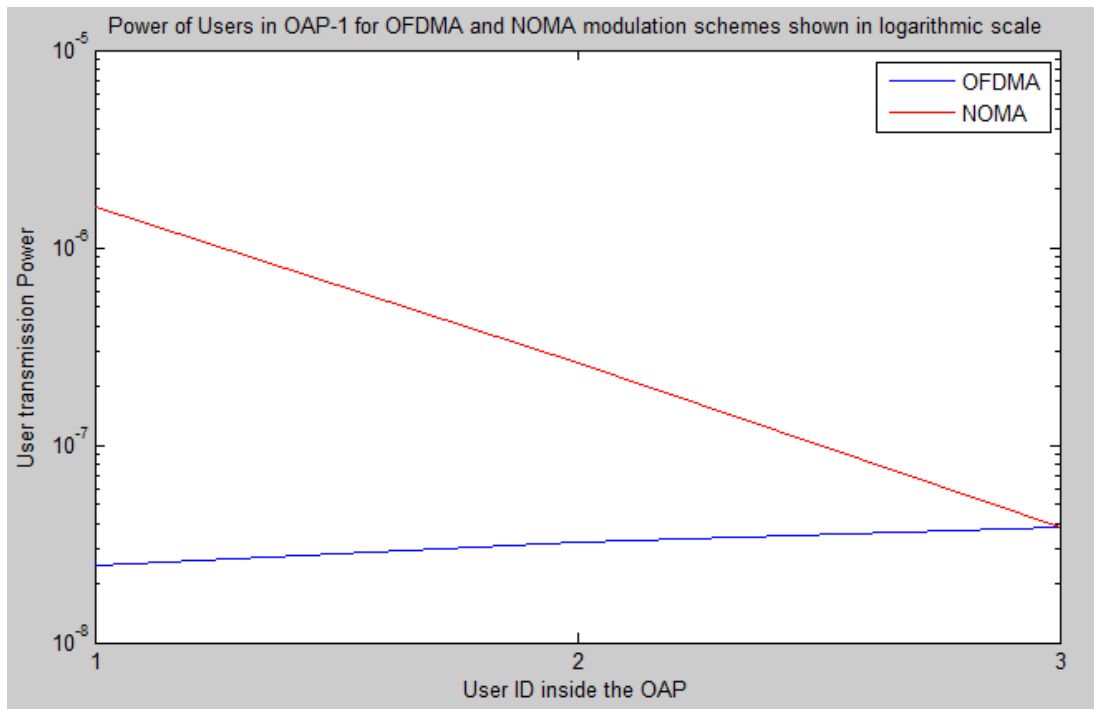
## 5.3.2 2<sup>ο</sup> Σενάριο Προσομοίωσης με Πυκνή Κατανομή των Χρηστών στο Χώρο

Σε αυτό το σενάριο θεωρήσαμε τους 56 χρήστες ανομοιόμορφα καταναμημένους στα 8 OAPs. Πιο συγκεκριμένα, τοποθετήσαμε 15 χρήστες στα 4 πρώτα OAPs και τους υπόλοιπους 41 στα αλλά 4. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήσαμε μια τοπολογία όπου στα 4 πρώτα OAPs οι χρήστες είναι αραιά καταναμημένοι και δεν υπάρχουν προβλήματα εξυπηρέτησης, ενώ στα υπόλοιπα 4 θα υπάρχει πυκνή τοποθέτηση. Αναμένουμε να υπάρχουν περιπτώσεις χρηστών που στο OFDMA μοντέλο δεν θα μπορούν να εξυπηρετηθούν, εξαιτίας του γεγονότος πως κάθε OAP μπορεί να διαθέσει μόνο 7 RBs για να εκπέμψουν οι χρήστες του και σε κάποια OAPs θα υπάρχουν περισσότεροι από 7 χρήστες. Η τοπολογία φαίνεται στο επόμενο σχήμα ( Σχήμα 25).

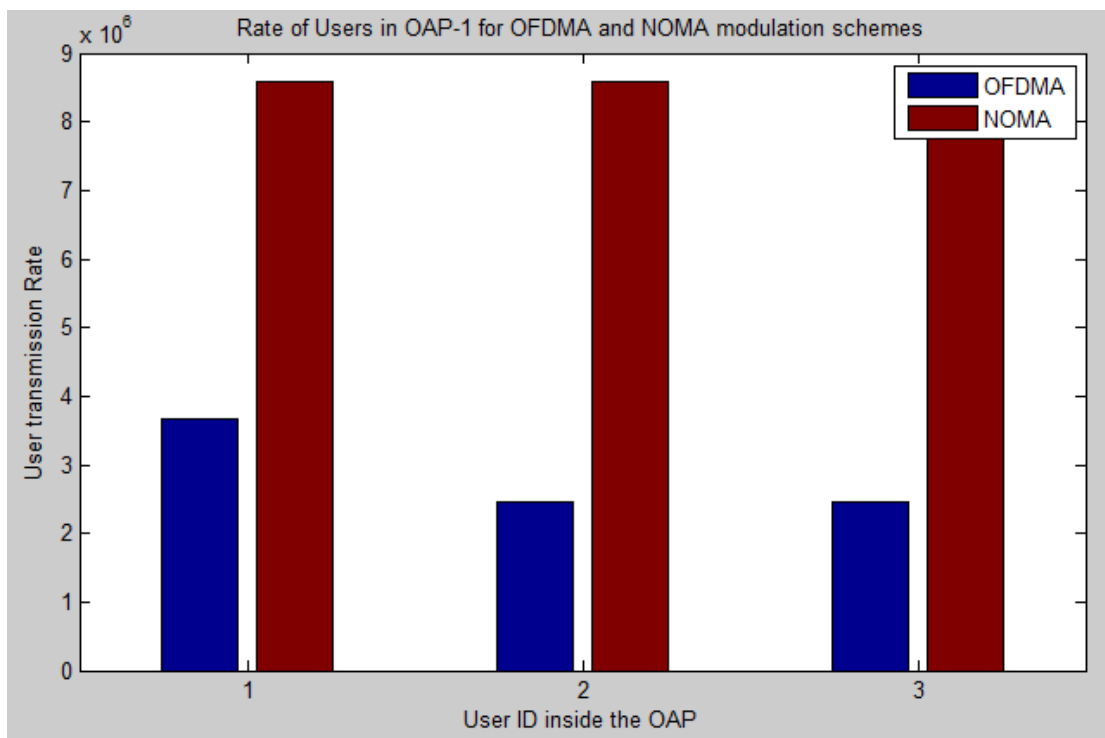


Σχήμα 25. Ανομοιόμορφη τοπολογία.

Στη συνέχεια θα ακολουθήσουν αντίστοιχα διαγράμματα με της προηγούμενης τοπολογίας για τη νέα κατανομή χρηστών.

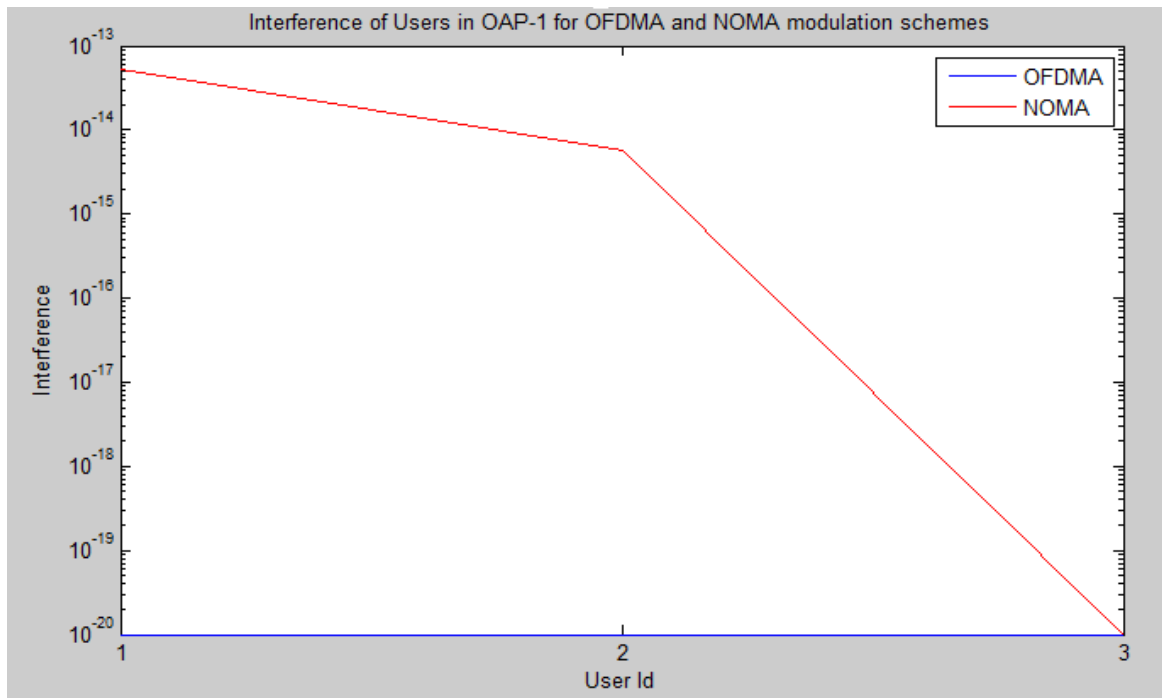


**Σχήμα 26. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-1.**

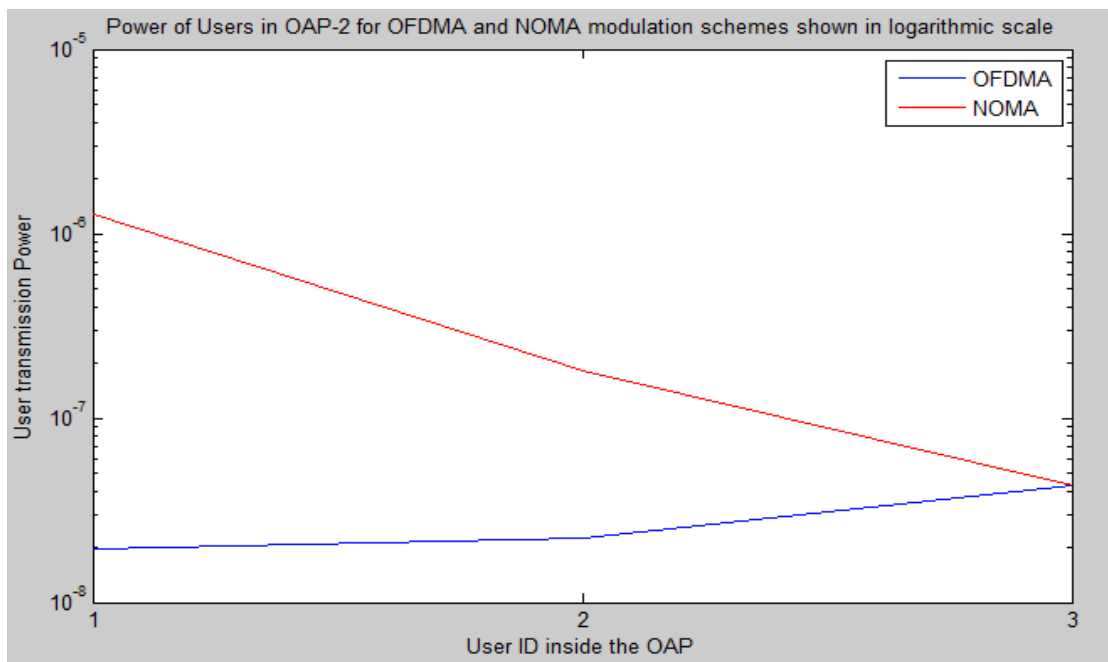


**Σχήμα 27. Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών του OAP-1.**

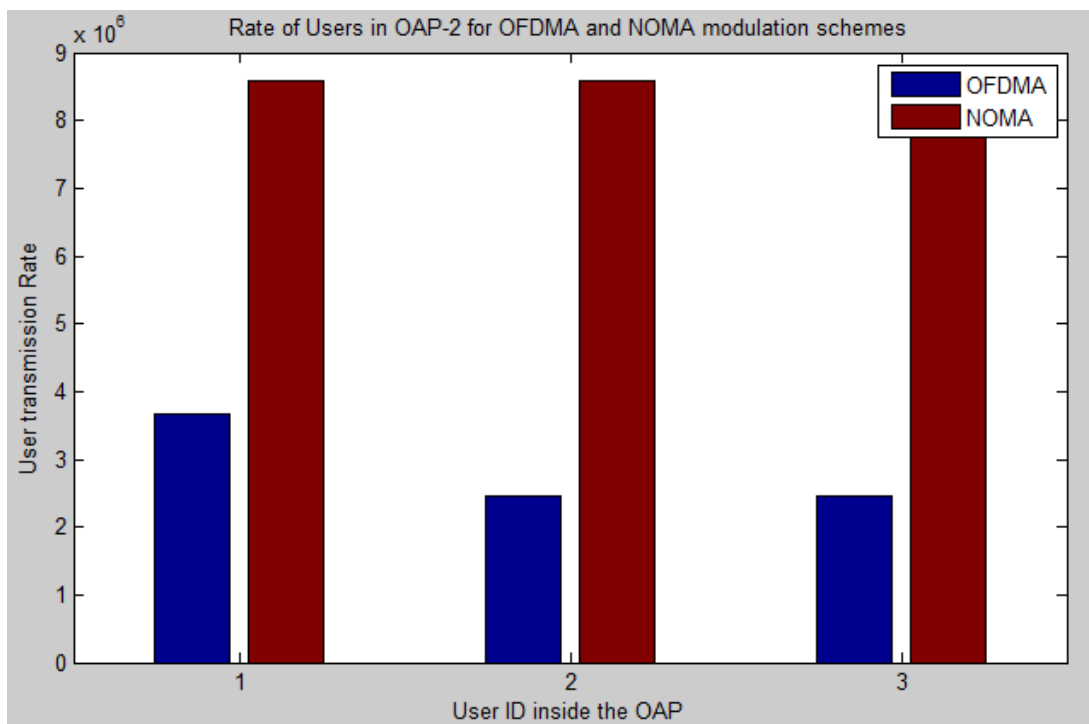
Παρατηρούμε πως διατηρείται και εδώ η γενική συμπεριφορά για τις τιμές ισχύος και ρυθμού μετάδοσης των χρηστών, δηλαδή στο μοντέλο NOMA επιτυγχάνονται υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης, με αρκετά αυξημένη όμως ισχύ. Εδώ δεν υπάρχουν παρεμβολές για το μοντέλο OFDMA.



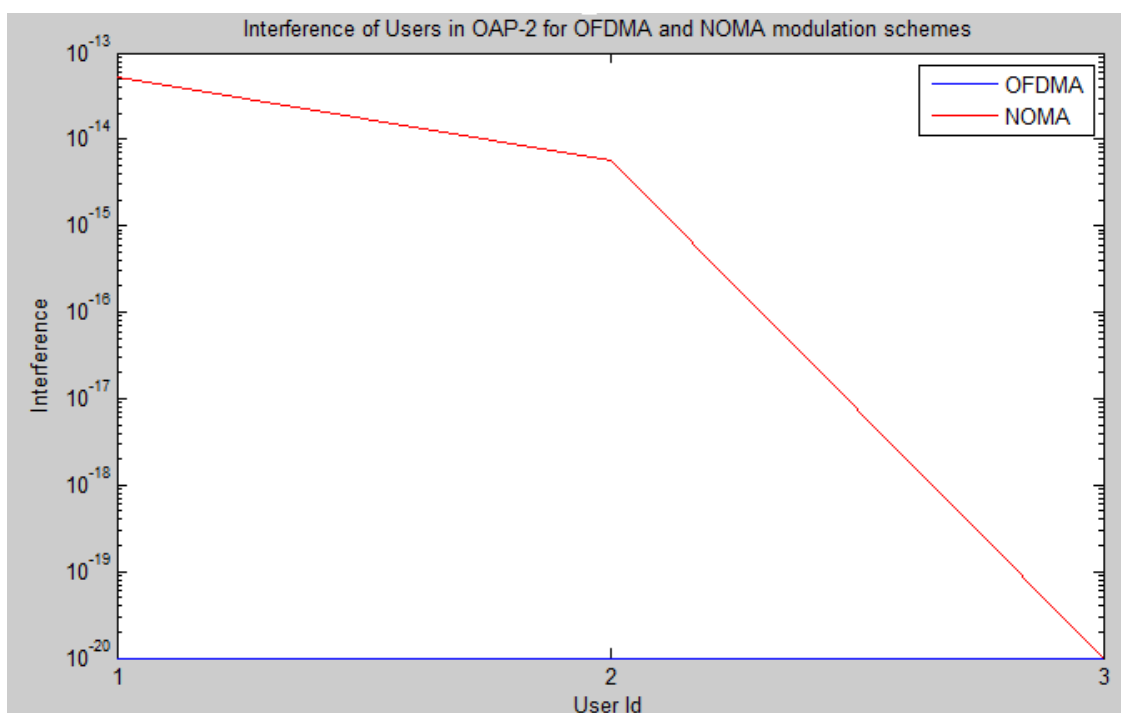
Σχήμα 28. Παρεμβολές των χρηστών του OAP-1.



Σχήμα 29. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-2.

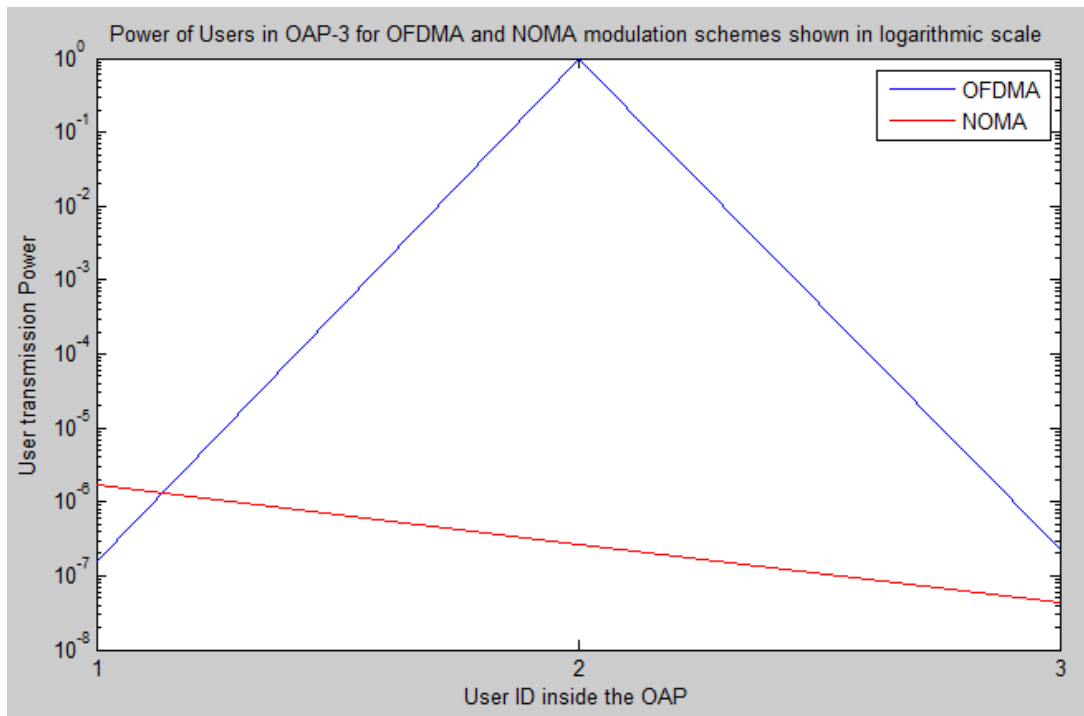


**Σχήμα 30. Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών του OAP-2.**



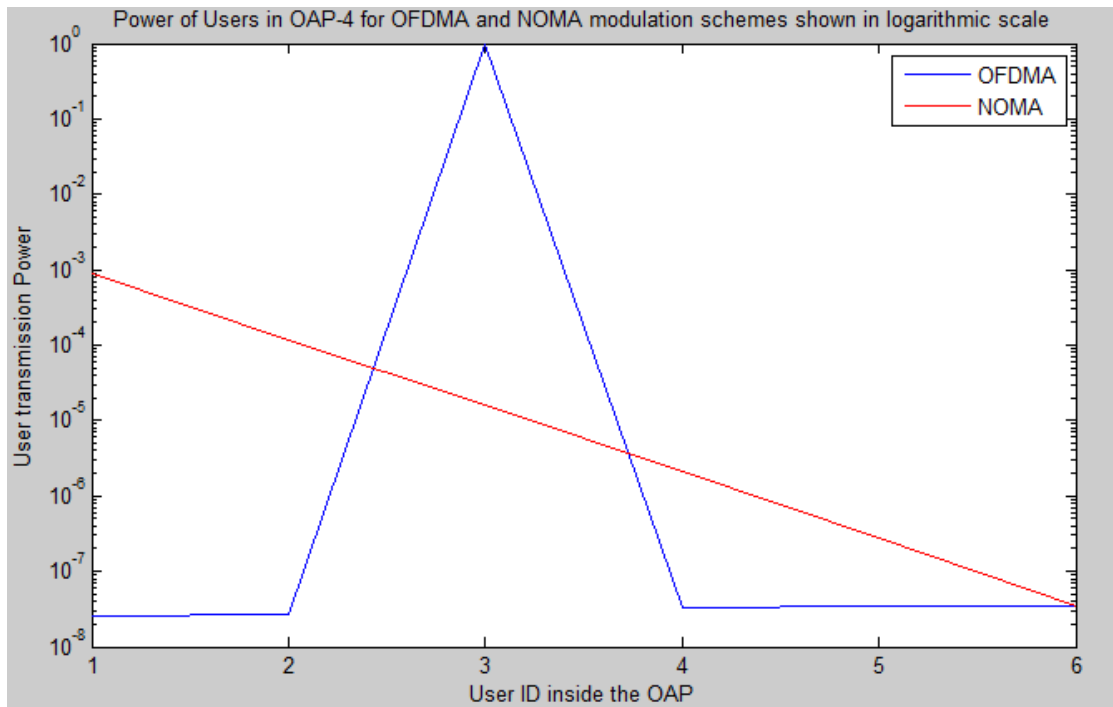
**Σχήμα 31. Παρεμβολές των χρηστών του OAP-2.**

Βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα για τους χρήστες των OAPs 1, 2 είναι παρόμοια, κάτι που περιμέναμε και με βάση την τοπολογία.

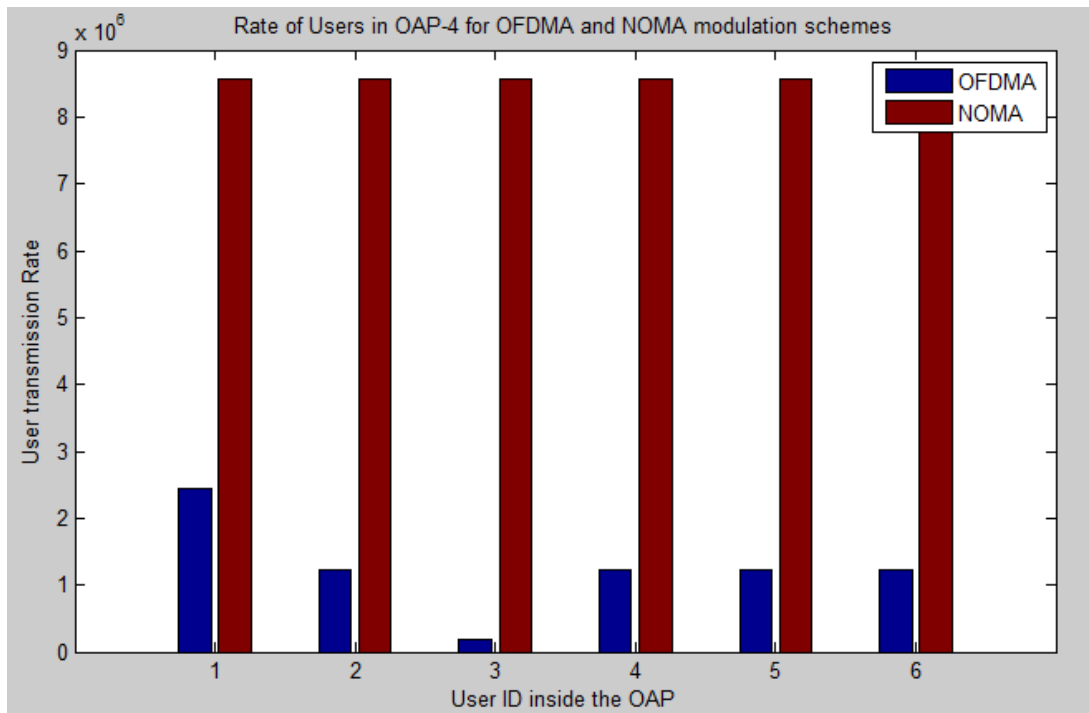


**Σχήμα 32. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-3.**

Στο Σχήμα 30 παρατηρούμε πως ο δεύτερος χρήστης του OAP-3 αναγκάζεται να εκπέμπει με τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής (1W), στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε τεχνική OFDMA. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως με βάση τον τρόπο διαμοιρασμού των RBs, με βάση το μεγαλύτερο κέρδος καναλιού και την τοποθέτηση των χρηστών στο χώρο, ο συγκεκριμένος χρήστης δέχεται πολύ υψηλές παρεμβολές (Σχήμα 32). Οι παρεμβολές του είναι περίπου 7 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από τους υπόλοιπους χρήστες και έτσι δικαιολογείται και ο αρκετά χαμηλότερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που πετυχαίνει (Σχήμα 31). Ανάλογα με την τοποθέτηση των χρηστών στο χώρο και το διαμοιρασμό των καναλιών αντίστοιχα φαινόμενα παρουσιάζονται και σε άλλα OAPs, όπως θα φανεί και στη συνέχεια.

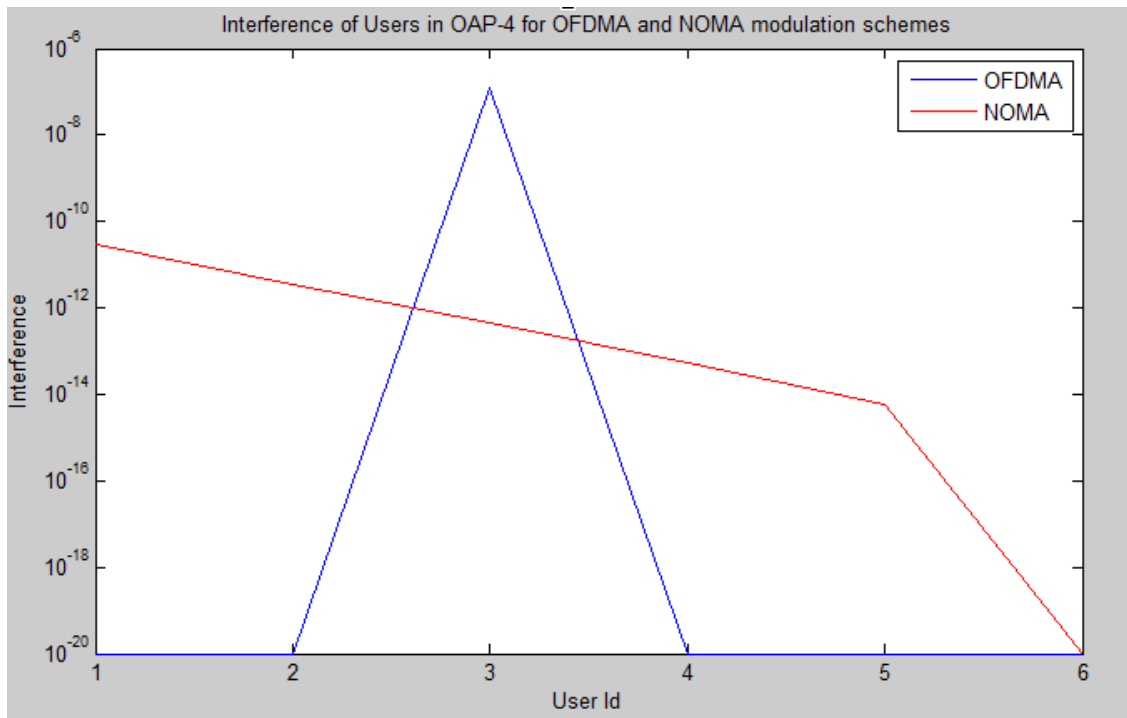


Σχήμα 33. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-4.

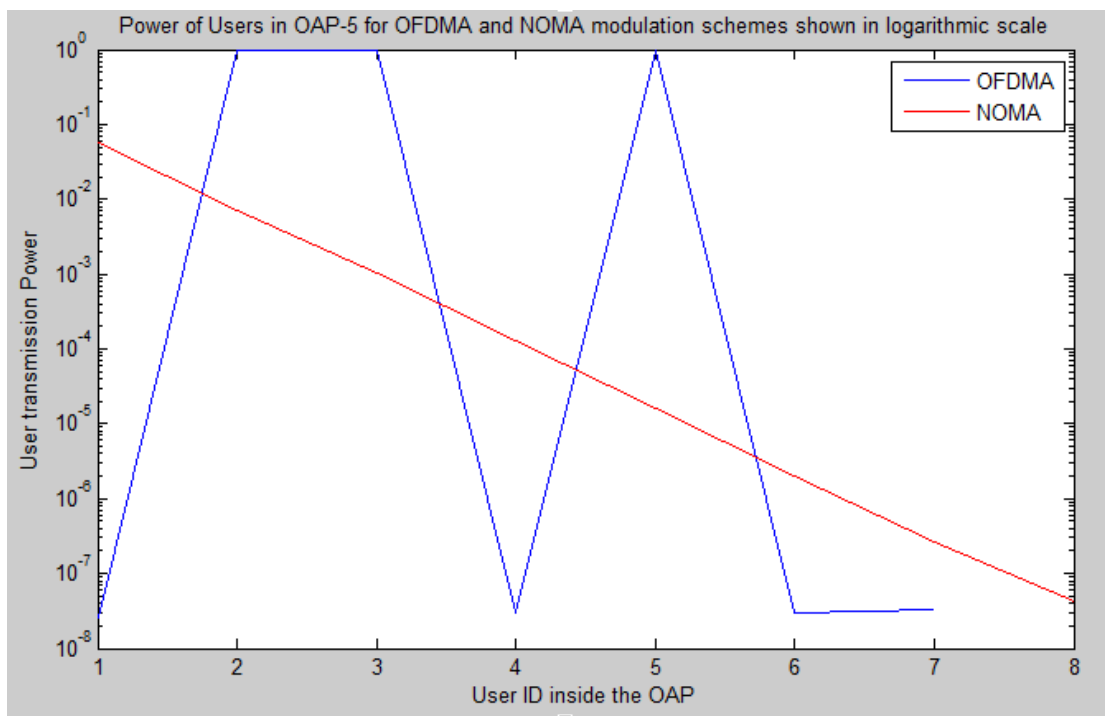


Σχήμα 34. Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών του OAP-4.

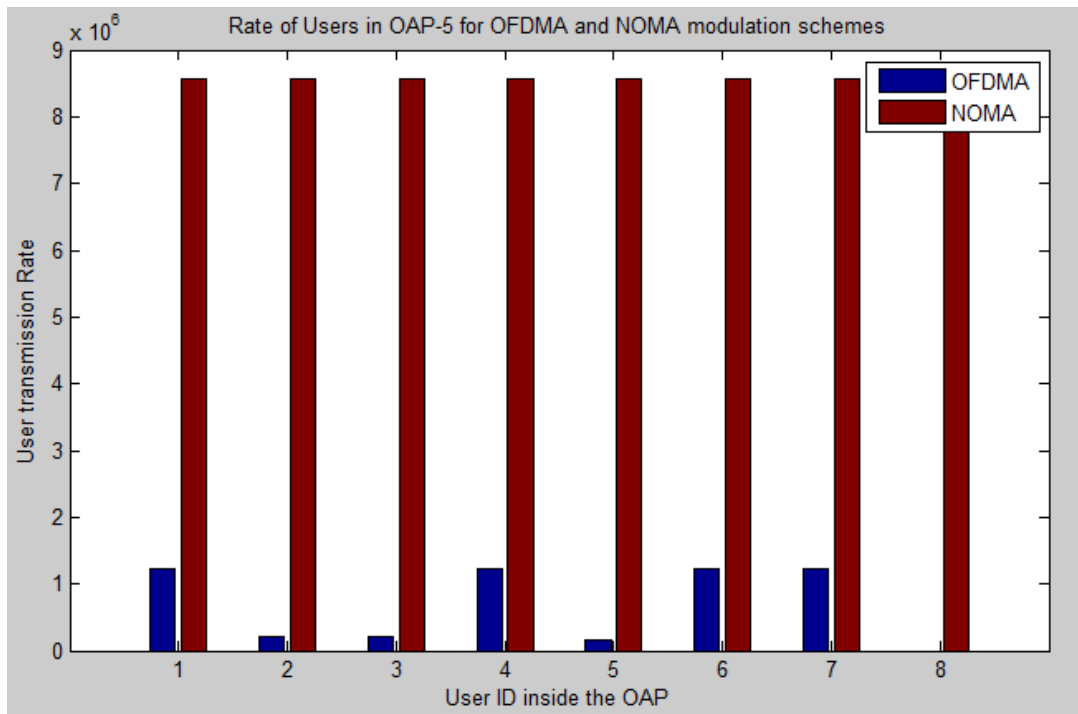




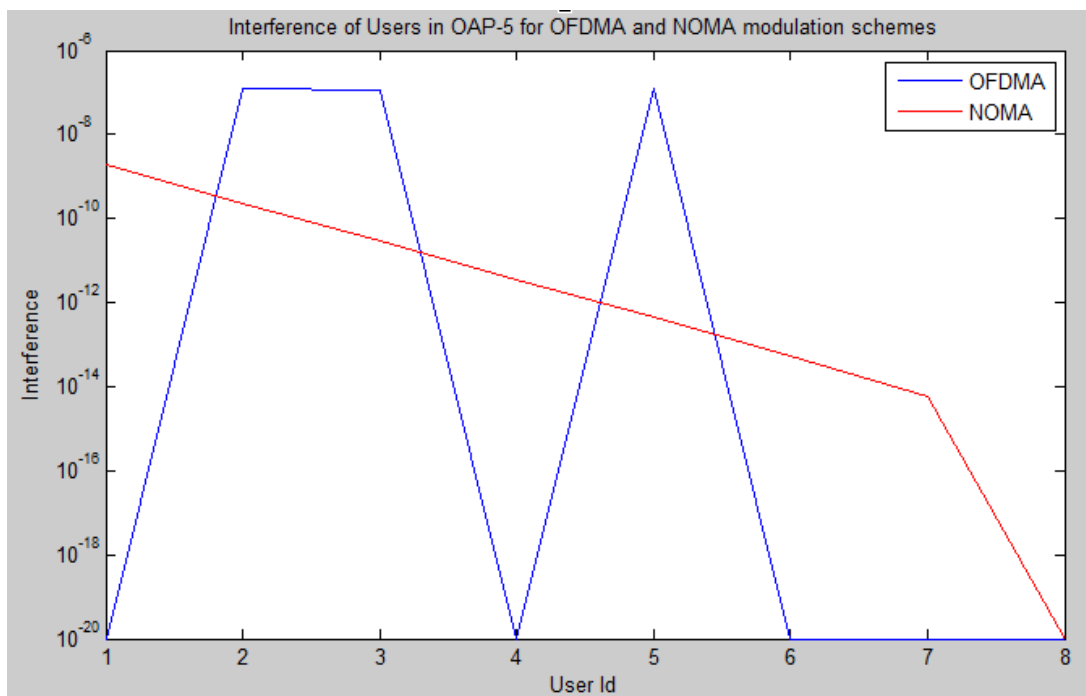
Σχήμα 35. Παρεμβολές των χρηστών του OAP-4.



Σχήμα 36. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-5.



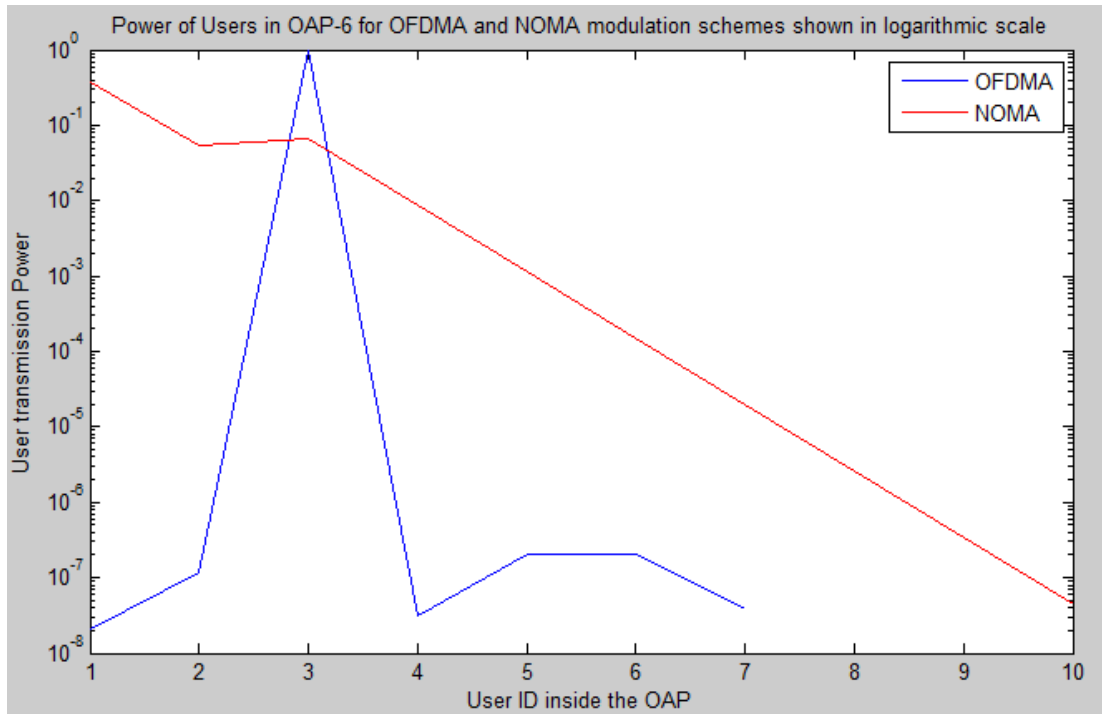
Σχήμα 37. Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών του OAP-5.



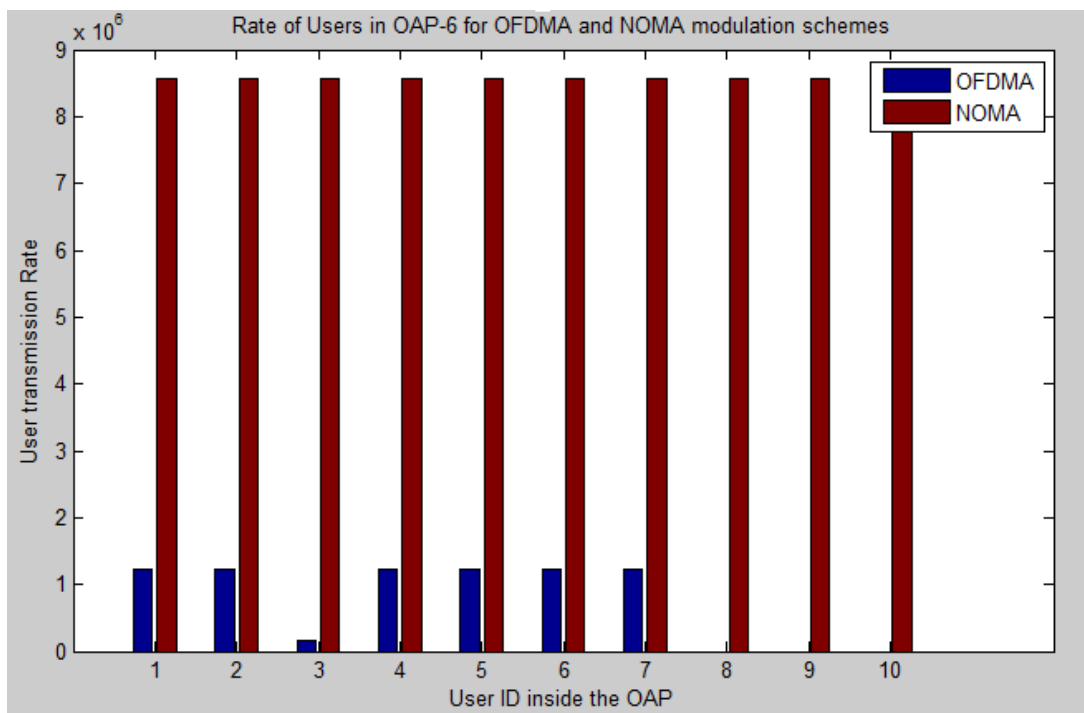
Σχήμα 38. Παρεμβολές των χρηστών του OAP-5.

Στο OAP-5 εκτός από το γεγονός ότι κάποιοι χρήστες ενώ εκπέμπουν με τη μέγιστη ισχύ, πετυχαίνουν μικρότερο ρυθμό μετάδοσης στην περίπτωση του OFDMA, παρατηρούμε ακόμα πως ο 8<sup>ος</sup> χρήστης που θα έπρεπε να εξυπηρετηθεί δεν

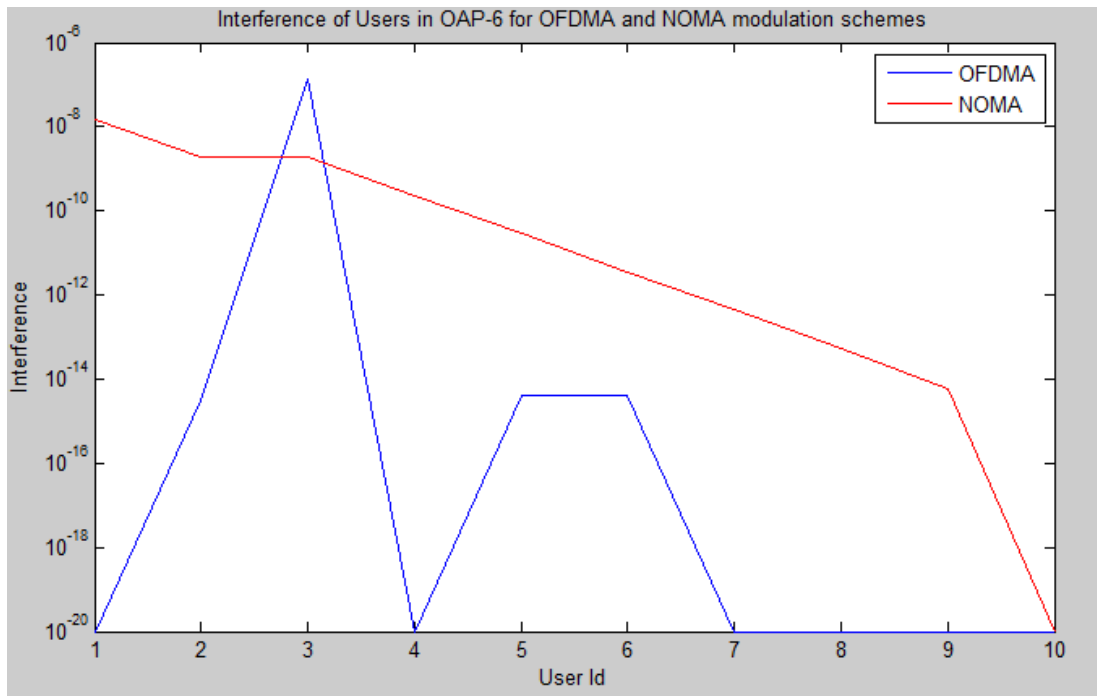
τα καταφέρνει, αφού το OAP μπορεί να διαθέσει μόνο 7 RBs. Αυτός ο περιορισμός δεν εμφανίζεται όταν χρησιμοποιούμε τον αλγόριθμο με χρήση της τεχνολογίας NOMA.



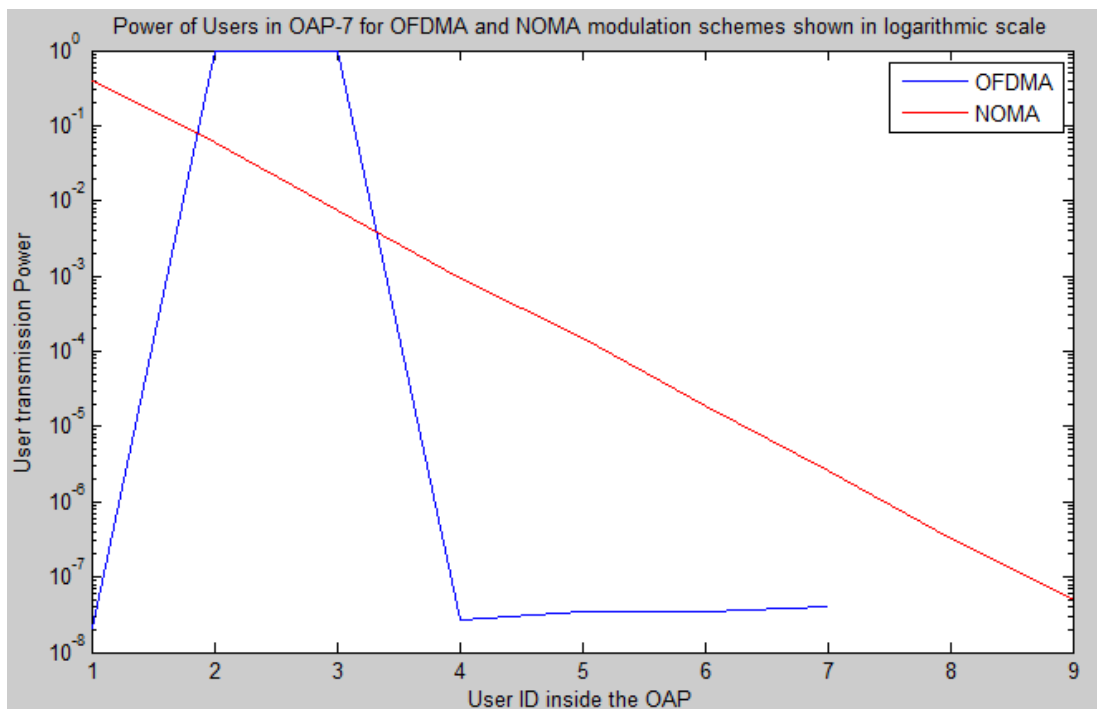
Σχήμα 39. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-6.



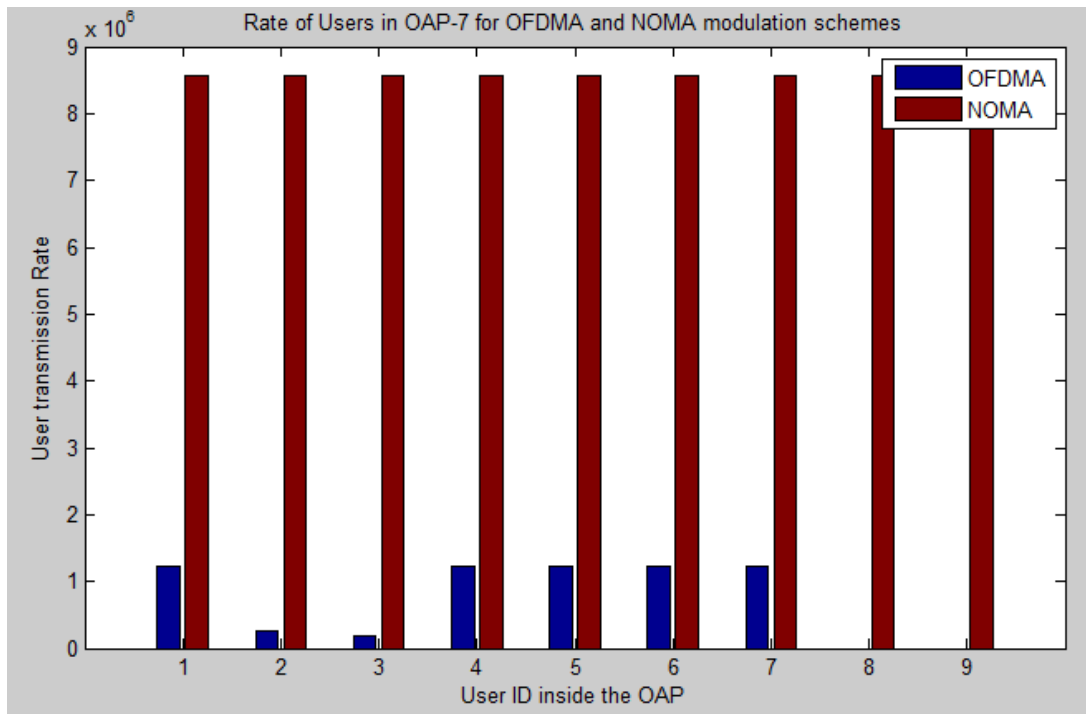
Σχήμα 40. Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών του OAP-6.



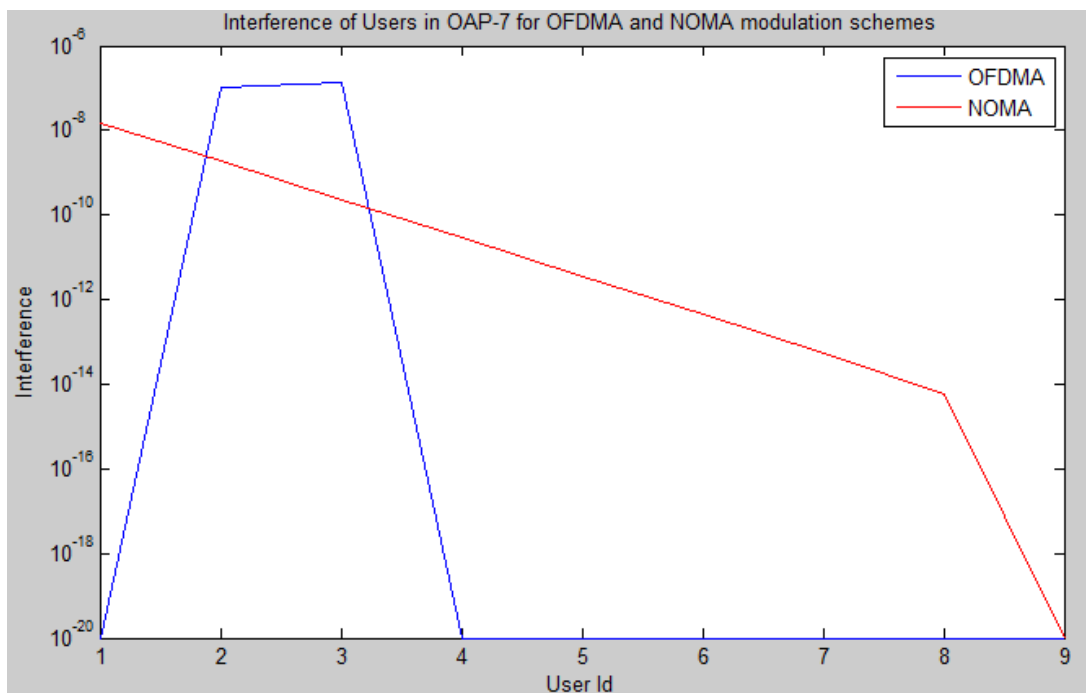
Σχήμα 41. Παρεμβολές των χρηστών του OAP-6.



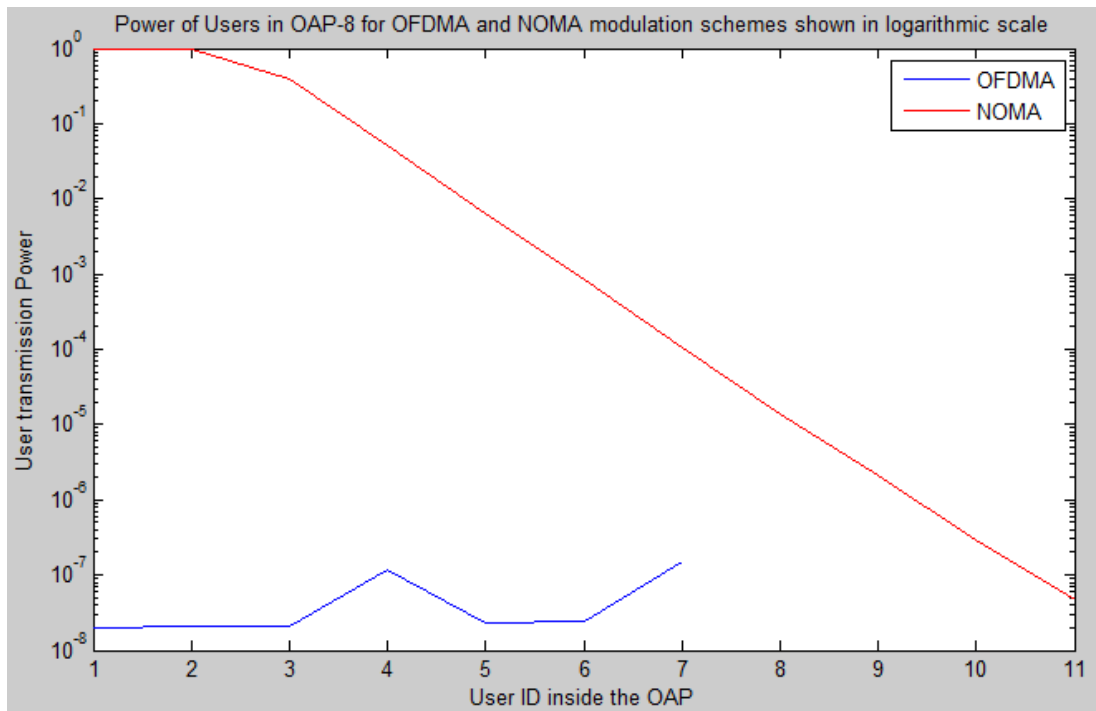
Σχήμα 42. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-7.



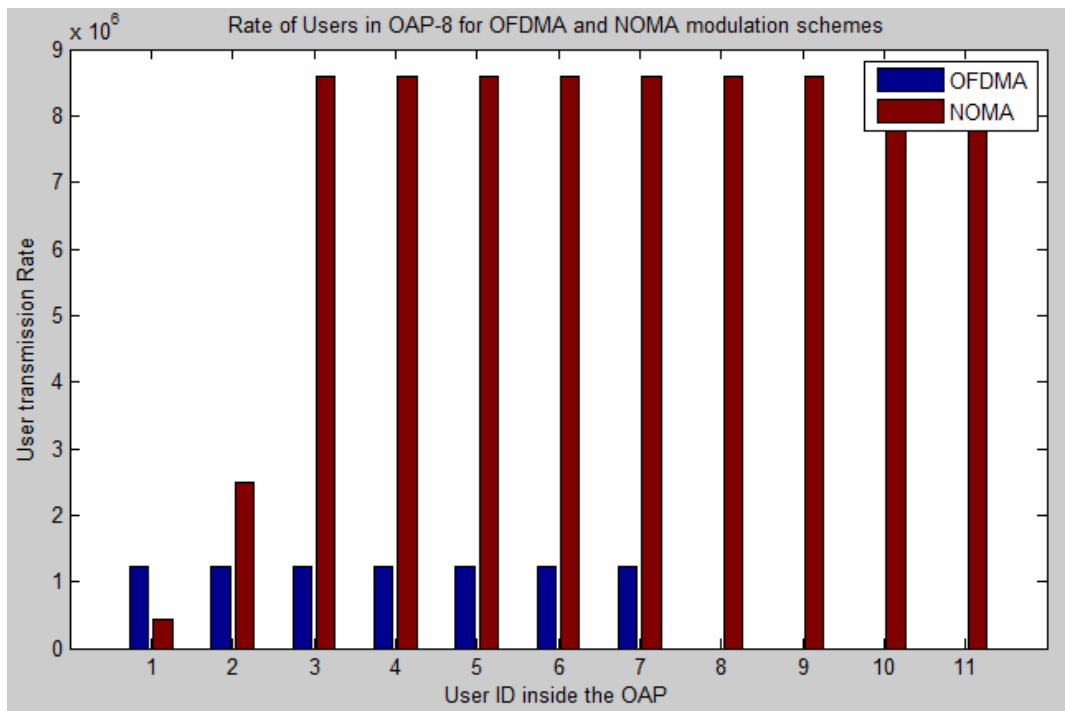
Σχήμα 43. Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών του OAP-7.



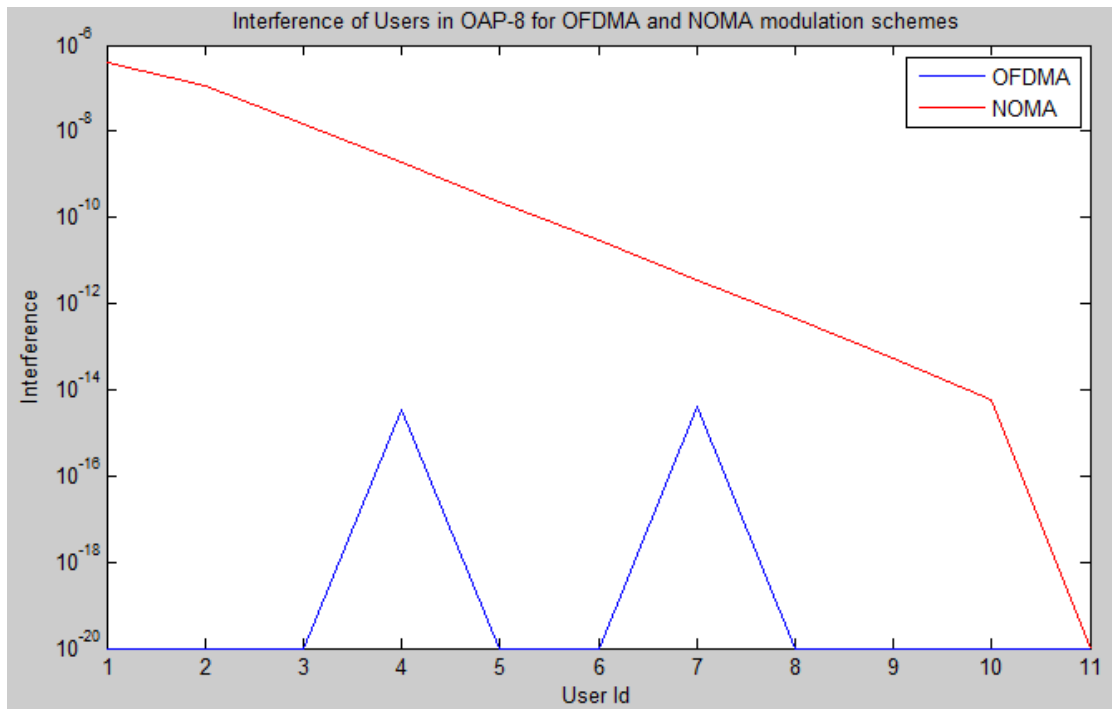
Σχήμα 44. Παρεμβολές των χρηστών του OAP-7.



Σχήμα 45. Ισχύς εκπομπής των χρηστών του OAP-8.

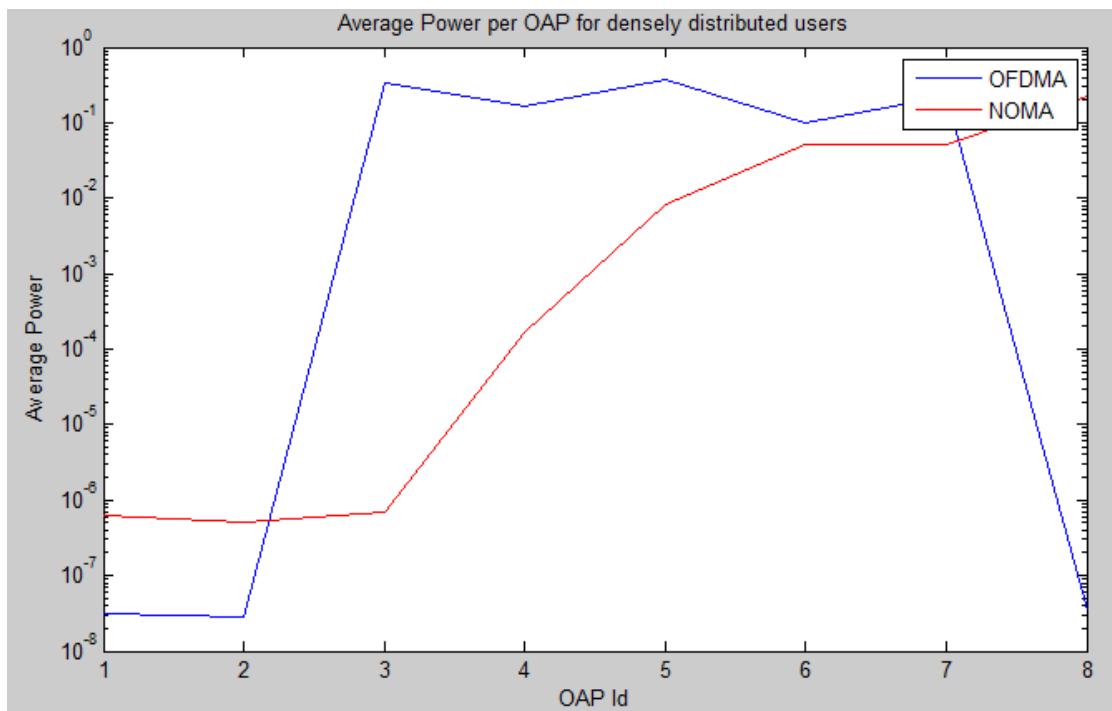


Σχήμα 46. Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών του OAP-8.

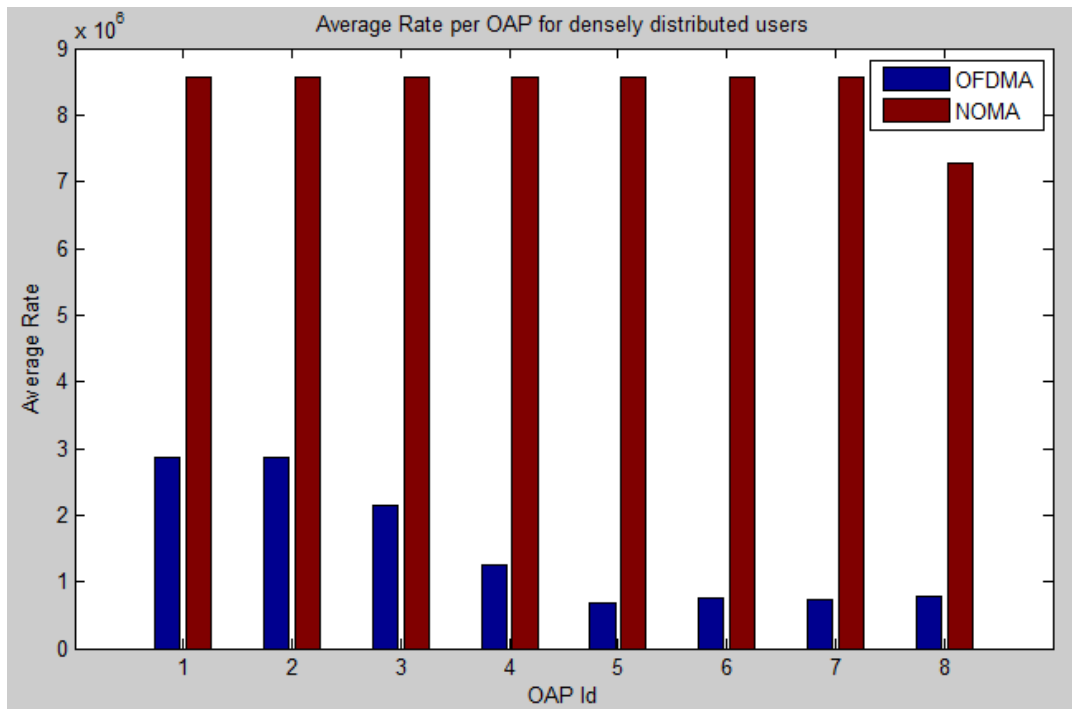


**Σχήμα 47 . Παρεμβολές των χρηστών του OAP-8.**

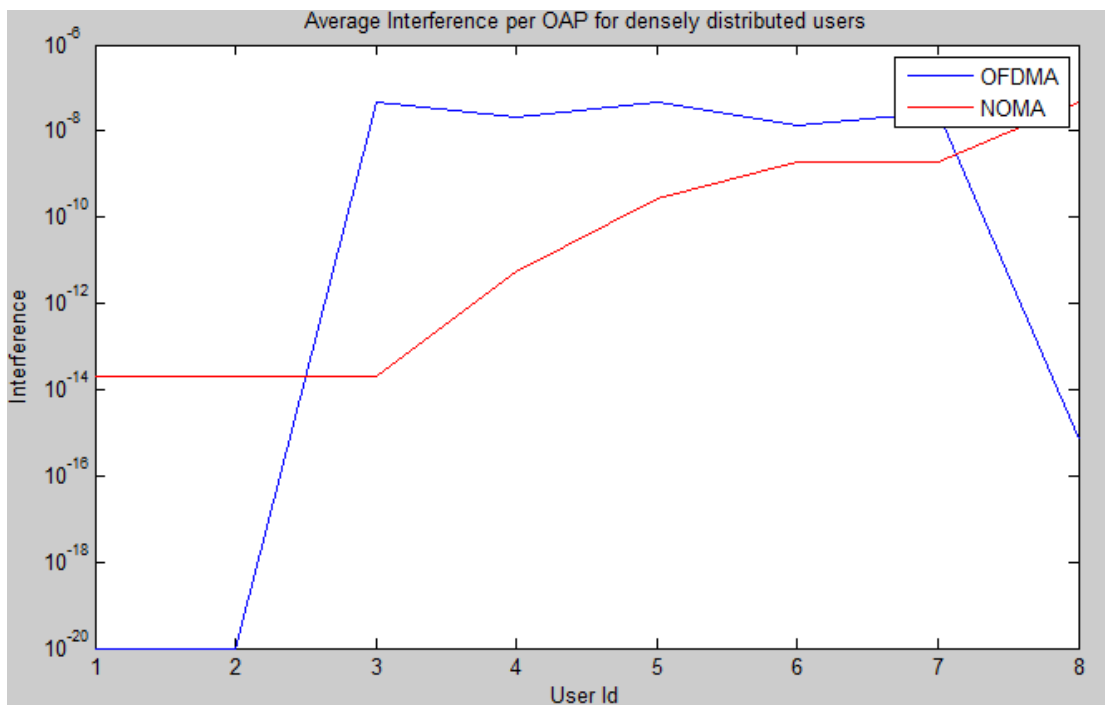
Στη συνέχεια ακολουθούν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα με τις μέσες τιμές των μεταβλητών που μελετήσαμε για κάθε OAP.



**Σχήμα 48. Μέση τιμή ισχύος εκπομπής για κάθε OAP.**



Σχήμα 49. Μέση τιμή ρυθμού μετάδοσης για τους χρήστες κάθε OAP.



Σχήμα 50. Μέση τιμή παρεμβολών για τους χρήστες κάθε OAP.

Στην επόμενη ενότητα θα σχολιάσουμε πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεών μας.



## 5.4 Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων

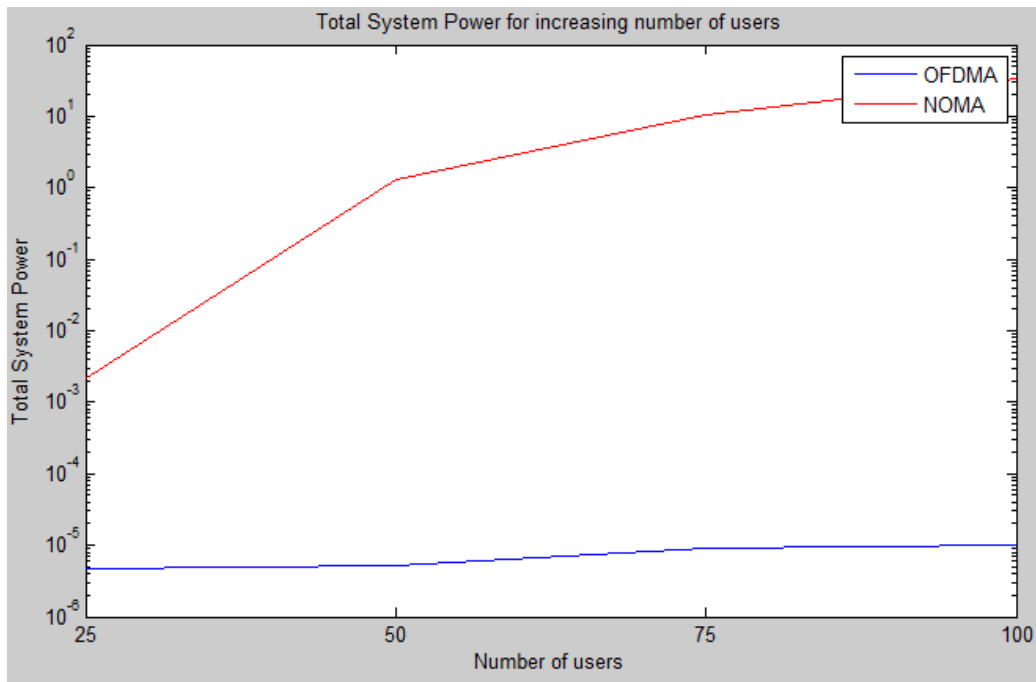
Αναλύοντας τα παραπάνω αποτελέσματα καταλήγουμε σε κάποιες πολύ σημαντικές παρατηρήσεις - συμπεράσματα.

Η πρώτη τοπολογία μας βοηθά να συγκρίνουμε τους δύο αλγορίθμους κατανομής πόρων (OFDMA και NOMA) με έναν « δίκαιο » τρόπο για την τεχνική OFDMA, καθώς σε αυτήν υπάρχει ο φυσικός περιορισμός των 7 RBs ανά OAP, δηλαδή το κάθε OAP μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι 7 χρήστες, αφού δεν επιτρέπεται επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων. Έτσι λοιπόν, έχοντας 7 χρήστες σε κάθε OAP παρατηρήσαμε πως στο μοντέλο OFDMA ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που επιτυγχάνουν οι χρήστες είναι σημαντικά μικρότερος από τον αντίστοιχο στο μοντέλο NOMA. Αυτή η παρατήρηση είναι αναμενόμενη, καθώς στη δεύτερη περίπτωση έχουν διαθέσιμο πολύ περισσότερο εύρος ζώνης. Ταυτόχρονα όμως, το μοντέλο NOMA εισάγει και περισσότερες παρεμβολές, οπότε η ισχύς εκπομπής που καταναλώνουν οι χρήστες για να πετύχουν τους αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης είναι κι αυτή αρκετά μεγαλύτερη. Η συνολική ισχύς που απαιτήθηκε για να πετύχουν οι χρήστες το SINR στόχο που είχαμε θέσει στα 6.5 dB ήταν μεγαλύτερη στο μοντέλο NOMA, σε γενικές γραμμές όμως ήταν σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα και για τους δύο τρόπους. Είδαμε ακόμα, πως όλοι χρήστες και στους δύο τρόπους κατάφεραν να πιάσουν το μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης που θα μπορούσαν με βάση το διαθέσιμο εύρος ζώνης που χρησιμοποίησαν.

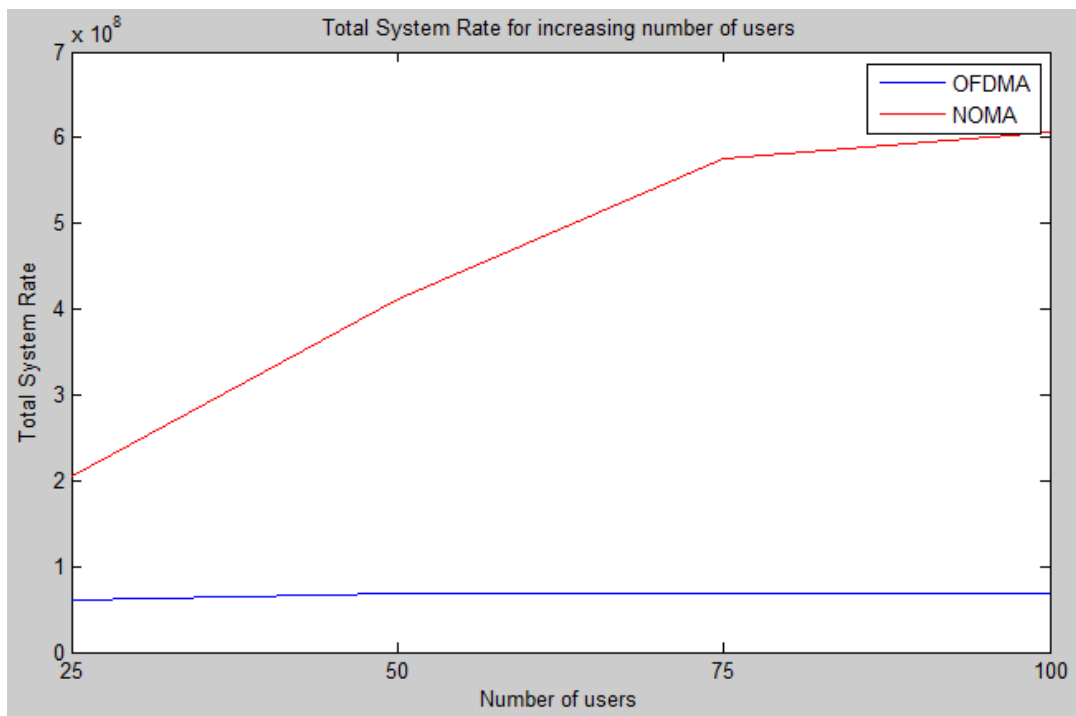
Η δεύτερη τοπολογία που τοποθετεί τους χρήστες με ανάμεικτο τρόπο στο δωμάτιο, δηλαδή σε άλλα σημεία πυκνά και σε άλλα αραιά είναι πιο ρεαλιστική, αφού είναι σπάνιο το γεγονός οι χρήστες να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε όλο το χώρο. Στα OAPs 1,2 που βρίσκονται μέσα μόνο 3 χρήστες και οι παρεμβολές είναι μικρές και τα δύο μοντέλα λειτουργούν με τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Στη συνέχεια όμως, στα OAPs 3,4 βλέπουμε πως υπάρχουν κάποιοι χρήστες που εξαιτίας της τοποθέτησής τους στο δωμάτιο και του τρόπου ανάθεσης των RBs, δέχονται πολύ αυξημένες παρεμβολές και έτσι αναγκάζονται να εκπέμπουν χρησιμοποιώντας τη μέγιστη δυνατή επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής και παράλληλα δεν μπορούν να επιτύχουν το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης. Το φαινόμενο αυτό εν γένει δεν είναι χαρακτηριστικό του OFDMA, το οποίο θα περιμέναμε να έχει χαμηλότερες τιμές ισχύος εκπομπής από το μοντέλο NOMA. Οφείλεται καθαρά στην τοπολογία και

είναι ενδεικτικό του τρόπου διαμοιρασμού των RBs με βάση το μεγαλύτερο κέρδος καναλιού. Παρόλα αυτά η υπεροχή του μοντέλου NOMA συνεχίζεται. Από τα OAPs 5-8 που καλούνται να εξυπηρετήσουν πάνω από 7 χρήστες βλέπουμε πως το μοντέλο OFDMA δεν μπορεί να εξυπηρετήσει τους πλεονάζοντες χρήστες, όπως ήταν αναμενόμενο. Αντίθετα το μοντέλο NOMA δεν αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα και μάλιστα παρέχει τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης. Μόνο στο OAP-8 που έχει να εξυπηρετήσει 11 χρήστες παρατηρούμε πως οι δύο από αυτούς που δέχονται και τις υψηλότερες παρεμβολές δεν καταφέρνουν να πιάσουν το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης. Στα συγκεντρωτικά διαγράμματα για το κάθε OAP φαίνεται η διαφορά στους ρυθμούς μετάδοσης, ενώ λόγω αυξημένων παρεμβολών δεν μπορεί να φανεί καθαρά η διαφορά στην απαιτούμενη ισχύ εκπομπής, η οποία στο μοντέλο NOMA είναι γενικά μεγαλύτερη.

Τέλος, θεωρήσαμε και πάλι το δωμάτιο με τα 8 OAPs και αυτή τη φορά τοποθετήσαμε μέσα συγκεκριμένους αριθμούς χρηστών με τυχαίο τρόπο. Υπολογίσαμε κάθε φορά τη συνολική καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής και το συνολικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που επιτυγχάνεται για το σύστημα. Παρατηρήσαμε ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών η διαφορά μεγαλώνει (και για τα δύο μεγέθη), ενώ είδαμε πως το OFDMA έχει μέγιστη χωρητικότητα τους 56 χρήστες.



Σχήμα 51. Συνολική ισχύς εκπομπής του συστήματος για αυξανόμενο αριθμό χρηστών.



Σχήμα 52. Συνολικός επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης του συστήματος για αυξανόμενο αριθμό χρηστών.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **ΕΠΙΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ**

## 6.1 Επίλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μια μελέτη πάνω στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας με τη χρήση συχνοτήτων του ορατού φωτός (VLC). Πιο συγκεκριμένα, μελετήσαμε το πρόβλημα της κατανομής των πόρων του συστήματος (ισχύς εκπομπής, ρυθμός μετάδοσης δεδομένων) στη ζεύξη ανόδου (uplink). Έχουμε χρησιμοποιήσει την έννοια της συνάρτησης χρησιμότητας (utility function) για να μοντελοποιήσουμε καλύτερα τις διαφορετικές ανάγκες και την ποικιλομορφία των χρηστών. Η συνάρτηση χρησιμότητας είναι ένα μέτρο της ευχαρίστησης που λαμβάνει ο χρήστης, ανάλογα με την ποιότητα της υπηρεσίας που του προσφέρεται. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήσαμε για να πετύχουμε το διαμοιρασμό των πόρων είχαν ως στόχο τη μεγιστοποίηση αυτής της συνάρτησης για τον κάθε χρήστη, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που υπάρχουν σε κάθε περίπτωση.

Η ανάλυσή μας έχει ως στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συσχέτιση που υπάρχει ανάμεσα στις παρεμβολές, την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων των χρηστών, για δύο διαφορετικούς αλγόριθμους κατανομής πόρων που χρησιμοποιήσαμε. Τα αποτελέσματά μας έρχονται να συμπληρώσουν ένα σημαντικό κομμάτι της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, τη μελέτη της ζεύξης ανόδου, σε ένα επιστημονικό πεδίο που είναι έτσι κι αλλιώς πολύ πρώιμο. Το αντικείμενο της VLC μελετάται ουσιαστικά τα τελευταία χρόνια και υπάρχουν πολλοί τομείς του που δεν έχουν εξερευνηθεί ακόμα.

## 6.2 Μελλοντική Εργασία

Η μελλοντική έρευνα πάνω σε δίκτυα VLC μπορεί να στηριχτεί σε αυτήν την εργασία και να περιλαμβάνει τη μελέτη πολυπλοκότερων συστημάτων με συνθετότερες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας από τους χρήστες. Επιπλέον, η φύση της VLC είναι τέτοια, που πρέπει να υπάρχει οπτική επαφή ανάμεσα στον πομπό και στο δέκτη σε όλη τη διάρκεια της επικοινωνίας, είναι δηλαδή πολύ ευαίσθητη σε παρεμβολές που μπορεί να προκαλέσουν εμπόδια στη διεύθυνση διάδοσης ή κίνηση των χρηστών. Πρέπει δηλαδή να υπάρχουν οι αλγόριθμοι και οι τεχνικές για την γρηγορότερη και ομαλότερη αποκατάσταση τέτοιων προβλημάτων. Κλείνοντας,

πρέπει να τονίσουμε πως είναι αναγκαία και η δημιουργία προτύπων τυποποίησης της λειτουργίας, όπως υπάρχουν για τα κλασικά συστήματα επικοινωνίας του RF φάσματος, προκειμένου να μπορέσει η VLC να λειτουργήσει, τόσο συμπληρωματικά με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες, όσο και αυτόνομα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Timotheos Kastrinogiannis, Eirini-Eleni Tsiropoulou, Symeon Papavassiliou “Utility-Based Uplink Power Control in CDMA Wireless Networks with Real-Time Services”, Springer in Proc. of International Conference on AD-HOC Networks & Wireless, vol. 5198, pp. 307-320
- [2] Eirini - Eleni Tsiropoulou, Panagiotis Vamvakas, Symeon Papavassiliou “Energy Efficient Uplink Joint Resource Allocation Non-cooperative Game with Pricing”, Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE
- [3] Eirini - Eleni Tsiropoulou, John Ziras, Symeon Papavassiliou “Service Differentiation and Resource Allocation in SC-FDMA Wireless Networks through User-Centric Distributed Non-Cooperative Multilateral Bargaining” , 7th International Conference on Ad Hoc Networks - Springer
- [4] Sebastian Vorköper, Volker Kühn “Power and Subcarrier Allocation Scheme for Uplink OFDMA”
- [5] Jianwei Huang, Vijay G. Subramanian, Rajeev Agrawal, and Randall Berry “Joint Scheduling and Resource Allocation in Uplink OFDM Systems for Broadband Wireless Access Networks” , IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 27, NO. 2, FEBRUARY 2009
- [6] Z. Ghassemlooy W. Popoola S. Rajbhandari “Optical Wireless Communications”
- [7] “IEEE 802.15.7 VLC PHY/MAC Specification” ,
- [8] Dominic O’Brien, Ross Turnbull, Hoa Le Minh, Grahame Faulkner, Olivier Bouchet, Pascal Porcon, Mamdouh El Tabach, Eric Gueutier, Mike Wolf, Liane Grobe, and Jianhui Li , “High-Speed Optical Wireless Demonstrators: Conclusions and Future Directions” , JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 30, NO. 13, JULY 1, 2012
- [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal\\_frequency-division\\_multiple\\_access](https://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiple_access)
- [10] [https://www.google.gr/search?q=OFDMA&rlz=1C1SVED\\_enGR395GR395&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi2\\_NTe2eXJAhWI7hoKHeWnDfkQ\\_AUIygB&biw=1600&bih=799](https://www.google.gr/search?q=OFDMA&rlz=1C1SVED_enGR395GR395&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi2_NTe2eXJAhWI7hoKHeWnDfkQ_AUIygB&biw=1600&bih=799)

[11] Tuan Nguyen, Mostafa Zaman Chowdhury and Yeong Min Jang “A novel link switching scheme using pre-scanning and RSS prediction in visible light communication networks” , Nguyen et al. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2013

[12] <http://visiblelightcomm.com/top-10-visible-light-communications-applications/>

[13] Nirzhar Saha, Ratan Kumar Mondal, Md. Shareef Ifthekhar, Yeong Min Jang “Dynamic Resource Allocation for Visible Light based Wireless Sensor Network”

[14] Nirzhar Saha, Ratan Kumar Mondal, and Yeong Min Jang “Opportunistic Channel Reuse for a Self-organized Visible Light Communication Personal Area Network”

[15] Woo-Chan Kim, Chi-Sung Bae, Soo-Yong Jeon, Sung-Yeop Pyun, and Dong-Ho Cho “Efficient Resource Allocation for Rapid Link Recovery and Visibility in Visible-Light Local Area Networks” , IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 56, No. 2, May 2010

[16] Ratan Kumar Mondal, Nirzhar Saha, Nam-Tuan Le, Yeong Min Jang, “SINR - Constrained Joint Scheduling and Optimal Resource Allocation in VLC Based WPAN System”, Springer Science + Business Media New York 2014

[17] Hanaa Marshoud, Vasileios M. Kapinas, George K. Karagiannidi, and Sami Muhaidat, “ Non-Orthogonal Multiple Access for Visible Light Communications” , DOI 10.1109/LPT.2015.2479600, IEEE Photonics Technology Letters